

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

До захисту  
Допускається  
Завідувач кафедри

Шуляк М.Л.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти  
на тему: «Обґрунтування використання системи точного землеробства під час виконання маневрів машинно-тракторного агрегату»

Виконав:

\_\_\_\_\_

(підпис)

Пархоменко М.В.

(Прізвище, ініціали)

Група:

СТЗ 2301-1м

(Науковий) керівник:

\_\_\_\_\_

(підпис)

Харченко Ф.М.

(Прізвище, ініціали)

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.

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2023 року

**З А В Д А Н Н Я**  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

\_\_\_\_\_ Пархоменко Максим Васильович \_\_\_\_\_

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Обґрунтування використання системи точного землеробства під час виконання маневрів машинно-тракторного агрегату»,

керівник роботи: \_\_\_\_\_ Харченко Фаріду Магомедівну, к.т.н., доцента \_\_\_\_\_,  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 202\_ року  
№ \_\_\_\_\_

2. Строк подання здобувачем роботи: “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2024 року.

3. Вихідні дані до роботи: довідникова література; посібники; наукові журнали з даної тематики; статті з наукових збірників; монографії, тощо за темою наукового дослідження; Інтернет джерела; методичні рекомендації для виконання проекту (роботи).

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):  
Вступ. Розділ 1. Нелінійний рух агрегату в полі та аналіз застосування систем розумного землеробства. Розділ 2. Послідовність дій проведення експериментальних досліджень. Розділ 3. Дані експерименту та їх обробка. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

**Презентація у Microsoft Office Power Point (слайд-презентація).**

6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання: “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2023 року

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Погоджено з керівником кваліфікаційної роботи
1	Збір інформації		
2	Аналіз літературних джерел з обраної тематики		
3	Складання плану роботи		
4	Написання вступу		
5	Написання 1 розділу «Аналітична частина»		
6	Написання 2 розділу «Основна частина»		
7	Написання 3 розділу «Досліджувальна частина»		
8	Написання висновків		
9	Подання роботи на перевірку унікальності до експертної ради факультету		
10	Подання роботи на рецензування		
11	Подання роботи до попереднього захисту		

**Здобувач вищої освіти**

\_\_\_\_\_ (підпис)

Пархоменко М.В.

(прізвище та ініціали)

**Керівник кваліфікаційної роботи**

\_\_\_\_\_ (підпис)

Харченко Ф.М.

(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Дипломна (магістерська) робота складається з пояснювальної записки на 46 аркушах друкованого тексту (шрифт Times New Roman), 23 рисунки, 12 таблиць, 25 літературного джерела та слайди.

*Метою даної роботи є* підвищення показників ефективності роботи польового агрегату під час руху по кривим траєкторіям при вирощуванні сільськогосподарських культур.

*Об'єктом даної роботи є* процес переміщення енергетичного засобу по кривим траєкторіям

**Предметом дослідження є** траєкторія руху енергетичного засобу.

Проаналізовано шляхи підвищення продуктивності роботи під час експлуатації агрегату, види поворотів, застосування систем точного землеробства під час виконання маневрів агрегатами, існуючі системи точного землеробства: паралельного водіння та автопілотування. За допомогою наших алгоритмів моделювання траєкторій криволінійного руху машинно-тракторного агрегату в табличному процесорі Microsoft Excel змодельовано поворот для агрегату МТЗ-80+КРН-4.2, отримана раціональна траєкторія лівого повороту центру ваги МТЗ-80 в польових умовах та траєкторія лівого повороту за допомогою елементів системи точного землеробства (супутникової навігаційної системи), зроблена статистична обробка координат кривих на відповідність, зроблені висновки.

**КРИВА ТРАЄКТОРІЯ, ТЯГАЧ, АГРЕГАТ, ШЛЯХ, КУТ ЕФЕКТИВНІСТЬ, ВІДХИЛЕННЯ ОСТОВА ТРАКТОРА, ГОН, ПОВОРОТ ЛІВИЙ, ПОВОРОТ ПРАВИЙ, РІВНЯННЯ.**

# ЗМІСТ

**ВСТУП**.....

## **РОЗДІЛ 1. НЕЛІНІЙНИЙ РУХ АГРЕГАТУ В ПОЛІ ТА АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ РОЗУМНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА**.....

1.1. Способи підвищення якісної роботи за годину агрегату.....

1.2. Поворот та його типи.....

1.3. Аналіз використання під час маневрів приладів розумного землеробства.....

1.3.1. Система водіння по паралелям (СПП).....

1.3.2. САВ - система автоводіння.....

## **РОЗДІЛ 2. ПОСЛІДОВНІСТЬ ДІЙ ПРОВЕДЕННЯ ЕСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**.....

2.1. Теоретичне модулювання маневрів ПА.....

2.1.1. Послідовність проведення досліджень на дослідному майданчику під час маневру ПА з використанням сучасних систем розумного землеробства (з системами супутникового зв'язку).....

2.1.2. Послідовність проведення досліджень в польових умовах випробування ПА під час маневру.....

2.2. Математичний обрахунок значень отриманих координат маневрів.....

## **РОЗДІЛ 3. ДАНІ ЕСПЕРИМЕНТУ ТА ЇХ ОБРОБКА**.....

3.1. Отримання теоретичного маневру розвороту петлеподібного на прикладі ПА: МТЗ-80+КРН-4,2.....

3.2. Результат отримання кривих елементів складного розвороту петлею на МТЗ-80 з використання супутникової навігації системи сучасного землеробства.....

3.3. Отримання кривої траєкторії елементів складного розвороту на прикладі тягача МТЗ-80.....

**ВИСНОВКИ**.....

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**.....

**ДОДАТКИ**.....

## ВСТУП



Продуктивність – один із найважливіших техніко-експлуатаційних показників роботи машинних агрегатів, від якого залежить ефективність технології загалом.

Продуктивність польових машинних агрегатів значною мірою залежить від робочої ширини захвату, швидкості руху, номінальної потужності двигуна, тягового зусилля енергетичного засобу, а також від раціонального використання робочого часу. Продуктивність також визначається умовами роботи, зокрема формою та розміром ділянки, глибиною обробітку, гранулометричним складом та питомим опором ґрунту, його щільністю та вологістю, рельєфом місцевості, фізіологічними властивостями рослин, об'ємом технологічних місткостей, маневровими властивостями агрегатів, кваліфікацією оператора тощо [1].

На продуктивність агрегатів також впливають умови експлуатації машин, що безперервно змінюються, а різкі коливання навантажувального та швидкісного режимів роботи агрегатів протягом року потребують належної працездатності машини та високої кваліфікації механізаторів.

Продуктивність польових машинних агрегатів значною мірою залежить від ефективності використання часу робочої зміни. Цей показник є одним серед найвагоміших резервів підвищення продуктивності. У балансі часу зміни налічується велика кількість складових, що характеризують непродуктивні затрати часу, які слід зменшувати, а збільшувати потрібно лише один параметр – час чистої роботи агрегату. Коефіцієнт використання часу зміни визначається як відношення часу чистої роботи агрегату до загального часу робочої зміни.

Оптимальне значення коефіцієнта використання робочого часу залежить від видів виконуваних робіт. Зокрема, для оранки, суцільної культивуації, дискування та луцення воно перебуває у межах 0,85 – 0,90; сівби зернових – 0,80, обприскування – 0,75 – 0,80, комбайнового збирання зернових культур – 0,70 – 0,75. За раціонального використання машинних агрегатів на зазначених операціях має забезпечуватися значення цих показників із мінімальними відхиленнями [1].

Резерви підвищення продуктивності машинних агрегатів.

Зважаючи на той факт, що продуктивність машинних агрегатів залежить насамперед від експлуатаційних властивостей двигунів, енергетичних засобів та робочих машин, режимів роботи агрегатів й організації робіт, то найважливішими резервами підвищення продуктивності агрегатів є:

- підтримування протягом усього процесу експлуатації енергетичних засобів високого рівня реалізації потужності на валу двигуна і на гаку завдяки своєчасному й проведеному в належному обсязі технічному обслуговуванню тракторів із використанням засобів діагностування, своєчасного усунення несправностей, виконання відповідних регулювань тощо;

- зниження питомих опорів машин і агрегатів завдяки своєчасному й високоякісному технічному обслуговуванню, використанню комплексних та комбінованих агрегатів у яких загальний опір менший порівняно з сумарним опором машин, які виконують одну операцію, за їхньої роздільної роботи, використанню найраціональніших зчіплень, правильному (відповідно до лінії тяги, без перекосів) агрегатуванні й навішуванні машин, виконанню робіт в оптимальні строки (наприклад щодо механічної стиглості ґрунтів) та ін.;

- оптимальне комплектування агрегатів завдяки найраціональнішій ширині захвату і вибір найліпшого швидкісного режиму (маневрування передачами, використання всережимного регулятора, робота на підвищених швидкостях, використання широкозахватних та комбінованих агрегатів,

маркерів і слідопоказчиків), що забезпечують повне використання конструктивної ширини захвату й потужності двигуна, якнайкраще завантаження трактора та забезпечення його роботи з максимальним тяговим коефіцієнтом корисної дії і найбільшою тяговою потужністю;

- підвищення коефіцієнтів використання часу робочої зміни та змінності у результаті кращої організації роботи агрегатів згідно з дво- і тризмінним режимами, впровадження раціональних способів руху для цих умов роботи агрегату, поліпшення підготовки умов роботи агрегату (розбивка поля на заїмки оптимальної ширини, відбивка мінімальних поворотних смуг, способів повороту тощо);

- застосування оптимальної логістики, яка б забезпечила своєчасний контроль та облік виконання змінних норм, усунення простоїв агрегатів і повну ліквідацію непродуктивних затрат часу;

- вивчення та розроблення принципово нових, менш енергоємних, процесів деформації ґрунту і створення на їхній основі нових робочих органів комбінованого й активного типів, які дадуть змогу зменшити питомий опір під час обробітку ґрунту і таким чином суттєво зросте робоча швидкість агрегатів;

- організація групової роботи агрегатів із забезпеченням потокових методів виробництва, поліпшення технологічного обслуговування агрегатів, використання засобів механізації під час технологічного обслуговування машин;

- автоматизація регулювання, підтримування постійності технологічних процесів, водіння агрегатів за заданою оптимальною траєкторією із використанням сучасних систем супутникової навігації, регулювання швидкісного режиму тощо [1].

