

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

**До захисту**  
**Допускається**  
**Завідувач кафедри**

**Михайло ШУЛЯК**

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

за магістерським рівнем вищої освіти

на тему: «Дослідження впливу використання систем точного землеробства при  
русі МТА під час обробітку ґрунту»

Виконав:

\_\_\_\_\_

(підпис)

**Дмитро НЕСТЕРЕНКО**

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Група:

**СТЗ 2401-2М**

Науковий керівник:

\_\_\_\_\_

(підпис)

**Фаріда ХАРЧЕНКО**

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Рецензент:

\_\_\_\_\_

(підпис)

**Михайло ДУМАНЧУК**

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

**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

**Михайло ШУЛЯК**

“\_\_” вересня 2024 року

---

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Дмитро НЕСТЕРЕНКО

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Дослідження впливу використання систем точного землеробства при русі МТА під час обробітку ґрунту».

2. Керівник кваліфікаційної роботи: Фаріда ХАРЧЕНКО, к.т.н., доцент.

3. Строк подання здобувачем роботи: “1” листопада 2025 року.

4. 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 проєкту (роботи).

5. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ. Розділ 1. Аналіз систем точного землеробства мта під час руху на полі; Розділ 2. Послідовність проведення моделювання авторозворотів за методиками автоматизованих алгоритмів; Розділ 3. Отримані значення дослідження та їх обробка. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

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

Керівник роботи:

(підпис)

Фаріда ХАРЧЕНКО

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Завдання прийняв до виконання:

(підпис)

Дмитро НЕСТЕРЕНКО

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Дата отримання завдання «\_\_» вересня 2024 року

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів	Примітка
1.	Збір інформації про діяльність господарства	до 02.08.2025 р.	
2.	Аналіз літературних джерел з обраної тематики	до 16.08.2025 р.	
3.	Складання плану роботи	до 21.08.2025 р.	
4.	Написання вступу	до 24.08.2025 р.	
5.	Підготовка розділу «Розділ 1. Аналіз систем точного землеробства мта під час руху на полі».	до 30.08.2025 р.	
6.	Підготовка розділу «Розділ 2. Послідовність проведення моделювання авторозворотів за методиками автоматизованих алгоритмів».	до 14.10.2025 р.	
7.	Підготовка розділу «Розділ 3. Отримані значення дослідження та їх обробка».	до 15.10.2025 р.	
8.	Написання висновків	до 25.10.2025 р.	
9.	Подання роботи на перевірку унікальності до експертної ради факультету	до 01.11.2025 р.	
10.	Подання роботи на рецензування	до 07.11.2025 р.	
11.	Подання роботи до попереднього захисту	до 14.11.2025 р.	

Керівник роботи:

\_\_\_\_\_

(підпис)

Фаріда ХАРЧЕНКО

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Здобувач:

\_\_\_\_\_

(підпис)

Дмитро НЕСТЕРЕНКО

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

## АНОТАЦІЯ

**Нестеренко Дмитро Володимирович** «Дослідження впливу використання систем точного землеробства при русі МТА під час обробітку ґрунту»

Кваліфікаційна (магістерська) робота на здобуття ступеня магістра із спеціальності «Агроінженерія» за освітньо-професійною програмою «Системи точного землеробства» зі спеціальності 208 Агроінженерія. Сумський національний аграрний університет, Суми, 2025, 58 с.

Кваліфікаційна (магістерська) робота складається з трьох розділів, вступу, висновків, списку використаних джерел із 30 найменувань, додатків та слайдів презентації.

У першому розділі кваліфікаційної роботи проведений аналіз літературних джерел наукових статей вітчизняних та закордонних науковців про значення систем точного землеробства для автоматизації руху машинно-тракторних агрегатів (МТА), та як один із шляхів підвищення продуктивності використання МТА під час технологій вирощування сільськогосподарських культур. Переваги та недоліки систем автопілотування та паралельного водіння агрегата, та запровадження новітніх технологій автоматичного водіння культиваторів СТЕКЕТІ в складі МТА та їх переваги.

У другому розділі кваліфікаційної роботи досліджено вплив видів маневрів на маневрованість, поворотливість енергетичного засобу та беспосередньо вплив кінематичних параметрів криволінійного руху агрегату на продуктивність його використання під час експлуатації. Виведення математичних залежностей для маневрів енергетичного засобу під час руху по кривим траєкторіям надасть можливість подальшого використання їх в системах автоматизації рухом. Були розроблені математичні рівняння переміщення центру ваги енергозасобу з передніми колесами керування під час входу або виходу з повороту, які дають можливість досліджувати та моделювати в лабораторних умовах всі види поворотів за допомогою

табличного процесора Мікрософт Excel. Особливо увага присвячена реалізації маневру енергетичного засобу з використанням систем точного землеробства в польових умовах та проведенню відтворення траєкторії маневру на поверхні поля з використанням спеціального обладнання. Перевірку отриманих експериментальних координат маневрів енергозасобу передбачено методами статистичної обробки.

В третьому розділі кваліфікаційної роботи наведений результат моделювання петлевидного складного маневру машинно-тракторного агрегату в складі енергозасобу МТЗ-80 та просапного культиватора КПК-4,2. Складний маневр грушоподібного розвороту складається з семи простих ділянок і для кожної ділянки за допомогою виведених математичних залежностей отримані координати центра ваги енергетичного засобу для маневру входу (виходу) з лівого (правого) повороту з зображенням кожної ділянки у власній системі координат. Після спряження всіх ділянок був отриманий складний змодельований петлевидний розворот даного машинно-тракторного агрегату. Особливе значення приділене дослідженню траєкторій правого повороту входу та виходу енергозасобу з використанням супутникової навігаційної системи технологій точного землеробства. Статистична оцінка отриманих координат траєкторій дослідження та моделювання проведена з визначенням середньоквадратичного відхилення.