# РОЗДІЛ 1.

## НЕЛІНІЙНИЙ РУХ АГРЕГАТУ В ПОЛІ ТА АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ РОЗУМНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА

### 1.1. Способи підвищення якісної роботи за годину агрегату.

Основною вимогою на даний час аграрної політики є розвиток господарювання по селах різноманітних форм роботи господарської власності. Більшістю суб'єктів господарювання України є фермерські власності. Аналізуючи існуючі форми господарств найбільша увага надається тим, банк земель яких складає більше 1000 га. Ефективна робота цих підприємств вимагає надання матеріально-технічної бази, застосування здобутків новітніх досягнень науки і техніки, які придатні забезпечити належну якість продукції сільського господарства, під час конкурентності.

Для цього потрібно мали по кількості якісний склад польових агрегатів (ПА), який повинен забезпечувати здійснення всіх етапів механізованих операцій в терміні оптимум з високою якістю та раціональними витратами. Рішення поставленої задачі можна виконати на високопродуктивних ПА.

Збільшити показник роботи ПА можна за рахунок параметрів, від яким вона залежить:

- 1) швидкість переміщення ПА ( $V_p$ , км/год.),
- 2) ширина захоплення під час виконання операції ( $B_p, м$ )
- 3) ефективність застосування часу зміни ( $\tau$ ).

Стримуючим фактором збільшення ефективності функціонування ПА шляхом підвищення швидкості переміщення є агровимоги. Обмежуючим фактором підвищення швидкості є мікропрофіль ґрунту.

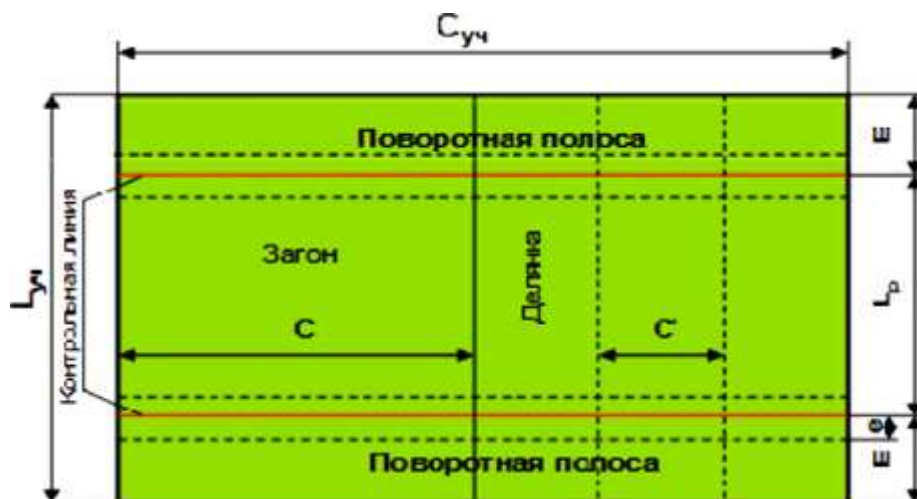
Нас цікавить третій шлях підвищення продуктивності ПА, який може бути реалізований за рахунок збільшення довжини гону та зменшення довжини розвороту та полоси розвороту.

Суттєво впливає на значення коефіцієнту часу зміни швидкість переміщення ПА. Збільшуючи швидкість коефіцієнт  $\tau$  знижується. Це обумовлюється тим, що на величезних швидкостях число робочих ходів і поворотів відповідно зростає пропорційно нарощуванню швидкості, проміжок часу на кожен поворот залишається майже сталим. Число зупинок при виконанні операції нарощується пропорційно швидкості переміщення ПА. Вагоме значення для зменшення часу на холості заїзди має вірне обрання типу повороту та його скорочення, ширина смуги поворотів і швидкість на них ПА. Підвищуючи лінію гонів тим саме ми і підвищуємо і коефіцієнт часу зміни.

Основні критерії холостого ходу:

- протяжність холостого ходу агрегату, ( $L_x$ );
- витрата проміжку часу на повороти, ( $T_x$ );
- витрата пального на холості переїзди та повороти, ( $Q_x$ );
- коефіцієнт відношення робочих до холостих ходів ( $\varphi$ ).

Коефіцієнт відношення робочих до холостих ходів ( $\varphi$ ) з фізичної точки зору це кінематичний ККД, так як він показує відсоток використаного з користю пройденого агрегатом шляху при виконанні етапу вирощування культур. Він пропорційно нарощується зі подовженням довжини гонів та знижується при зниженні радіусу маневру і довжині виїздання ПА. Але максимальний вплив має довжина корисного проходу (гону).



### Рис. 1.1. Параметричні величини загінки.

Основним критерієм раціоналізації під час руху холостим ходом є витрати пального. А додатковим показником ресурсозбереження можна використати мінімальний час, витрачений на холостий хід ПА та на допоміжні операції.

#### **1.2. Поворот та його типи.**

Поворот (рух по кривим лініям) займає велику частину під час виконання операцій навісними та ПА, особливо на маленьким полях. Значна кількість поворотів та не вірне їх виконання суттєво збільшують ширину поворотних ділянок і відповідно смуг, при цьому дуже подовжується холостий хід, що погано позначається на загальній ефективності застосування ПА.

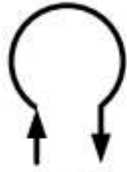
Поворот петлями виконується, коли відстань між суміжними проходами ПА менша за радіус його повороту. Поворот без петель застосовується, коли відстань між суміжними проходами ПА більше чи рівно двом радіусам його повороту.

Переваги чи недоліки:

Базові схеми поворотів класифікують на:



безпетльові - по дузі кола без  
прямолінійного відрізка; (дугоподібні) та з  
прямолінійним відрізком;



петльові - грушеподібні (відкрита петля);



вісімкоподібні (закрита петля);



повороти з заднім ходом агрегату з  
відкритою та закритою петлею;



голчасті - при реверсивному ході  
агрегату.

Рис. 1.2. Схеми поворотів ПА.

- наявність петлі той чи іншої форми подовжує траєкторію повороту, і тим саме подовжує і ширину смуги поворотів (грушеподібний, вісімкоподібний, петлеподібний з відкритою петлею);
- відсутність петлі той чи іншої форми скорочує довжину повороту без петлі у порівнянні з петельним і відповідно скорочує ширину смуги розворотів (без петлі дугою, з прямою лінією);
- повороти петлі заднім переміщенням агрегати можуть бути застосовані тільки для переміщення з навісним обладнанням, хоча широкої смуги розворотів не вимагає, але підвищується час повороту, із-за часу витраченого на перемикання на задній рух з зупинками.

Під кожен операцію ПА свій поворот, який залежить від умов роботи ПА, типу агрегату (ширина, захоплення, причіпний чи навісний, реверса).

Головна умова обрання повороту - поліпшення якості та експлуатації агрегату.

### **1.3. Аналіз використання під час маневрів приладів розумного землеробства.**

Одним із резервних шляхів підвищити ефективність експлуатації ПА та підвищення якості етапів вирощування сільськогосподарської продукції є застосування систем умного землеробства (систем авто водіння тігачів).

GPS – (Global Positioning System) – (глобальна) планетарна система локалізації (позиціонування). GPS-приймач, прилад, що надає зв'язок з супутниковими сигналами і показує координати. У фермерських господарствах (ФГ) такі прилади дуже розповсюджені і довели свої придатність.

Причиною огріх тракториста можуть бути невірна оцінка дистанції вертикально та горизонтально, до того ж вертикальна відстань менш точно оцінюється. І звідси виходить, що оператор трактора підстраховуючись здійснює перекриття чи пропуски.

Вирішити це питання дозволили впроваджені технічні засоби на основі космічних навігацій, такі як авто водіння (СAB) та системи переміщення по паралелям (СПП).

Управління виконується рухами руля, важеля перемикавання, педалей. Точність СПП відповідає в 150-300 мм – психомоторним властивостям людини, саме такий діапазон може контролювати людина під час водіння ПА на тривалому виконанні операцій вирощування рослин. Коли операція вирощування вимагає більш точної відстані тоді використовуються підрулюючі пристрої.

GPS-навігація надає суттєву допомогу при втомлюваності оператора та допомагає скоординувати рух та прогнозувати його.

### **1.3.1. Система водіння по паралелям (СПП).**

СПП це швидко окупна та наочна система розумного землеробства, яка виконує польові роботи та найбільш пристосована до техніки з широким захватом.

СПП – це діяльна участь оператора-тракториста в керуванні енергетичним засобом по схемі «визначення координат машини сільськогосподарського призначення – відтворення відхилень від заданого маршруту на екрані – утримання трактора на маршруті за допомогою руля».

Шкода, але психомоторіка людини не може керувати з відхиленням 300 мм – точність GPS-приймача від 24 звичайних супутника.

СПП komponується з приймача сигналів на тракторі планетарної системи локалізації (GPS) , контролера та екрану (рис. 1.3), який відтворює збіг або відхилення курсової траєкторії тягача. СПП дає можливість запам'ятати курс і скеровує трактор еквідестантно лінії, яка була відтворена вперше механізатором.



Рис.1.3. Складові елементи СПП.

Слід зауважити, що впровадження СПП в водіння з точністю переміщення енергетичного засобу до 300 мм дуже обмежена і застосовується тільки для операції внесення поживних речовин, інші операції вимагають більш точнішого відхилення.

Щоб отримати більш точні прилади СПП необхідні:

- приймач навігації з точністю локалізації до 100 мм, який може ловити дві частоти;
- екран або панель світлодіодна;
- контролер для обчислення відхилень на відхиленнях антени і коригування руху напрямку;
- прилад, який підрулює.

### 1.3.2. САВ - система автоводіння.

САВ відрізняється від СПП тим, що відхилення від курсової траєкторії, що отримує GPS-приймачі контролер навігації, додаються напряму до гідравлічної системи керування ходовою частиною тягача, нейтралізуючи інертність та люфт рульового управління. І додатково ще встановлюється спец датчик кута поворачиваемості коліс. Ця система забезпечує точність до 20 мм відхилення від курсової траєкторії переміщення агрегату без втручання оператора.

САВ розподіляються за типами: напівавтоматичні, програмні, автоматичні.

Напівавтоматичні САВ вимагають присутності обов'язково механізатора при здійснюванні криволінійного руху на полосах розворотів, а також контролю за роботою напівавтомата водіння.

Автоматичні САВ більш складні і не вимагають втручання оператора-механізатора під час виконання операції. До автоматичних САВ також відносяться системи групового водіння ПА.

Програмні САВ зовсім не використовують курсову траєкторію, а керуються лише програмним алгоритмом.

Будь яка система САВ складається: дисплей центру керування ПА, приймач, гідро клапани в блоці, контролер, датчик повороту (рис. 1.4).



Рис. 1.4. САВ та її складові.

Система автокерування (САК) надуває більше впровадження на потужних енергетичних засобах завдяки тому, що вона швидко окупується і надає сучасні комфортабельні умови праці механізатору протягом робочої доби. Переваги САК зосереджені на економії матеріальних резервів, економії витрат праці оператора на керування, стабільності роботи агрегату незалежно від часу доби.

Комфортні умови роботи механізатору надаються за рахунок: відсутності необхідності спостереження та перевірки заданої траєкторії переміщення енергетичного засобу, концентрації на виконанні операції вирощування рослини, концентрації на управлінні навісним знаряддям, не виникнення труднощів на здійсненні розвороту на смугах розворотних, збільшена тривалість якісної роботи.

Система автоводіння (АВ) може вести облік та контроль витрат пального, контроль за пробігом, контроль за траєкторією переміщення трактора, зниження невірної інформації в шляхових аркушах, детальний розрахунок ПММ, число заправлення та дозаправлення.

Система АВ повністю надає можливість оптимізувати всі сільськогосподарські процеси: на даний час проводити аналіз стану техніки, звітувати за аналіз стану та роботи спецтехніки за будь-який проміжок часу, своєчасно реагувати на форс-мажорні ситуації, контролювати та проводити повний облік витрат палива та мастила, збільшувати ефективність експлуатації в роботі сільськогосподарських машин, визначати точне місцезнаходження в процесі завантаження та розвантаження урожаю.

Важливі переваги системи АВ: комплектуюче приладдя просте в експлуатації та мобільне з одного на інший енергетичний засіб, майже на всі

сучасні енергетичні засоби придатне, один комплект універсальний на всі операції вирощування культур, отримання чесної реальної інформації даних, які не залежать від людини.

## **РОЗДІЛ 2.**

### **ПОСЛІДОВНІСТЬ ДІЙ ПРОВЕДЕННЯ ЕСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

#### **2.1. Теоретичне модулювання маневрів ПА.**

Для можливості моделювання маневру ПА використовуємо приклад енергетичного засобу МТЗ-80 у складі ПА з культиватором просапним КРН-4,2 з підживленням рідкими поживними речовинами.

Нами був обраний розворот петлею тягача МТЗ-80+КРН-4,2 з шириною захоплення 420 см і найкоротшою відстанню до центра ваги від центра повороту 520 см (рис. 2.1.). Швидкість пересування агрегату по траєкторії розвороту складає до 2,6 м/с. Це складний і великий вид розвороту, що вимагає габаритних розмірів смуги поворотів (1200 см).

**2.1.1. Послідовність проведення досліджень на дослідному майданчику під час маневру ПА з використанням сучасних систем розумного землеробства (з системами супутникового зв'язку).**

Для створення кривих маневрів в'їзду та виїзду з правого маневру енергетичного засобу з передніми керованими колесами застосовується супутникова система навігації.

Для проведення експериментальної частини використовується тягач МТЗ-80 з передніми колесами керування.

Для цього в кабіні тракториста-оператора на розрахованому місці розташування центра ваги закріплений сучасний портативний мобільний прилад з сенсорним екраном (гаджет-планшет). Необхідно обрати рівну по горизонталі ділянку певних розмірів під очікувану форму та довжину кривої та розмітити координати сітки з прямими відрізком для набирання сталої швидкості переміщення та з ясним визначенням початку в'їзду в маневр. При допомозі додатку на гаджет Tracker утворюється на екрані запис треку (кривої маневру) з супроводом чисел про розташування тягача від сигналів

супутнику: швидкість переміщення, час, витрачений на хід, протяжність кривої, широта та довгота крапки кривої. Час маневру зазначався за допомогою секундоміру.

Далі необхідно накласти криві одна на одну (експериментальну на теоретичну за допомогою побудовану Excel) та порівняти їх.

### **2.1.2. Послідовність проведення досліджень в польових умовах випробування ПА під час маневру.**

За програмою випробувань передбачено аналіз показників переміщення по кривим траєкторіям: довжина переміщення маневру, кут відхилення корпусу трактора, радіус викривлення.

Польові випробування будуть проведені на прикладі енергетичного засобу МТЗ-80.

При підготовці в польових умовах необхідно виконати ряд налаштувань:

- обрання рівного по горизонталі майданчика відповідних розмірів відповідно до траєкторії кривого маневру (кут відхилення ділянки по вертикалі не повинен перевищувати два градуси);
- нанесення координатних ліній на прямолінійній ділянці для стабілізації заданої швидкості переміщення і з встановленням початку входження у поворотний маневр;
- прогрівання та обкатка енергетичного засобу;
- встановлення обладнання та пристосувань для відтворення траєкторії центру ваги цього тягача;
- наочно перевірка комплектації, гідросистеми, двигуна;
- перевірка на справність приладів вимірювання та інструменту;
- стабілізація заданої швидкості переміщення та забезпечення рівномірності обертів керованих коліс під час входження та виходження з манієрів-поворотів;

- встановлення характеристик і параметрів, необхідних для розрахунку: кута відхилення від горизонтальної вісі корпусу трактора наприкінці входу і в кінці виходу з маневру, координат центра ваги енергетичного засобу.

Транспортний засіб, обладнаний пристосуванням для креслення траєкторії центра ваги на полі (рис. 2.1.) і приладдям для фіксування точок на траєкторії та приладами для надання заданого переміщення обертання керма.

Нами під час випробувань необхідно обладнання: лазерний далекомір (Bosch GLM 250 VF Professional) (рис. 2.2), який дає можливість розрахувати площі, об'єми, заміряти відстані, довжини, висоти, віддалень. Може бути використаний як в середині приміщення так і на відкритому просторі.



Рис. 2.1 – Пристрій для креслення траєкторії центра ваги в польових умовах.

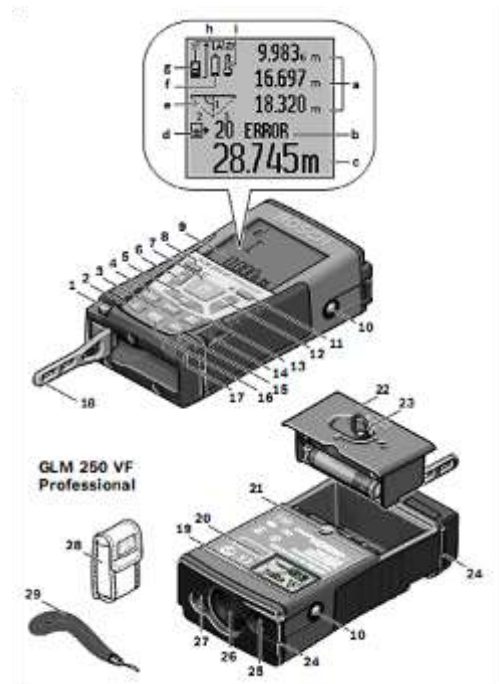


Рис. 2.2 – Приладдя для вимірювання довжин.

Задача досліджень в польових умовах - отримання характеристик, необхідних для моделювання кривих маневрів ПА. Точка центру ваги можна визначити на важелях-платформах з повним баком пального. Після проходження контрольної ділянки заміряємо інформацію по швидкості переміщення тягача, радіусу поворачиваемості, куту відхилення корпусу від горизонталі та коліс. Для виконання закону змінення у часі кутів повороту коліс керування виконують апробаційні заїзди. Параметри кінематики траєкторії переміщення центру кінематики (координати, кути) заміряються після відтворення траєкторії за допомогою креслярки. Налаштування креслярки зображено на рисунку 2,1. Час виконання маневру фіксується секундоміром. При переміщенні ПА креслярка креслить дійсну траєкторію маневру, яка відповідає його центру кінематики. Потім траєкторію розбивають умовно на однакові ділянки через 1-2 метри і в ці точки встановлюють віхи та за допомогою теодоліта (рис. 2.3) з далекоміром, розташованого в деякій точці  $O_T$  заміряють відстані від теодоліта до вішок  $\ell_i$ ,  $\rho_i$ , та кути між радіусами та сусідськими вішками та  $\kappa_i$  – кути атаки.