Розроблений алгоритм моделювання різних видів траєкторії криволінійного руху енергетичного засобу з передніми колесами керування створює можливість розробки програмного забезпечення для повної автоматизації технологічних операцій машинно-тракторних агрегатів.

**Ключові слова:** траєкторія, маневр, машинно-тракторний агрегат, криволінійний рух, енергетичний засіб, супутникова навігаційна система, моделювання, відтворення, математичні залежності, кінематичні параметри, продуктивність.

## ABSTRACT

**Nesterenko Dmytro Volodymyrovych** “Study of the Influence of Precision Farming Systems on MTA Movement During Soil Tillage”

Master’s Qualification Thesis for obtaining the Master’s degree in the specialty “Agroengineering” within the educational and professional program “Precision Farming Systems”, specialty 208 Agroengineering. Sumy National Agrarian University, Sumy, 2025, 58 p.

The master’s thesis consists of three chapters, an introduction, conclusions, a list of 30 references, appendices, and presentation slides.

In the first chapter, an analysis of literature sources and scientific publications by domestic and foreign researchers is presented, focusing on the importance of precision farming systems for automating the movement of machine-tractor units (MTAs) and their role in improving the efficiency of agricultural production processes. The advantages and disadvantages of autopilot and parallel driving systems are examined, as well as the implementation of modern automatic steering technologies for STEKETI cultivators as part of the MTA, along with their benefits.

The second chapter investigates the influence of different maneuver types on the maneuverability and turning capability of the power unit, as well as the impact of kinematic parameters of curvilinear movement on its operational productivity. Derived mathematical relationships describing the maneuvers of the power unit during curvilinear motion enable their further use in automated steering systems. Mathematical equations were developed to describe the movement of the power unit’s center of gravity with front steering wheels during entry into and exit from a turn. These equations make it possible to study and model various types of turns under laboratory conditions using Microsoft Excel. Special attention is given to the implementation of maneuvers using precision farming technologies in field conditions and to reproducing trajectory paths using dedicated equipment. Experimental maneuver coordinates were validated using statistical analysis methods.

The third chapter presents the results of modeling a loop-shaped complex maneuver of an MTA consisting of an MTZ-80 tractor and a KPK-4.2 row-crop cultivator. The complex pear-shaped turn consists of seven simple segments, and for each segment, the coordinates of the power unit's center of gravity were obtained using the derived mathematical relationships for left and right turn entry/exit maneuvers, with each segment plotted in its own coordinate system. After combining all segments, a complete model of the loop-shaped turn of the given MTA was obtained. Special attention is given to the study of the right-turn entry and exit trajectories of the power unit in field conditions using a satellite navigation system of precision farming technologies. A statistical evaluation of the obtained trajectory coordinates from both simulation and field experiments was carried out by determining the root mean square deviation.

The developed algorithm for modeling various types of curvilinear trajectories of a power unit with front-wheel steering enables the creation of software tools for full automation of technological operations performed by machine-tractor units.

**Keywords:** trajectory, maneuver, machine-tractor unit, curvilinear motion, power unit, satellite navigation system, modeling, reproduction, mathematical relationships, kinematic parameters, productivity.

# ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	
<b>РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СИСТЕМ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА МТА ПІД ЧАС РУХУ НА ПОЛІ</b> .....	
1.1. Значення систем точного землеробства.....	
1.2. Системи автоводіння культиваторів.....	
<b>РОЗДІЛ 2. ПОСЛІДОВНІСТЬ ПРОВЕДЕННЯ МОДЕЛЮВАННЯ АВТОРОЗВОРОТІВ ЗА МЕТОДИКАМИ АВТОМАТИЗОВАНИХ АЛГОРИТМІВ</b> .....	
2.1. Характеристики маневру.....	
2.2. Отримання математичних залежностей характеристик $x$ та $y$ координат центру ваги енергозасобу для маневрів.....	
2.3. Моделювання різних видів маневрів енергозасобу в лабораторних умовах.....	
2.3.1. Алгоритм проведення експериментальних досліджень на майданчику поля з застосуванням сигналу з супутників.....	
2.3.2. Алгоритм відтворення траєкторії маневру енергозасобу на поверхні поля.....	
2.4. Обчислення відтворених координат експерименту кривої.. ..	
<b>РОЗДІЛ 3. ОТРИМАНІ ЗНАЧЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБРОБКА</b> .....	
3.1. Створення математичних спряжених координат теоретичного складного маневру агрегату: енергозасобу МТЗ-80 та КПК-4,2.....	
3.2. Застосування сигналу з супутників технології навігаційних систем для відображення криволінійного розвороту польового агрегату.....	
3.3. Розрахунок криволінійної траєкторії складеного довільного маневру на прикладі екнергозасобу МТЗ-80.....	
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....	
<b>ДОДАТКИ</b> .....	

## ВСТУП

### Актуальність теми.



Сучасний розвиток сільського господарства неможливий без впровадження інноваційних ресурсозберігаючих технологій,

які здатні вивести аграрну галузь на якісно новий рівень. За умов належної державної підтримки агропромислового сектору це дозволить вітчизняним сільськогосподарським виробникам стати конкурентоспроможними на міжнародному ринку.

Сільськогосподарський сектор зараз переживає значну трансформацію. І ця зміна викликана впровадженням методів точного землеробства. Точне землеробство (Precision Farming) є єдиною з найбільших інноваційних тенденцій в аграрному секторі. Воно стало іншим інструментом для підвищення врожайності, зменшення витрат і екологічного впливу на землю. Сучасні технології, такі як дрони, супутникові бази, сенсори та системи автоматизації, відкривають нові можливості для фермерів і агропідприємств, дозволяючи приймати рішення на основі точних даних.