Рис. 2.3. Вигляд теодоліту.

Треба перевизначити координати у звичайну систему декарт, як і математичні рівняння переміщення ПА.

$$x_i = \rho_i \cos\left(\frac{\pi}{2} - \eta_i\right) = \rho_i \sin \eta_i; \quad (2.1)$$

$$y_i = \rho_o - \rho_i \sin\left(\frac{\pi}{2} - \eta_i\right) = \rho_o - \rho_i \cos \eta_i; \quad (2.2)$$

$$\rho_o = \overline{OO_T}; \quad \rho_i = \sqrt{\ell_i^2 - H^2} \quad (2.3)$$

де  $H$  – відстань по вертикалі оптичного прицілу.

Координати вішок також визначалися шляхом заміру за допомогою далекоміра лазерного від точки до вісі координат. Та координата, яка побудована в польових умовах та з теодолітом, значення відповідає великій точності.

Реальна швидкість енергетичного засобу:

$$v_d = \frac{S}{t}, \quad (2.4)$$

де  $S$  – горизонтальна відстань всієї траєкторії,  $t$  – час маневру.

## 2.2. Математичний обрахунок значень отриманих координат маневрів.

Для нанесення розмірної сітки на польовій ділянці у довільній точці  $O_T$  (рис. 2.4) розташовують теодоліт на деякому проміжку від точки  $\rho_o$ . Під кутом дев'яносто градусів до осі  $y$  при допомозі теодоліта влаштовується ще одна вішка для осі  $x$ . Першочерговий прямий відрізок до 10 м, влаштований для стабілізації швидкості.

С початку отримуємо вихідні показники траєкторії маневру: швидкість переміщення, проміжок часу на здійснення входження та виходження з повороту, кінцевий параметр повертання корпусу машини відносно горизонталі, безрозмірний показник змінення курсового кута. Потім кут переміщення керма, який надасть отримання всіх вищенаведених показників. Для цього необхідно отримати середній кут відхилення керованих коліс:

$$\alpha_{1\max} = \frac{L}{\ell_2} \alpha_k, \quad (2.5)$$

далі підставляємо число передаточного відношення і отримуємо необхідний кут переміщення керма:

$$\alpha_{1к} = \frac{L_i}{\ell_2} \alpha_k. \quad (2.6)$$

Число передаточного співвідношення для нашого енергетичного засобу  $j = 17,5$ , яке обираємо сталим. В наслідок цього ми отримуємо рівномірний

закон обертання коліс керування на площині, який забезпечується рівномірним відхиленням керма.

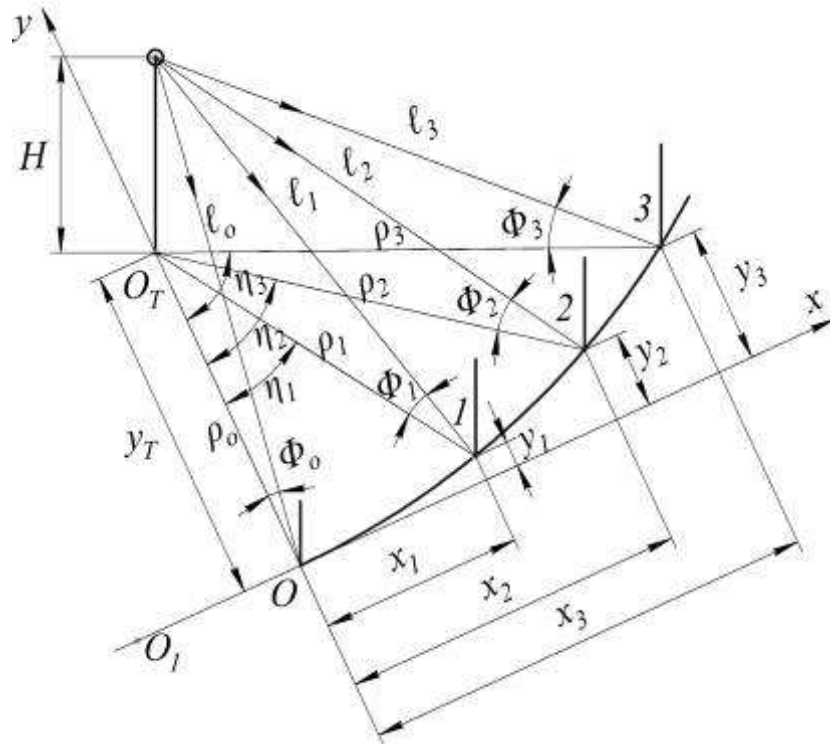


Рис. 2.4. Щоб отримати координати польового маневру.

Координати точок польової дослідної траєкторії можуть не співпадати з теоретичною (змодельованою), тому що дослідні віхи розташовувались в довільній черзі. Щоб рівноцінно оцінити результати необхідно траєкторії звести до єдиного масштабу.

Задача досліджень полягала в тому, щоб сумістити обидві траєкторії і зробити статистичну оцінку даних. За отриманими математичними результатами визначення траєкторії вона формується двома основними величинами: швидкістю переміщення ПА та безрозмірним показником зміни кута курсу маневру агрегату.

Отримані дві траєкторії дають повну можливість оцінити достовірність дослідів та вірність отриманих рівнянь руху по кривим траєкторіям ПА.

Для оцінки отриманих результатів нами необхідно скористатися наступними формулами:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{(x_{1e} - x)^2 + (x_{2e} - x)^2 + \dots + (x_{ne} - x)^2}{n}}; \quad (2.7)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{(y_{1e} - y)^2 + (y_{2e} - y)^2 + \dots + (y_{ne} - y)^2}{n}}. \quad (2.8)$$

де  $x_{1e}, x_{2e}, \dots, x_{ne}$  і  $y_{1e}, y_{2e}, \dots, y_{ne}$  – дослідні дані кривої;

$$x = \frac{x_{1\Gamma} + x_{2\Gamma} + \dots + x_{n\Gamma}}{n}; \quad y = \frac{y_{1\Gamma} + y_{2\Gamma} + \dots + y_{n\Gamma}}{n} \quad (2.9)$$

$x, y$  – арифметичне значення в середньому;  $n$  – множина точок траєкторії.

## РОЗДІЛ 3.

### ДАНІ ЕСПЕРИМЕНТУ ТА ЇХ ОБРОБКА

#### 3.1. Отримання теоретичного маневру розвороту петлеподібного на прикладі ПА: МТЗ-80+КРН-4,2.

Повний маневр розвороту є складною траєкторією, що утворюються з декількох маленьких простих маневрів. Щоб отримати повний маневр, треба змодельовати прості його елементи: в'їзд та виїзд з правого чи лівого маневрів, переміщення по колу вправо чи вліво.

Вихідні величини для всіх простих елементів:  $v = 1,3$  м/с;  $\ell = 0,93$  м;  $R_{\min} = 5,2$  м; шлях  $S = vt$ .

*В'їзд та виїзд з лівого повороту.*

$$\alpha_k = \ell / R_{\min} = 0,93 / 5,2 = 0,1788 \text{ рад} = 10,25^\circ. \quad \alpha_o = 0 \quad \text{і час} \quad t = 2,2 \text{ с.}$$

$k = \alpha_k / t = 0,179 / 2,2 = 0,08129 \text{ с}^{-1} \quad \theta_1 = 0$ . Показники розрахунків знесені до таблиці 3.1, а траєкторія – на рисунку 3.1.

Таблиця 3.1. В'їзд в лівий поворот.

№ з/п	$t$ , с	$x_i$ , м	$y_i$ , м	$\alpha$ , рад	$\alpha$ , град	$\varphi$ , рад	$\varphi$ , град	$R$ , м	$S$ , м	$x$ , м	$y$ , м
1	0	0	0	0	0	0	0	$\infty$	0	0	2,10
2	0,25	0,32	0,004	0,020	1,17	0,004	0,20	45,76	0,33	0,32	2,10
3	0,50	0,65	0,02	0,041	2,33	0,014	0,81	22,88	0,65	0,65	2,12
4	0,75	0,97	0,04	0,061	3,50	0,032	1,83	15,25	0,98	0,97	2,14
5	1,00	1,30	0,08	0,081	4,66	0,057	3,26	11,44	1,30	1,30	2,18
6	1,25	1,62	0,13	0,102	5,83	0,089	5,09	9,15	1,63	1,62	2,23
7	1,50	1,93	0,20	0,122	6,99	0,128	7,33	7,63	1,95	1,93	2,30
8	1,75	2,25	0,29	0,142	8,16	0,174	9,97	6,54	2,28	2,25	2,39
9	2,00	2,55	0,41	0,163	9,32	0,227	13,03	5,72	2,60	2,55	2,51
10	2,20	2,79	0,52	0,179	10,25	0,275	15,76	5,20	2,86	2,79	2,62

$$\alpha_o = 0,1788 \text{ рад} = 10,25^\circ, \quad \alpha_k = 0. \quad t = 2,2 \text{ с.}$$

$$k = (\alpha_k - \alpha_o)/t = (0 - 0,179)/2,2 = -0,08129 \text{ с}^{-1}, \quad \varphi_{k2} = 15,76^\circ. \quad \tau$$

$\theta_2 = \varphi_{k1} = 15,76^\circ$ . Показники розрахунків знесені до таблиці 3.2, а траєкторія – на рисунку 3.2.

Таблиця 3.2. Виїзд з лівого повороту.