Одним із ключових елементів точного землеробства є використання безпілотних літальних апаратів (дронів) і супутникових зображень. Вони можуть відстежувати стан полів у реальному часі, отримувати дані про вологість, температуру підстави, наявність шкідників або захворювань. За допомогою таких даних фермери можуть прийняти обґрунтовані рішення щодо поливу, удобрення та захисту рослин.

Встановлені на полях датчиків постійного моніторингу стану ґрунту і рослин. Вони фіксують рівень вологості, кислотності, насиченості ґрунту поживними речовинами. Інформація з сенсорів передається на центральний комп'ютер, де її аналізують. Це дозволяє уникати сильного використання

добрив і води, а також передбачати потребу додаткових заходів із догляду за рослинами.

Технології автоматизації здійснюють ключову роль у точному землеробстві. Наприклад, системи автоматичного поливу можуть регулювати кількість води в залежності від потреб рослин, що значно знижує витрати води. Автономні трактори можуть сіяти, обприскувати або збирати врожай з точністю до сантиметрів за допомогою GPS-навігації.

Великого обсягу інформації, зібраної з полів, обробляється за допомогою спеціальної програми. На основі аналізу даних можна передбачити врожайність, підібрати оптимальні строки сівби або прогнозувати шкідників. Це дозволяє мінімізувати ризики та планувати ефективну стратегію господарювання.

Перевагами впровадження точного землеробства є:

Завдяки точному контролю над поверхневою ділянкою поля, аграрії можуть зосередити ресурси на найпродуктивніших ділянках і скоротити втрати на меншпродуктивних. Впровадження сенсорів і система прогнозування дозволяє визначити найбільш сприятливі умови для сівби та збору врожаю.

Однією з основних переваг точного землеробства є економія ресурсів, таких як вода, добрива та засоби захисту рослин. Наприклад, системи автоматичного поливу допомагають зменшити витрати води, подаючи її разом у необхідний момент і лише на ті ділянки, які ці потребують. Це не тільки економити витрати, але й зменшує негативний вплив на навколишнє середовище. За допомогою точного дозування добрив і пестицидів можна мінімізувати їх вплив на екосистему.

Зменшення кількості проходів техніки полем, зменшує загальний час роботи, а також споживання дизельного пального на 10-15%, залежно від розміру поля. Опитування, проведене в Північній Дакоті, показало, що у результаті використання систем автоматичного керування було зекономлено майже 1870 л пального.

Точне землеробство дозволяє застосовувати технології GPS та датчиків для більш точного планування та виконання польових робіт. Це може зменшити перекриття та перекося при обробці землі, і сприятиме збільшенню продуктивності.

Точне землеробство - це майбутнє аграрного сектора. Воно дозволить ефективніше використовувати ресурси, підвищувати врожайність та зменшувати негативний вплив на довкілля. Хоча впровадження цих технологій може бути складним і витратним, результати від їх використання виправдовують витрати, створюючи нові можливості для аграріїв усіх рівнів.

### **Аналіз стану наукової розробки проблеми.**

На основі аналізу оброблених наукових джерел встановлено, що проблема автоматизованого керування тракторами з використанням систем точного землеробства й досі є однією з ключових у сучасному аграрному машинобудуванні.

Залишається актуальною потреба у вивченні лінії руху трактора під час виконання розворотів у процесі технологічних операцій, оскільки це безпосередньо пов'язано зі зниженням непродуктивних енергетичних витрат і збереженням фізико-механічних властивостей ґрунту. Оптимально спроектовані траєкторії руху машинно-тракторного агрегату сприяють підвищенню економічності роботи польового агрегату.

Одним із значних резервів підвищення ефективності роботи є скорочення холостого ходу, величина якого визначається схемою руху МТА, а також особливостями його характеристик, а отже, і зменшення зайвих енергетичних витрат за рахунок удосконалення маневрів агрегату під час розворотів.

### **Мета дослідження.**

Підвищення показників ефективності використання машинно-тракторного агрегату при вирощуванні культур сільськогосподарського призначення за рахунок використання систем точного землеробства (супутникової навігаційної системи) під час моделювання маневрів енергетичного засобу.

### **Об'єкт дослідження.**

Криволінійний процес переміщення енергетичного засобу з передніми колесами керування.

### **Предмет дослідження.**

Траєкторія маневрів криволінійного переміщення енергетичного засобу з передніми колесами керування.

### **Завдання дослідження.**

- провести аналіз сучасних наукових літературних джерел вітчизняних і закордонних науковців, які описують криволінійний рух польового агрегату математичними залежностями;

- розробити аналітичні залежності криволінійного руху енергетичного засобу з передніми керованими колесами для ділянок входу в поворот і виходу з повороту з застосуванням на практиці;

- розробити методику проведення досліджень та провести відтворення змодельованих теоретичних маневрів енергетичного засобу в польових умовах з використанням супутникової навігаційної системи для підтвердження придатності застосування розроблених математичних залежностей криволінійного руху на практиці.

### **Методи дослідження.**

Під час теоретичних досліджень застосовувалися методи системного й структурного аналізу та математичної статистики, що ґрунтувалися на моделюванні нелінійного руху польових агрегатів із використанням положень теоретичної механіки, теорії машин, а також криволінійного руху.

Експериментальна частина роботи виконувалася як у лабораторних, так і в польових умовах відповідно до чинних стандартів і розроблених методик планування експерименту.

Моделювання із застосуванням розроблених алгоритмів автоматичного керування рухом польових агрегатів та подальша статистична обробка експериментальних даних здійснювалися на персональному комп'ютері з

використанням систем комп'ютерної графіки та програмного забезпечення Microsoft Excel.