№ з/п	t, с	x <sub>i</sub> , м	y <sub>i</sub> , м	α, рад	α, град	φ, рад	φ, град	R, м	S, м	x, м	y, м
1	0	0	0	0,179	10,25	0	0	5,20	0	2,79	2,62
2	0,25	0,32	0,06	0,159	9,09	0,059	3,38	5,87	0,33	3,08	2,77
3	0,50	0,63	0,14	0,138	7,92	0,111	6,35	6,73	0,65	3,36	2,93
4	0,75	0,95	0,23	0,118	6,76	0,156	8,92	7,89	0,98	3,64	3,09
5	1,00	1,26	0,32	0,098	5,59	0,193	11,07	9,53	1,30	3,91	3,27
6	1,25	1,57	0,41	0,077	4,43	0,224	12,82	12,04	1,63	4,19	3,44
7	1,50	1,88	0,51	0,057	3,26	0,247	14,17	16,34	1,95	4,46	3,62
8	1,75	2,19	0,61	0,037	2,10	0,263	15,10	25,42	2,28	4,73	3,80
9	2,00	2,50	0,71	0,016	0,93	0,273	15,63	57,20	2,60	5,00	3,98
10	2,20	2,75	0,78	0,000	0,00	0,275	15,76	∞	2,86	5,22	4,12

*В'їзд в правий маневр:*

$$\alpha_o = 0, \quad k = -0,08129 \text{ с}^{-1}, \quad t = 2,0 \text{ с};$$

$$\alpha_k = \alpha_o + kt = 0 - 0,08129 \cdot 2,2 = -0,1788 \text{ рад} = -10,25^\circ, \quad \varphi_{k3} = -15,76^\circ.$$

$\theta_3 = \theta_2 + \varphi_2 = 15,76 + 15,76 = 31,52^\circ$ . Показники розрахунків знесені до таблиці 3.3, а траєкторія – на рисунку 3.3.

Таблиця 3.3. В'їзд в правий маневр.

№ з/п	t, с	x <sub>i</sub> , м	y <sub>i</sub> , м	α, рад	α, град	φ, рад	φ, град	R, м	S, м	x, м	y, м
1	0	0	0	0	0	0	0	∞	0	5,30	4,14
2	0,25	0,32	0,00	-0,020	-1,17	-0,004	-0,20	-45,76	0,33	5,58	4,31
3	0,50	0,65	-0,02	-0,041	-2,33	-0,014	-0,81	-22,88	0,65	5,87	4,46
4	0,75	0,97	-0,04	-0,061	-3,50	-0,032	-1,83	-15,25	0,98	6,16	4,61
5	1,00	1,30	-0,08	-0,081	-4,66	-0,057	-3,26	-11,44	1,30	6,45	4,75
6	1,25	1,62	-0,13	-0,102	-5,83	-0,089	-5,09	-9,15	1,63	6,75	4,87
7	1,50	1,93	-0,20	-0,122	-6,99	-0,128	-7,33	-7,63	1,95	7,06	4,98
8	1,75	2,25	-0,29	-0,142	-8,16	-0,174	-9,97	-6,54	2,28	7,37	5,06
9	2,00	2,55	-0,41	-0,163	-9,32	-0,227	-13,03	-5,72	2,60	7,69	5,12
10	2,20	2,79	-0,52	-0,179	-10,25	-0,275	-15,76	-5,20	2,86	7,95	5,15

Рух по колу.  $\alpha_k = \alpha_o = -0,1788$  рад =  $-10,25^\circ$ ;  $k = 0$ ;  $t = 14,77$  с;  
 $\varphi_k = -211,67^\circ$ . Осі  $x_4 y_4$   $\theta_4 = \theta_3 + \varphi_3 = 31,52 - 15,76 = 15,76^\circ$ . Показники  
розрахунків знесені до таблиці 3.4, а траєкторія – на рисунку 3.4.

Таблиця 3.4. Рух правим колом.

№ з/п	t, с	x <sub>i</sub> , м	y <sub>i</sub> , м	α, рад	α, град	φ, рад	φ, град	R, м	S, м	x, м	y, м
1	0	0	0	-0,179	-10,25	0	0	-5,2	0	7,95	5,15
2	1,00	1,24	-0,39	-0,179	-10,25	-0,25	-14,33	-5,2	1,3	9,25	5,12
3	2,00	2,34	-1,07	-0,179	-10,25	-0,50	-28,66	-5,2	2,6	10,49	4,76
4	3,00	3,24	-2,00	-0,179	-10,25	-0,75	-42,99	-5,2	3,9	11,61	4,11
5	4,00	3,88	-3,13	-0,179	-10,25	-1,00	-57,32	-5,2	5,2	12,54	3,19
6	5,00	4,22	-4,38	-0,179	-10,25	-1,25	-71,66	-5,2	6,5	13,21	2,08
7	6,00	4,24	-5,68	-0,179	-10,25	-1,50	-85,99	-5,2	7,8	13,58	0,84
8	7,00	3,95	-6,94	-0,179	-10,25	-1,75	-100,32	-5,2	9,1	13,63	-0,45
9	8,00	3,34	-8,09	-0,179	-10,25	-2,00	-114,65	-5,2	10,4	13,37	-1,72
10	9,00	2,48	-9,05	-0,179	-10,25	-2,25	-128,98	-5,2	11,7	12,79	-2,88

Виїзд з правого маневру.

$\alpha_o = -0,1788$  рад =  $-10,25^\circ$ ,  $\alpha_k = 0$ .  $t = 2,2$  с.  $k = 0,08129$  с<sup>-1</sup>.  $x_5 y_5$  на кут  $\theta_5 = \theta_4 + \varphi_4 = 15,76 - 211,53 = -196,05^\circ$ . Показники розрахунків знесені до таблиці 3.5, а траєкторія – на рисунку 3.5.

Таблиця 3.5. Виїзд з правого маневру

№ з/п	t, с	x <sub>i</sub> , м	y <sub>i</sub> , м	α, рад	α, град	φ, рад	φ, град	R, м	S, м	x, м	y, м
1	0	0	0	-0,179	-10,25	0	0	-5,20	0	6,17	-4,69
2	0,25	0,32	-0,06	-0,159	-9,09	-0,059	-3,38	-5,87	0,33	5,88	-4,54
3	0,50	0,63	-0,14	-0,138	-7,92	-0,111	-6,35	-6,73	0,65	5,59	-4,38
4	0,75	0,95	-0,23	-0,118	-6,76	-0,156	-8,92	-7,89	0,98	5,30	-4,21
5	1,00	1,26	-0,32	-0,098	-5,59	-0,193	-11,07	-9,53	1,30	5,01	-4,04
6	1,25	1,57	-0,41	-0,077	-4,43	-0,224	-12,82	-12,04	1,63	4,73	-3,86
7	1,50	1,88	-0,51	-0,057	-3,26	-0,247	-14,17	-16,34	1,95	4,44	-3,67
8	1,75	2,19	-0,61	-0,037	-2,10	-0,263	-15,10	-25,42	2,28	4,16	-3,49
9	2,00	2,50	-0,71	-0,016	-0,93	-0,273	-15,63	-57,20	2,60	3,87	-3,31
10	2,20	2,75	-0,78	0,000	0,00	-0,275	-15,76	∞	2,86	3,65	-3,17

*В'їзд та виїзд з лівого маневру.*

$\alpha_o = 0$ ,  $\alpha_k = 0,1788$  рад =  $10,25^\circ$ .  $t = 2,2$  с.  $k = -0,08129$  с<sup>-1</sup>.  $x_6 y_6$  на кут  $\theta_6 = \theta_5 + \varphi_5 = -15,76 - 196,05 = -211,815^\circ$ . Показники розрахунків знесені до таблиці 3.6, а траєкторія – на рисунку 3.6.

Таблиця 3.6. В'їзд в лівий маневр

№ з/п	t, с	x <sub>i</sub> , м	y <sub>i</sub> , м	α, рад	α, град	φ, рад	φ, град	R, м	S, м	x, м	y, м
1	0	0	0	0	0	0	0	∞	0	3,65	-3,17
2	0,25	0,32	0,00	0,020	1,17	0,004	0,20	45,76	0,33	3,37	-3,00
3	0,50	0,65	0,02	0,041	2,33	0,014	0,81	22,88	0,65	3,09	-2,84
4	0,75	0,97	0,04	0,061	3,50	0,032	1,83	15,25	0,98	2,80	-2,69
5	1,00	1,30	0,08	0,081	4,66	0,057	3,26	11,44	1,30	2,51	-2,56
6	1,25	1,62	0,13	0,102	5,83	0,089	5,09	9,15	1,63	2,21	-2,44
7	1,50	1,93	0,20	0,122	6,99	0,128	7,33	7,63	1,95	1,90	-2,33
8	1,75	2,25	0,29	0,142	8,16	0,174	9,97	6,54	2,28	1,58	-2,24
9	2,00	2,55	0,41	0,163	9,32	0,227	13,03	5,72	2,60	1,26	-2,18
10	2,20	2,79	0,52	0,179	10,25	0,275	15,76	5,20	2,86	1,01	-2,15

$$\alpha_o = 0,1788 \text{ рад} = 10,25^\circ$$

$$\alpha_k = \alpha_o + kt,$$

$$\alpha_k = 0,1788 - 0,08129 \cdot 0,75 = -0,1178 \text{ рад} = -6,75^\circ.$$

$$t = 2,2 \text{ с.}$$

$$k = (\alpha_k - \alpha_o) / t = (0 - 0,179) / 2,2 = -0,08129 \text{ с}^{-1}.$$

$x_7 y_7$  на кут

$\theta_7 = \theta_6 + \varphi_6 = 15,76 - 211,815 = -196,05^\circ$ . Показники розрахунків знесені до таблиці 3.7, а траєкторія – на рисунку 3.7.