### **Структура та обсяг роботи.**

Кваліфікаційна (магістерська) робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 30 найменувань, 6 додатків та слайдів презентації. Повний обсяг роботи викладено на 58 сторінках комп'ютерного тексту, в тому числі 21 рисунку, 10 таблиць.

# РОЗДІЛ 1

## АНАЛІЗ СИСТЕМ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА МТА ПІД ЧАС РУХУ НА ПОЛІ

### 1.1. Значення систем точного землеробства.



У сучасному аграрному виробництві дедалі ширше впроваджуються передові технології, що спрямовані на спрощення та збільшення показника ефективності роботи машинних сільськогосподарських агрегатів. Однією з таких розумних технологій є керування рухом техніки за допомогою телекомунікаційних супутників. Впровадження подібних систем доцільне переважно на великих площах полів із масштабним виробництвом. Застосування навігації з супутників при керуванні енергетичним засобом є складовою точного землеробства, що сприяє заощадженню пального та зниженню витрат на собівартість продукції. Система забезпечує можливість наочного позначення паралельних проходів агрегату як по прямих, так і по криволінійних заданих лініях, навіть на пересіченій місцевості. Перед початком роботи тракторист задає робочий розмір агрегату по ширині, після чого система створює можливості виконувати обробку поля навіть за складних погодних умов, за умов обмеженої видимості або в нічний час.

У сучасних умовах мінливості точність стає вирішальним чинником для прибуткового ведення господарства. Сільгоспвиробники все частіше впроваджують автопілотування, секційний контроль, технологічні колії на випадок збоїв сигналів з супутників. Такий підхід допомагає заощадити структуру ґрунту і забезпечує рівномірні та одночасні сходи рослин.

Система супутникового ведення дає змогу уникати необроблених частинок полів, що заощаджує економію не лише пального та часу, а й отрутохімікатів, насіння та поживних речовин. Завдяки автоконтролю напрямку переміщення агрегату тракторист може сконцентруватися на роботі знаряддя чи агромашини, не відволікаючись на керування. Це вдосконалює комфортні умови під час роботи оператора та водночас сприяє зростанню його продуктивності праці.

За даними Міжнародної асоціації по боротьбі з голодом (FAO), в Україні технології розумного землеробства вже охоплюють близько 8,4 млн. гектарів - це приблизно 45% площ, що обробляються малими фермерами та аграрними підприємствами. Експерти зазначають, що ще близько 3,8 мільйонів гектарів мають можливості для втілення таких технологій у майбутньому.

Відповідно до результатів опитування п'ятдесяти украгропідприємств різного масштабу – від мікро-малих до середніх і великих агрокомплексів – можна сформулювати кілька ключових напрямів реалізації високих технологій на вітчизняній аграрній платформі (рис. 1.1.).



**Рис. 1.1. Керування агроенергозасобами за допомогою автопілотів.**

У сфері управління агротехнікою найбільш розповсюдженими є використання автопілотних систем. Вони гарантують ведення трактора або комбайна за заданою траєкторією без пильного контролю оператора, що істотно підвищує точність обробітку агроплощ і зменшує перекриття чи повторного

проходження однієї ділянки на 5-10%. Згідно з результатами дослідження, такі системи втілені на 80% досліджених підприємств (рис.1.2).



**Рис. 1.2. Використання складових систем розумного землеробства [1].**

Одним із суттєвих напрямів точного землеробства є система навігаційного паралельного водіння. Саме з облаштуванням на енергозасоби, комбайни та іншу самохідну агротехніку пристроїв, засобів для паралельного керування починається втілення технологій точного сільського господарства.

Це обладнання поділяють на два види (рис.1.3.):

- курсопоказчики (агромаршрутизатор) - для агромашин;
- автопілоти (самоуправління) - для автоведення технікою.

Сучасні фермери прагнуть придбати тракторні маршрутизатори, які гарантують максимальну надійну точність і повне суміщення із їхнім тракторним парком. Автопілотні системи з RTK-коригуванням реалізують точність руху до 20-25 мм між проходами, що має кардинальне значення для прецизійного механічного обробітку ґрунту та висівання культур. Серед найбільш актуальних рішень – курсопоказчики або агромаршрутизатори для тракторів, які дозволяють ефективно точно розумітися в полі та миттєво коригують напрямок ведення агрегату.

Курсопоказчик на енергозасіб - це пристрій, який допомагає точно слідувати агротехнікою під час проведення етапів польових робіт (висівання,

обприскування, обробки ґрунту). Він надає точність ходу в межах 100-150 міліметрів між рядами при роботі на базі безоплатного у вільному доступі сигналу від супутників. За потреби можна вдосконалити точність до 20 мм завдяки платним системам коригування, однак у більшості випадків це не є необхідним, адже вручну утримати такий рівень точності складно.

Стандартна комплектація курсопоказчика для агротехніки зазвичай містить: ДЖНСС-приймач- для встановлення координат знаходження техніки; дисплей (контролер) із встановленими програмними засобами для агромаршрутизації; кріплення або ДОК-станцію для дисплея та антени; кабелі електричні.



**Рис. 1.3. Загальний вигляд систем паралельного ведення [3].**

Основна різниця між курсопоказчиком різних моделей полягає в: точності роботи антени, якості дисплея та ступеня його захисту.

Наприклад, професійний комплект агронавігації ГЕОТРЕК включає ДЖНСС-приймач із точністю 150-200 мм на безоплатному сигналі та водо- й пилозахисний семи-дюймовий екран. Економна версія має аналоговий приймач, але укомплектована планшетом із стандартним рівнем захисту.

Наступним, більш досконалим рівнем систем паралельного ведення є автопілоти (самоуправління). Автопілотування для трактора - це система, що

забезпечує автоматичне або напівавтоматичне координування техніки, зводячи участь тракториста у водінні до мінімуму. Аналогові системи працюють на базі сигналу з супутнику (ДЖНСС), РТК-корекції та високоточної механіки, що забезпечує зберігання прямого курсу ходу. Його головний пріоритет - висока точність слідування заданому курсу, включно з автоманеврами на краях поля, що недоступно для простих курсопоказчиків. Така точність реалізується завдяки впровадженню електричної або гідросистеми кермового управління, яка веде енергозасіб відповідно до РТК-коригуванню, що надходить від базової ретрансляторної станції. Під час роботи на вільному супутниковому сигналі точність руху автомат-пілота подібна до курсопоказчика, проте з перевагою автореалізації маневрів і розворотів.

Автопілот на енергетичний засіб складається з таких основних компонентів:

- ДЖНСС-приймач - супутниковий модуль, який визначає точне координування трактора;
- РТК-сигнал - система коригування, що надає точність до 25 мм за допомогою базової приймально-передавальної станції або мобільного з'єднання;
- контролювач автопілотування - обробляє навігаційні дані та кермує напрямком ходу агромашини;
- екран (дисплей) - застосовується оператором для моделювання маршрутів і контролю за реалізацією робіт у реальному часі;
- кермовий привід - електричний або гідравлічний кермовий механізм, який безпосередньо керує поворотами коліс.

Системи автопілотування, зокрема для колісних машин МТЗ, а також універсальні маршрутизатори, ефективно функціонують із іншими моделями техніки. Така технологія агронавігації реалізує точне керування агромашиною і дозволяє точно рухатися заданим маршрутом навіть на великих площах полів.

Система самоуправління (автопілотування) має свої плюси:

*-точність і сталість роботи.* Впровадження автомат-пілота на енергозасобі суттєво зберігає витрати завдяки точному дотриманню траєкторії ходу під час виконання польових робіт. Технології навігації гарантують високу точність ведення, що є особливо необхідним під час висівання, розпилення та внесення поживних речовин;

*-комфорт і простота експлуатації.* Новітні автопілоти та маршрутизатори устатковані зрозумілим інтерфейсом, який легко освоїти. Робота агрегату з автопілотуванням вимагає мінімального долучення оператора, перемикаючи увагу на контроль якості виконання завдань;

*-широкий спектр рішень.* Існує можливість підібрати автопілот згідно до специфічних потреб господарства – від простого курсопоказчика до повнофункціональної системи з автопідрулюванням. Опція підрульовки гарантує плавне маневрування, що особливо актуально на нерівних або складних за формою полях;

*-універсальність.* Системи агронавігації відповідає широкому діапазону агрегатів, у тому числі для моделей МТЗ та інших брендів. Новітні агронавігатори легко вбудовуються з наявним обладнанням, архівують дані та моніторять процеси в реальному часі;

*-заощадження ресурсів і збільшення продукції.* Впровадження автопілотів сприяє раціональній витраті пального, насіння і поживних речовин. Придбання агронавігатора для агрегату – це інвестиція в довгострокову економію та стабільне підвищення ефективності виробництва завдяки точним проходам і відсутності перекриттів;

Робота системи автомат-пілота здійснюється за певною послідовністю дій:

- спершу трактор розташовують на початкову точку ділянки;
- далі обирають режим ходу – прямолінійний або по контуру;
- якщо планується хід по кривій траєкторії, перший прохід реалізує тракторист, щоб система могла «запам'ятати» маршрут;
- потім задаються координати точок початку та завершення руху;

-після налаштування автопілот самостійно веде трактор по заданій лінії з найбільшим відхиленням не більше 20 мм.

*Електроавтопілот.* Автопілоти з електрокермом є скоріше компромісним варіантом, ніж повноцінним рішенням, адже їх встановлення дійсно просте та швидке. Такий тип автопілоту монтується саме на рульову колонку агрегату - або замість штатного руля, або між кермом і карданом. Керування маршрутом здійснюється електрорушієм, який крутить кермо безпосередньо (у разі електроіндукційного типу) або через кардану передачу (в електромеханічних системах), відповідно до заданої лінії руху. З'єднання автопілотів з електрорулем є зручним та швидким методом монтажу системи.

Плюсами є: сумісний із більшістю технічних версій агрегатів, зокрема зі старими, які не мають систему контролерів (КАН-шини); мають просту систему облаштування - з'єднання триває до 4 годин, легко знімається та може пристосовуватися на різних прототипах тракторів.

Але є і певні мінуси: повільність реакції - електроприводу непросто миттєво повернути колеса під час експлуатації під навантаженням; нестача обертального зусилля - під час буксування енергозасобу або роботи з масивним навісним знаряддям електрорушій може не впоратися з навантаженням; спрацювання кермового механізму - це особливо притаманно для автомат-пілотів з електромеханічним пристроєм. Привод, що з'єднаний із рульовою колонкою через механіку, з часом формує люфти. Крім того, коли автомат-пілот не працює, ця система створює додаткову протидію, що збільшує зусилля на руки тракториста.

Оптимально підходить для відпрацювання робіт із культивації, дискування, додавання поживних речовин та проведення найглибшого обробітку кореневмісного шару ґрунту.

*Гідравлічний автомат-пілот* для агрегату підключається напряму до гідромеханізму рульового координування. У гідравлічному автомат-пілоті сигнали координування передаються не на стернове колесо, а точно в гідрокомплекс енергетичного засобу - через спеціальний електрогідравлічний

засіб. Управління відбувається через гідроклапани, без необхідності фізичного крутіння керма. Це значить: поворот коліс реалізується миттєво, без будь-яких механічних проміжних етапів; відсутні запізнення, втрати точності чи ривки під час ведення, плавність ходу, система працює безпосередньо з тиском у гідрокомплексі агрегату, який становить десятки атмосфер, - таке керування є не просто високоточним - воно інтегроване в саме «тіло» машини, а не є зовнішнім надбудовним пристроєм.