Таблиця. 3.7. Виїзд з лівого маневру.

№ з/п	t, с	x <sub>i</sub> , м	y <sub>i</sub> , м	α, рад	α, град	φ, рад	φ, град	R, м	S, м	x, м	y, м
1	0	0	0	0,179	10,25	0	0	5,20	0	1,00	-2,18
2	0,25	0,32	0,0646	0,159	9,09	0,004	0,20	5,87	0,33	0,68	-2,15
3	0,50	0,63	0,1406	0,138	7,92	0,014	0,81	6,73	0,65	0,35	-2,14
4	0,75	0,95	0,2257	0,118	6,76	0,032	1,83	7,89	0,98	0,03	-2,14

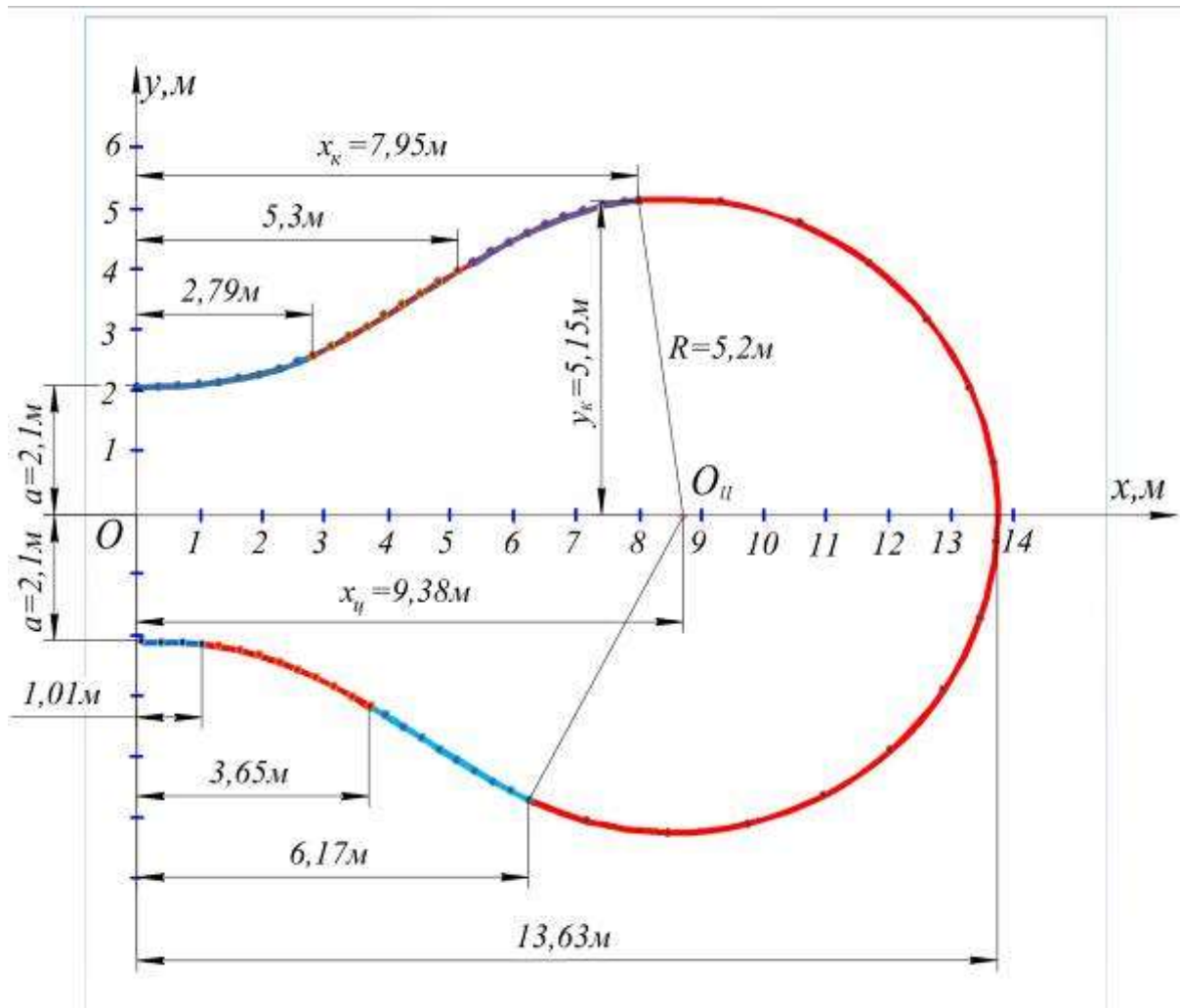


Рис. 3.8. Складний маневр розвороту петлеподібного на прикладі ПА:  
МТЗ-80+КРН-4,2.

### 3.2. Результат отримання кривих елементів складного розвороту петлею на МТЗ-80 з використання супутникової навігації системи сучасного землеробства.

В результаті використання супутникового сигналу ми отримали криву дослідів трек 1: *В'їзд в лівий маневр та виїзд з лівого маневру.*

$$v = 1,472 \text{ м/с}; \ell = 1,27 \text{ м}; L = 2,63 \text{ м}; R_{\min} = 5,0; \text{ шлях } S = vt \cdot \alpha_0 = 0$$

$$\alpha_{1\text{колiс}} = 180^\circ / 25 = 7,2^\circ = 0,1256 \text{ рад.}, k = (\alpha_k - \alpha_0) / t = 0,0606 / 12,1 = 0,00501 \text{ с}^{-1}$$

$$\alpha_k = \alpha_1 (\ell / L) = 0,1256 \cdot (1,27 / 2,63) = 0,0606 \text{ рад} = 3,47^\circ. t = 12,1 \text{ с.} \quad \text{Показники}$$

розрахунків знесені до таблиці 3.8-3.9, а сумісні траєкторії – на рисунку 3.9.

Таблиця 3.8. В'їзд в лівий маневр.

№ з/п	$t, c$	$x_i, m$	$y_i, m$	$\alpha, \text{рад}$	$\alpha, \text{град}$	$\varphi, \text{рад}$	$\varphi, \text{град}$	$R, m$	$S, m$	$x, m$	$y, m$
1	0	0	0	0	0	0	0	$\infty$	0	0	0
2	1,34	1,98	0,01	0,0067	0,39	0,005	0,30	188,46	1,98	1,98	0,01
3	2,69	3,96	0,05	0,0135	0,77	0,021	1,20	94,23	3,96	3,96	0,05
4	4,03	5,93	0,15	0,0202	1,16	0,047	2,71	62,82	5,94	5,93	0,15
5	5,38	7,91	0,33	0,0270	1,55	0,084	4,82	47,11	7,92	7,91	0,33
6	6,72	9,87	0,60	0,0337	1,93	0,131	7,52	37,69	9,90	9,87	0,60
7	8,07	11,81	0,99	0,0404	2,32	0,189	10,84	31,41	11,87	11,81	0,99
8	9,41	13,71	1,51	0,0472	2,70	0,257	14,75	26,92	13,85	13,71	1,51
9	10,76	15,57	2,20	0,0539	3,09	0,336	19,26	23,56	15,83	15,57	2,20
10	12,10	17,36	3,07	0,0607	3,48	0,425	24,38	20,94	17,81	17,36	3,07

Таблиця 3.9. Виїзд з лівого маневру.

№ з/п	$t, c$	$x_i, m$	$y_i, m$	$\alpha, \text{рад}$	$\alpha, \text{град}$	$\varphi, \text{рад}$	$\varphi, \text{град}$	$R, m$	$S, m$	$x, m$	$y, m$
1	0	0	0	0,061	3,48	0	0	20,94	0	17,36	3,07
2	1,34	1,97	0,20	0,054	3,09	0,089	5,12	23,56	1,98	19,07	4,06
3	2,69	3,91	0,56	0,047	2,70	0,168	9,63	26,92	3,96	20,70	5,19
4	4,03	5,83	1,05	0,040	2,32	0,236	13,54	31,41	5,94	22,24	6,43
5	5,38	7,72	1,65	0,034	1,93	0,294	16,86	37,69	7,92	23,72	7,75
6	6,72	9,58	2,34	0,027	1,55	0,341	19,56	47,11	9,90	25,12	9,15
7	8,07	11,41	3,10	0,020	1,16	0,378	21,67	62,82	11,87	26,48	10,60
8	9,41	13,23	3,91	0,013	0,77	0,404	23,18	94,23	13,85	27,80	12,08
9	10,76	15,03	4,75	0,007	0,39	0,420	24,08	188,46	15,83	29,09	13,59
10	12,10	16,83	5,59	0	0	0,425	24,38	$\infty$	17,81	30,38	15,10

Таблиця 3.10. Аналіз координат двох кривих маневрів МТЗ-80 з супутниковою навігацією

N з/п	$x_{ie}, \text{ м}$	$t, \text{ с}$	$x_{it}, \text{ м}$	$x, \text{ м}$	$y_{ie}, \text{ м}$	$y_{it}, \text{ м}$	$y, \text{ м}$	$(x_{ne} - x)^2$	$(y_{ne} - y)^2$	$\sigma_x$	$\sigma_y$
<i>Трек 1. Вхід в лівий поворот і вихід з лівого повороту.</i>											
1.	9,00	6,13	9,00	16,076	0,748	0,466	5,393	50,07	24,275	8,83	5,72
2.	17,40	12,15	17,43		3,42	3,099		1,83	5,26		
3.	24,38	18,12	23,64		8,57	8,40		57,214	9,042		
4.	29,81	24,14	30,31		15,77	15,00		202,61	92,29		

З даної таблиці можна стверджувати, що система супутникової навігації показала хорошу точність та достатню відповідність кривих маневрів одно одній з визначенням середньоквадратичного числа.