Оптимально підходить для виконання високоточних робіт - висівання, розпилення та міжрядної механічної обробки.

Гідравлічні автомат-пілоти для енергозасобів поділяються на два типи:

- з заводською підготовкою під автомат-пілот. Такі енергетичні засоби вже оснащені необхідними елементами - КАН-шиною, соленоїдними клапанами та сенсорами. Для роботи системи достатньо лише під'єднати термінал і активувати автомат-пілот;

- без попередньої підготовки. У цьому випадку встановлюється повний комплект обладнання з додатковими клапанами, датчиками та кабельними джгутами. Монтаж займає більше часу, проте дозволяє модернізувати навіть застарілу техніку.

До мінусів можна обзначити: встановка є більш складною та вимагає участі спеціальних фахівців та вартість системи вища, ніж у автомат-пілотів з електромеханізмом, несполученність з деякими енергетичними засобами, гідрокомплекс трактора скоріше спрацьовується.

## **1.2. Системи автоводіння культиваторів.**

Корпорація СТЕКЕТІ в Нідерландах спеціалізується на виготовленні культиваторів для обробки між рядками і для просапювання в рядочках автоматичними культиваторами (рис. 1.4). І займає перше місце з європейських країн виробництва. Пріоритетом цих машин-розпушувачів є оснащення їх сучасними методиками, пристроями, технологіями. Їхнє новаторство полягає у

створенні суперкамери АЙСИ-Лайт, яка сканує всю кольорову гамму, особливо зелений спектр, і відрізняє який притаманний сорняку, який культурі, на всіх етапах розвитку.

Камера визначає вже культуру на етапі формування двох-трьох пагінців заввишки лише 50 мм, і дає можливість переїжджати в поле і здійснювати ефективну боротьбу з бур'янами культиватором. Перед цим на декілька хвилин задають вивчення суперкамерою спектру кольору культури та сорняків. Здійснення повністю операції обробки забезпечується системами програмування автокультиватором і рухом енергетичного засобу. Автокультиватор окремо від енергозасобу переміщується рамою вліво-вправо до 200 мм по рядках, щоб запобігти знищенню рослини культури.



**Рис. 1.4. Автокультиватор в роботі на полі.[5]**

Налаштування може здійснюватися або з заводськими програмами або представником фірми. Додаток елементарний не складніший за смартфон, наочно представлені введення кожного параметру: розмір між рядочками, задану культуру, налагоджування кольорів камери під відтінок рослини під час виконання операції. Загальний час пристосування культиватора до роботи

займає п'ять хвилин. При виникненні проблем з програмними засобами, культиватор дистанційно налагоджується сервісним представником.

Саме системи АЙСИ-Лайт створює умови для безперервної роботи для виконання міжрядної обробки автокультиватором на протязі доби, і вдень, і вночі, і зберегти пагінці культур майже на сто відсотків. При зміщеннях рядків відносно осьової суперкамера веде автокультиватор чітко по рядку без знищення рослинки (рис. 1.5).



**Рис. 1.5. Розташування рядків соняху відносно осьової лінії.**

**а – зміщення при сівбі, б- зміщення входів в рядочках.**

Суперкамера АЙСИ-Лайт (рис. 1.7.) може розрізняти рядочки та міжряддя (рис. 1.6.) і точно скеровувати та слідувати з найменшим відхиленням до рядку, максимально ефективно різати сорняки, не завдаючи шкоди сходам. Енергетичний засіб при цьому не позначається на точності скеровування і має можливість здійснювати обробку між рядочками на високій швидкості переміщення до 20 км за годину.



**Рис. 1.6. Загальний вигляд екрану для налаштування культиватора.**

На перших етапах розвитку культури використовуються робочі знаряддя, які якісно оброблюють ґрунт, але захищають рослинку від засипання грудочками. На культиваторі збоку розташована спеціально захищаюча планка від потрапляння на рослинку ґрунту.



**Рис. 1.7. Суперкамера АЙСИ-Лайт.**

Автокультиватор СТЕКЕТІ призначений для великої кількості культур, які висіваються рядочками. Налаштовується регулюванням ширини і глибини обробки, ширини між рядочками. Культиватор створює можливості максимально регулювати кількість бур'яну на полі і забезпечувати найкращі умови для росту коренів культури з формуванням вищих показників врожаїв. Розроблена рама власного виробництва культиватора дозволяє добудовувати та надійно закріплювати всі складові елементи і моментально змінювати їх розташування для оптимального виконання різних операцій.

Ці машини-розпушувачі працюють з рядками від 6 до 32, розмір рами по ширині сягає від 1,5 до 13 м, і можлива більша кількість рядків під замовлення. Розмір між рядочками налаштовується від 80 мм до 1000 мм, за рахунок цього збільшується групи оброблюваних культур від бур'янів (технічні, овочеві, зернові).

Автокультиватор має додаткові базові можливості для збереження сходів при нерівних складних формах поля. Можна встановити систему контролю секцій з GPS – сигналом та піднімати секцію гідравлікою у транспортний стан при підході до оброблених рядків на клинах полів.

До заводських можливостей можна оснащати ще додатковими функціями: додавання рідких мінеральних поживних речовин під час механічного обробітку, що підвищить показники врожайності.

Під час механічної боротьби з сорняками культиватори СТЕКЕТІ надають певні переваги:

- покращені умови для розвитку рослини, за рахунок поліпшеному повітря-тепловому балансу;
- порушення цілісності поверхні;
- зменшення темпів випаровування вологи;
- зменшення втрат поживних речовин під час вимивання;
- збереження оточуючого середовища;
- запобігання імунітету до хімічної обробки захисту рослин;
- заощадження 50-60% на гербіцидах;

- збільшення якісних екологічних показників зерна для експорту;
- оптимізація виробничих процесів;
- підвищення ефективності виробництва.

Механічна боротьба з сорняками сучасними засобами все більше набуває попиту, бо дозволяє виростити якісний екологічно чистий продукт та підвищити рентабельність.

## РОЗДІЛ 2

### ПОСЛІДОВНІСТЬ ПРОВЕДЕННЯ МОДЕЛЮВАННЯ АВТОРОЗВОРОТІВ ЗА МЕТОДИКАМИ АВТОМАТИЗОВАНИХ АЛГОРИТМІВ

#### 2.1. Характеристики маневру.

Вміння високоточно здійснювати маневри (повороти, розвороти, заїзди в обмежений простір) енергетичним засобом, за рахунок можливостей конструкції ходової системи, системи управління та трансмісії, відповідає одній з головних властивостей під час експлуатації – маневрованості. Саме ця характеристика визначає ефективність використання енергозасоби при реалізації етапів вирощування в полі. Регулювання поворотом-розворотом складається з різних частин: сталих і перехідних (шлях початку маневру та кінець). Основним маневром енергетичного засобу у складі польового агрегату є розворот на поворотних ділянках та підготовка до наступного проходу. І довжина маневру впливає безпосередньо на ширину смуги під повороти на полі, що корелює значення продуктивності агрегату. При цьому ширину смуги поворотів необхідно виконати найменшою для збільшення продуктивності.

Здатність чотирьохколісного енергетичного засобу виконувати маневри з максимальною кривизною на найменшій опорній поверхні ділянці поля називають повороткістю. І має значення не тільки можливість здійснювати поворот за наймалим радіусом, але і за який проміжок часу він його здійснить та на який кут повернеться рама трактора, а також як знизиться швидкість переміщення агрегату перед поворотом і під час його виконання. Повороткість визначається параметрами кінематики: радіус кривизни, траєкторія руху, швидкість, миттєвий центр маневру.

Чим найменше має значення радіус повороту, тим ліпше буде його поворотливість. Найменше значення величини радіусу повороту відповідає

показнику оцінювання статичної поворотливості. Маневр може бути простої конфігурації та складної. Простий може складатися тільки з однієї ділянки (тільки етапу входу або виходу), а складний з багатьох простих ділянок і створювати будь-який вид повороту польового агрегату.

## **2.2. Отримання математичних залежностей характеристик $x$ та $y$ координат центру ваги енергозасобу для маневрів.**

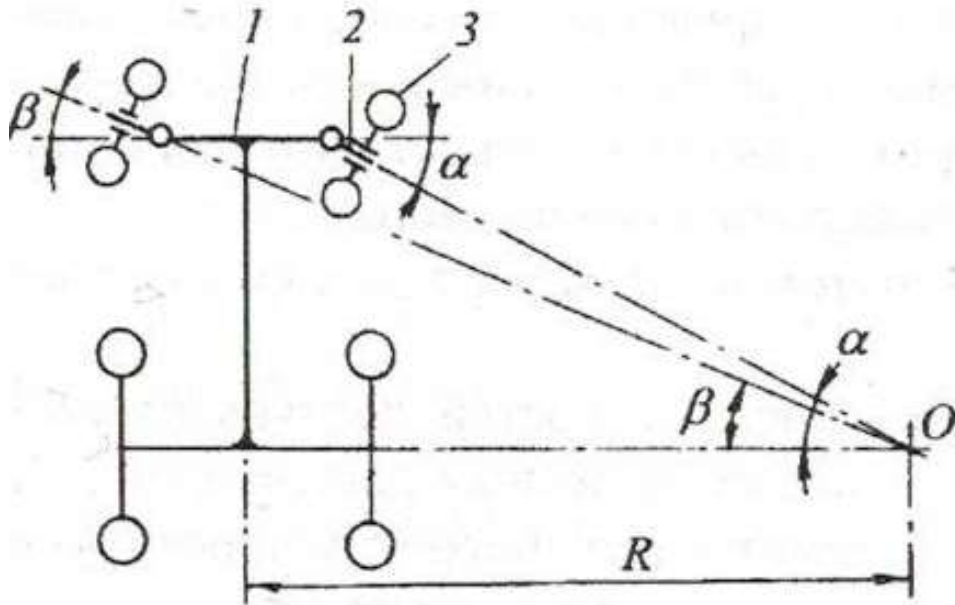
Хід агрегату по кривим лініям на полосах розворотів є самою складною частиною кінематики повороту. Колісний енергетичний засіб не може зразу переключитися з лінійного руху до ходу по колу і навпаки. Він повинен виконати рух прохід ділянок з мінливим значенням радіуса кривизни маневру (етапи входу і виходу).

Виведення математичних рівнянь для визначення координат переміщення центра ваги енергозасобу традиційного компонування під час руху по кривих лініям варто зробити для встановлення умов перебігу нестационарного руху до руху по колу під час реалізації розворотів на полі польовими агрегатами для вирощування культур господарського призначення. Це є дуже актуальним для програмного забезпечення систем автоматизації ходу енергозасобу.