### **3.3. Отримання кривої траєкторії елементів складного розвороту на прикладі тягача МТЗ-80.**

Після виїзду з контрольного майданчика були отримані дані: швидкість переміщення тягача, радіус маневру, кут відхилення коліс від горизонталі та рами трактора. В результаті проїзду енергетичного засобу ми отримали три криві простих елементів складного розвороту: в'їзд та виїзд з лівого маневру та в'їзд в правий маневр на ґрунті (рис. 3.10). Координати дослідних траєкторій на полі систематизовані до таблиці 3.11. з вихідними параметрами маневру:  $v = 1,2 \text{ м/с}$ ;  $R_{\min} = 5,2$ ;  $t = 8,9 \text{ с}$ ;  $S = 10,65 \text{ м}$ ;  $k = \pm 0,08942 \text{ с}^{-1}$ .



Рис. 3.10. – Отримані на ґрунті криві за допомогою креслярки.

Таблиця 3.11. Значення вимірюваних кривих в полі теодолітом Т30

№ з/п	Кут між радіусами-векторами сусідніх вішок	Номери точок	Відлік	Кут напів-прийому	Сер. з-ня кута
1	2	3	4	5	6
1.	$\eta_1$	т. 1 (т. О)	ЛН 6° 45'	6°94'	6°92'
		т. 2	ЛН 359° 55'		
		т. 2	ПН 179° 36'	6°90'	
		т. 1	ПН 186° 30'		
2.	$\eta_2$	т. 1 (т. О)	ЛН 6° 45'	12°96'	12°985'
		т. 3	ЛН 353° 49'		
		т. 3	ПН 173° 29'	13°01'	
		т. 1	ПН 186° 30'		
3.	$\eta_3$	т. 1 (т. О)	ЛН 6° 45'	17°40'	17°585'
		т. 4	ЛН 349° 05'		
		т. 4	ПН 168° 53'	17°77'	
		т. 1	ПН 186° 30'		

4.	$\eta_4$	т. 1 (т. О)	ЛН 6° 45'	26°95'	26°965'
		т. 5	ЛН 339° 50'		
		т. 5	ПН 159° 32'	26°98'	
		т. 1	ПН 186° 30'		
5.	$\eta_5$	т. 1 (т. О)	ЛН 6° 45'	33°45'	33°67'
		т. 6	ЛН 333° 00'		
		т. 6	ПН 152° 41'	33°89'	
		т. 1	ПН 186° 30'		
6.	$\eta_6$	т. 1 (т. О)	ЛН 6° 45'	39°75'	39°765'
		т. 7	ЛН 326° 70'		
		т. 7	ПН 146° 52'	39°78'	
		т. 1	ПН 186° 30'		
7.	$\eta_7$	т. 1 (т. О)	ЛН 6° 45'	45°90'	45°925'
		т. 8	ЛН 320° 50'		
		т. 8	ПН 140° 40'	45°95'	
		т. 1	ПН 186° 30'		

Результат досліджень - нами були отримані два маневри: теоретичний та на полі, які необхідно сумістити та обрахувати середньквдратичне відхилення (таблиця 3.12).

Таблиця 3.12. Польові координати на ґрунті МТЗ-80.

$N$ $з/n$	$\rho_i$ , М	$x_{iексп}$ , М	$y_{iексп}$ , М	$x_{iТ}$ , М	$y_{iТ}$ , М	$x$ , М	$y$ , М	$(x_{не} - x)^2$	$(y_{не} - y)^2$	$\sigma_x$	$\sigma_y$
1.	13,11	0	0	0	0	4,987	2,85			2,44	1,56
2.	12,94	1,762	0,354	1,56	0,264			10,40	6,23		
3.	12,243	2,945	1,229	2,75	1,18			4,17	2,63		
4.	11,491	3,704	2,24	3,47	2,156			1,646	0,37		
5.	10,759	5,010	3,62	4,878	3,52			0,00	0,59		
6.	10,838	6,264	4,133	6,008	4,09			1,63	1,65		
7.	11,512	7,763	4,419	7,363	4,26			7,706	2,46		
8.	12,36	9,033	4,604	8,88	4,512			16,37	3,08		

Результатом порівняння двох маневрів координат  $x_{i_{експ}}$  і  $y_{i_{експ}}$  та  $x_{i_T}$  і  $y_{i_T}$  трактора МТЗ 80 є визначення параметру сигма:  $\sigma_x = 2,44$  м;  $\sigma_y = 1,56$  м.

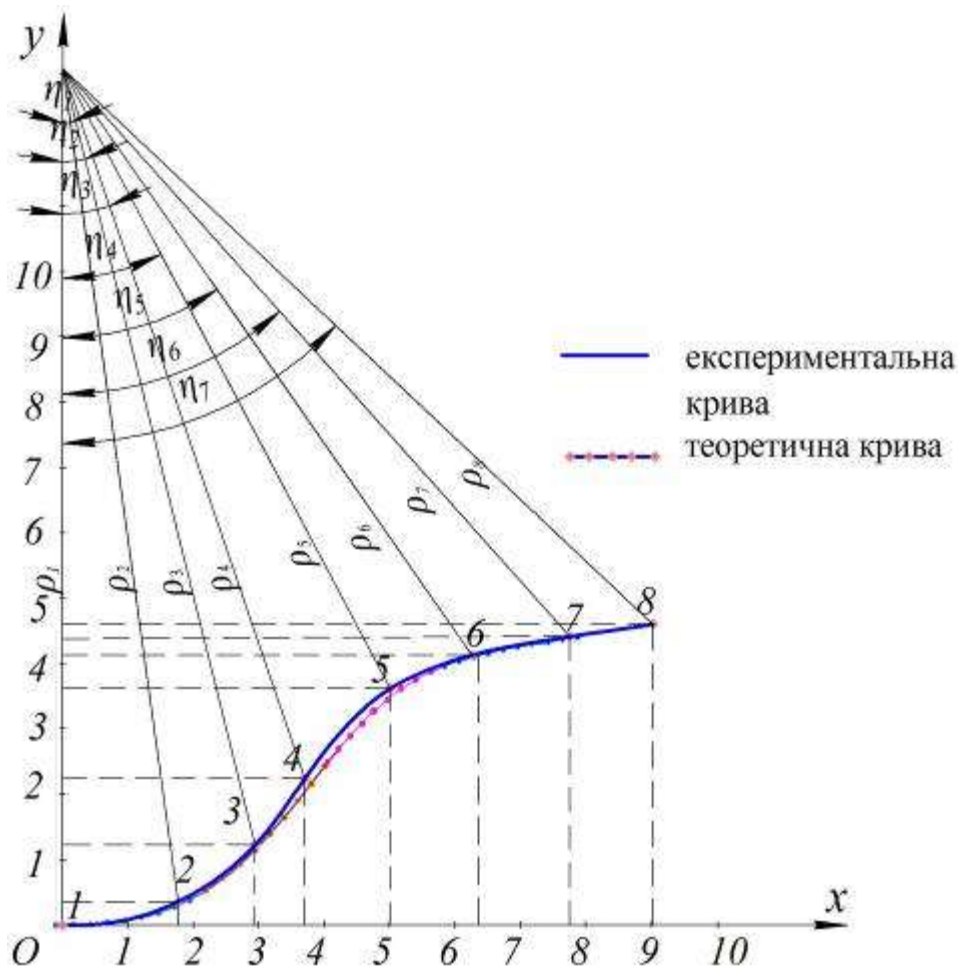


Рис. 3.12. – Сумісне зображення кривих центра ваги трактора МТЗ-80

$$v = 1,2 \text{ м/с}; R_{\min} = 5,2; t = 8,9 \text{ с}; S = 10,65 \text{ м};$$

З отриманих значень коефіцієнта сигма ми можемо сказати, що дослідна частина отримання траєкторії маневру в полі з використанням креслярки відповідає модельованій траєкторії центра ваги енергетичного засобу МТЗ-80 з достатньою відповідністю та сходиністю експериментальної кривої до теоретичної кривої криволінійного руху.

## ВИСНОВКИ

У магістерській роботі наведено нове вирішення наукового завдання, що виявляється в підвищенні ефективності використання машинно-тракторного агрегату з передніми керованими колесами шляхом удосконалення математичних рівнянь криволінійного руху для агрегатів. Це дозволило оптимізувати маневрові властивості на поворотах шляхом скороченням довжини переміщення розвороту, скороченням ширини розвортної полоси та збільшенням довжини гону. На основі проведених досліджень зроблені наступні основні висновки.

Для побудови траєкторії центра ваги польового агрегату криволінійного руху необхідні нові аналітичні рівняння, які враховують інтенсивність повороту керма, з подальшим використанням запропонованих алгоритмів для програмного забезпечення автоматичного водіння.

Згідно представленої методики експериментальної перевірки адекватності розробленої математичної моделі був змодельований петлевидний розворот трактора МТЗ-80 з культиватором-рослинопідживлювачем КРН-4,2 з визначенням вихідних параметрів для кожної з семи ділянок грушоподібного розвороту.

В результаті моделювання з використанням запропонованих алгоритмів математичної моделі нелінійного руху чотирьохколійної машини з передніми керованими колесами, був обґрунтований раціональний грушоподібний петлевидний розворот машинно-тракторного агрегату в складі трактора МТЗ-80 з культиватором-рослинопідживлювачем КРН-4,2 з визначенням параметрів для кожної ділянки розвороту.

В результаті моделювання та проведення польового експерименту відтворення теоретичної траєкторії центра ваги трактора МТЗ-80 на дослідних полях Сумського НАУ були експериментально отримані відтворені траєкторії лівого і правого поворотів (вхід і вихід) та проведена статистична оцінка на відповідність координат експериментальної траєкторії

координатам теоретичної траєкторії з вивченням середньоквадратичного відхилення:  $\sigma_x = 2,44$  м;  $\sigma_y = 1,56$  м.

Згідно розробленого методу спряження складних траєкторій криволінійного руху були змодельовані траєкторії центра ваги енергетичного засобу МТЗ-80 з передніми керованими колесами та експериментально відтворенні для ділянок входу в лівий поворот і виходу з лівого повороту з використанням супутникової навігаційної системи для експериментальної перевірки адекватності розробленої математичної моделі. Проведена статистична оцінка на відповідність координат експериментальної траєкторії автомобіля координатам теоретичної траєкторії, в результаті отримуємо: для треку 1 -  $\sigma_x = 8,83$  м,  $\sigma_y = 5,72$  м.

Експериментально відтворені траєкторії лівого повороту (вхід і вихід) показали повну ідентичність і достатню відповідність експериментальних з теоретичними координатами траєкторій, тим самим підтверджують достовірність математичної моделі нелінійного руху транспортного засобу з передніми керованими колесами у функції кута повороту остова трактора для ділянок входу в поворот і виходу з повороту для транспортного засобу.

Експериментально відтворені траєкторії лівого і правого поворотів (вхід і вихід) на тракторі МТЗ-80 показали повну ідентичність і достатню відповідність експериментальних і теоретичних траєкторій, тим самим підтверджують достовірність математичної моделі нелінійного руху чотирьохколійної машини з передніми керованими колесами у функції кута повороту остова трактора для ділянок входу в поворот і виходу з повороту для енергетичного засобу в польових умовах.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сіволапов В. Як підвищити продуктивність машинних агрегатів [Електронний ресурс] / Володимир Сіволапов // Agroexpert, Техніка, випуск №2(91). – 2016. – Режим доступу до ресурсу: <https://agroexpert.ua/ak-pidvisiti-produktivnist-masinnih-agregativ/>.
2. Точне землеробство по-американськи: впроваджувати інновації - (не)дорого? [Електронний ресурс]. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <http://agroportal.ua/ua/views/blogs/tochnoe-zemledelie-poamerikanski-vnedryat-innovatsii-ne-dorogo/>.]
3. Precision farming – відсікання зайвого. [Електронний ресурс] // Зерно - журнал сучасного агропромисловця. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.zerno-ua.com/journals/2019/yanvar-2019-god>.
4. Точне землеробство та управління землею онлайн: Agrohub оприлюднив масштабний звіт про інновації в агросекторі [Електронний ресурс]. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://landlord.ua/news/tochne-zemlerobstvo-ta-upravlinnia-zemleiu-onlain-agrohub-opryliudnyv-masshtabnyi-zvit-pro-innovatsii-v-agrosektori/>.
5. Точность – 2 сантиметра на поле в 100 га [Електронний ресурс] // Журнал сучасного агропромисловця "Зерно" – Режим доступу до ресурсу: <https://www.zerno-ua.com/journals/2011/fevral-2011-god/tochnost-2-santimetra-na-pole-v-100-ga>.
6. Точне землеробство: принцип роботи та перспективи [Електронний ресурс] // Стаття и матеріали. Технології. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <https://xn--80ajgpcpbhkds4a4g.xn--p1ai/articles/tochnoe-zemledelie/>.
7. Точне землеробство. Частина 1. Системи паралельного водіння. [Електронний ресурс]. – 2014. – Режим доступу до ресурсу: <https://gps-monitoring.com.ua/precision-farming-news-1.html>.
8. Гід по системам паралельного и автоматического водіння [Електронний ресурс]. – 2018. – Режим доступу до ресурсу:

<https://aggeek.net/ru-blog/gid-po-sistemam-parallelnogo-i-avtomaticheskogo-vozhdeniya?fbclid=IwAR3SE482B6CkQ1c3dJsRNrhVCwisJN9G5YcrSyD6qDwMHiolDoferBix4VI>.

9. Тест-драйв системи автоматичного водіння AgLeader [Електронний ресурс]. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <http://polymya-agro.by/news/test-drayv-sistemy-avtomaticheskogo-vozhdeniya-agleader>

10. Ласло, О. О., & Диченко, О. Ю. (2017). Використання технологій точного землеробства та рослинництва під час визначення екологічно стабільних територій для органічного виробництва. *Scientific Progress & Innovations*, (4), 47-49. <https://doi.org/10.31210/visnyk2017.04.08>

11. Арестов Т. Вдосконалення агротехніки та автоматизація робіт у полі [Електронний ресурс] / Тарас Арестов. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: <https://egritech.org/uk/korisna-informaciya/vdoskonalennya-agrotehniky-ta-avtomatyzacziya-robit-u-poli/>.

12. АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ І СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ Електронний посібник [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: [https://vukladach.pp.ua/MyWeb/manual/%D0%B5lektroenergetuka/Avtomotuzaciya a tehnologihnuh procesiv i systemu avtomatuhного keryvanna/Golovna/Golovna.htm](https://vukladach.pp.ua/MyWeb/manual/%D0%B5lektroenergetuka/Avtomotuzaciya%20tehnologij%20procisiv%20i%20sistemu%20avtomatizacii%20keryvanna/Golovna/Golovna.htm).

13. Механізація і автоматизація сільськогосподарського виробництва: Навчально-методичний посібник для самостійної роботи та лабораторно-практичних занять за кредитно-модульною системою організації навчального процесу для студентів економічного факультету/ М.М. Сенчук. – Біла Церква, 2010. – с. 206

14. Kalinin Ye. Особливості повороту шарнірно-зчленованого трактора / Ye. Kalinin, M. Kuskov, O. Bellorin-Herrera // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2022. – Т. 1 (67). – С. 21-33. – doi:<https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.1.021>.

15. Автопілот (Підрулька) Novator від ColDonAgro [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: <https://coldon-agro.com/autopilot>.
16. Автопилот на трактор Trimble Autopilot в Хмельницьком [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: <https://gps-group.com.ua/ru/avtopilot-dlya-traktora-trimble-autopilot.html>.
17. УНІВЕРСАЛЬНИЙ АВТОПІЛОТ FJ DYNAMICS З RTK СИГНАЛОМ. АВТОМАТИЧНЕ ВОДІННЯ НА ТРАКТОР, ДИВ ТЕХНІКУ [Електронний ресурс] // 2023 – Режим доступу до ресурсу: <https://euromag.biz/ua/p1489278737-universalnyj-avtopilot-dynamics.html>.
18. Універсальні рівняння траєкторії криволінійного руху чотирьохколісної машини / М. Я. Довжик, Б. Я. Татьянченко, О. О. Соларьов, Ю. В. Сіренко // Вісник ЖНАЕУ. – 2017. – № 1 (58), т. 1. – С. 202–210.
19. Довжик М. Я. Параметричні рівняння траєкторії неусталеного криволінійного руху у функції часу [Електронний ресурс] / М. Я. Довжик, Ю. В. Сіренко // Збірник тез доповідей XX Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" присвяченої 119-й річниці з дня народження академіка П.М. Василенка, (17-19 жовтня 2019 р.) / МОН України, Миколаївський національний аграрний університет. – Миколаїв : МНАУ, 2019. – С. 66-68.
20. Довжик М. Я. Криволінійний рух чотирьохколісної машини з використанням супутникової навігаційної системи [Електронний ресурс] / М. Я. Довжик, О. М. Калнагуз, Ю. В. Сіренко // Scientific Horizons. - 2020. - № 07 (92). - С.126-136
21. Довжик М. Я. Аналітичний спосіб визначення траєкторії криволінійного руху чотирьохколісної машини з передніми керованими колесами / М. Я. Довжик, Б. Я. Татьянченко, О. О. Соларьов, Ю. В. Сіренко // Інженерія природокористування. - 2017. - № 1. - С. 16-20. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Iprk\\_2017\\_1\\_5](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Iprk_2017_1_5).
22. Довжик М. Я. Графічний спосіб визначення траєкторії криволінійного руху чотирьохколісного трактора з передніми керованими

колесами / М. Я. Довжик, Б. Я. Татьянченко, О. О. Соларьов // Інженерія природокористування. - 2016. - № 1. - С. 6-9. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Iprk\\_2016\\_1\\_3](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Iprk_2016_1_3).

23. Melnik V. Analytical method of examining the curvilinear motion of a fourwheeled vehicle. / V. Melnik M. Dovzhyk, B. Tatyanchenko. O. Solarov. Yu. Sirenko // Eastern-European journal of enterprise technologies. Vol. 3, № 7 (87), (2017). P. 59-65.

24. Bulgakov, V., Pascuzzi, S. & Beloev, H. (2019, October). Theoretical Investigations of the Headland Turning Agility of a Trailed Asymmetric Implement-and-Tractor Aggregate. Agriculture, MDPI, *Open Access Journal*, 9(10), 1-11. doi: <https://doi.org/10.3390/agriculture9100224>

25. Bulgakov V. Theoretical Investigations of the Headland Turning Agility of a Trailed Asymmetric Implement-and-Tractor Aggregate [Електронний ресурс] / V. Bulgakov, S. Pascuzzi, H. Beloev // Agriculture, MDPI, Open Access Journal, vol. 9(10), pages 1-11, October. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: [file:///C:/Documents%20and%20Settings/User/%D0%9C%D0%BE%D0%B8%20%D0%B4%D0%BE%D0%BA%D1%83%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82%D1%8B/Downloads/agriculture-09-00224%20\(1\).pdf](file:///C:/Documents%20and%20Settings/User/%D0%9C%D0%BE%D0%B8%20%D0%B4%D0%BE%D0%BA%D1%83%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82%D1%8B/Downloads/agriculture-09-00224%20(1).pdf)

# ДОДАТКИ