Щоб отримати необхідні нам математичні вирази в параметрах  $x$  і  $y$  координат центру ваги енергозасобу ходу по кривим лініям необхідно розібрати кінематичні характеристики чотирьохколісного агрегату для лівого напрямку етапів повороту (рис. 2.1). На зображеному рисунку 2.1 маневру лівого напрямку наведені:  $v$  – абсолютне переміщення руху центра ваги  $C$  енергозасобу;  $v_x$  і  $v_y$  – проекції швидкості переміщення  $v$  на вісі системи відліку  $xOy$ ;  $\alpha$  – кут заданого курсу;  $R_C$  – радіус маневру енергозасобу,  $\varphi$  – кут повороту рами енергозасобу відносно осі  $Ox$  системи відліку;  $L$  – колісний розмір енергозасобу між передньою та задньою вісями;  $\ell_1$  і  $\ell$  розмір від центра

ваги  $C$  до центру передньої і задньої вісей. Далі складемо формули отримання проєкції швидкості переміщення енергозасобу на вісі системи відліку  $xOy$ :

$$v_x = v \cos(\varphi + \alpha); v_y = v \sin(\varphi + \alpha). \quad (2.1)$$



**Рис. 2.1 – Маневр правого напрямку чотирьохколісного енергозасобу.**

Після математичних перетворень виразів (2.1) була здобута система формул (2.2) для величин  $x$  та  $y$  координат центру ваги енергозасобу для ходу по кривим траєкторіям:

$$\begin{aligned} x &= -\frac{1}{8}k \frac{v}{l} \left( k + \alpha_o \frac{v}{l} \right) t^3 - \frac{1}{40}k^2 \frac{v^2}{l^2} t^4 \Big]; \\ y &= \left( k + \alpha_o \frac{v}{l} \right) t \left[ \alpha_o + \frac{1}{2} + \frac{1}{6}k \frac{v}{l} t^2 \right]. \end{aligned} \quad (2.2)$$

де  $\alpha = \alpha_o + k\varphi$ , де  $k$  – коефіцієнт співвідношення зміни кута  $\alpha$ , на який впливає зміни кута рами енергозасобу  $\varphi$  в повороті;  $\alpha_o$  – число кута  $\alpha$  коли  $\varphi = 0$ .

Отримані дані математичні залежності (2.2.) дають можливість досліджувати різні види маневрів польового агрегату під час здійснення

операцій вирощування на полі для будь-якого енергозасобу шляхом моделювання за допомогою програми роботи з електронними табличними даними Excel базового пакету програм Мікрософт Офіс.

### **2.3. Моделювання різних видів маневрів енергозасобу в лабораторних умовах.**

Метою досліджень є опрацювання набутих математичних залежностей на підтвердження впровадження рівнянь на практиці.

Для здійснення досліджень на моделювання маневрів енергозасобу треба обрати спочатку вид маневру для агрегату з керувальними колесами переднього приводу, потім розібрати на кількість ділянок простих маневрів в складному, визначитися з вихідними значення параметрів математичних залежностей для конкретного енергозасобу. Нами був обраний для прикладу енергозасіб МТЗ-80 з просапуючим культиватором КПК-4,2 «Велес» з розворотом петлевидної траєкторії з шириною прополювання 4,2 м. Найменший радіус здійснення маневру колісним енергозасобом  $R_{\min} = 5,2$  м. Швидкість переміщення агрегату під час здійснення криволінійного маневру відповідає значенню  $v = 5 \dots 10$  км/год  $\approx 1,3 \dots 2,6$  м/с. Це вид маневру, який вимагає значних розмірів розвортної ділянки.

Задачею дослідження стає встановлення мінімального часу здійснення раціонального криволінійного маневру з оптимізацією характеристик кінематики і таким чином примножити продуктивність застосування польового агрегату на полі. Петлеподібний маневр (рис. 2.2) є складним і утворюється сім'ю складовими простими маневрами: шість частин вхід-вихід лівого-правого поворотів та хід по колу (правий маневр).



**Рис. 2.2. Складний маневр петлеподібної траєкторії агрегату з агрегатом.**

### **2.3.1. Алгоритм проведення експериментальних досліджень на майданчику поля з застосуванням сигналу з супутників.**

Для отримання відтворення криволінійних маневрів трактора МТЗ-80 з колесами керування переднього приводу використовується технологія супутникової навігації.

Перед початком заїзду на маневр в водійському приміщенні на місці знаходження центру ваги фіксується портативний сучасний девайс з сенсорним екраном (планшет). Заїзд реалізовується на горизонтально рівній ділянці поля певних передбачуваних розмірів під петлевий маневр. Відкладається шкала системи координат з врахуванням відстані прямої ділянки для набуття енергозасобом стабільної швидкості переміщення з наочною позначкою початку входу в маневр водієві. На сучасний портативний девайс встановлюється додаток відстежування та зображення координат переміщення Tracker, який створює запис криволінійного маневру-треку з визначенням координат енергозасобу в кожній точці від GPS-сигналів. Також наводиться інформація маневру: швидкість переміщення трактора, час на здійснення маневру, розмір маневру, географічні координати для кожного положення

енергозасобу. Паралельно час на повороти визначався секундоміром. Оператор-тракторист проходить пряму ділянку, стабілізує швидкість, від позначки починає і здійснює маневр, його записує програмне забезпечення планшету.

### **2.3.2. Алгоритм відтворення траєкторії маневру енергозасобу на поверхні поля.**

Підготовку до впровадження маневрів на полі передбачено наступні дії:

- визначення рівної поверхні ділянки поля: нахил поверхні від вертикалі не повинен бути більше двох градусів;
- відмічається лінія прямої для набрання сталої швидкості, креслиться вісі координат та відзначається початок маневру;
- налаштовуються обладнання та пристосування для креслення траєкторії маневру на ґрунті;
- здійснюється проїзд лінії прямої ділянки до сталої швидкості переміщення трактором;
- рівномірність повороту керованих коліс агрегату забезпечується поступовим обертом керма на заданий кут в секунду;
- зняття необхідних параметрів повороту після виконання.

Колісний енергетичний засіб облаштований металевим стрижнем відповідно центру ваги для зображення кривої маневру на поверхні поля, пристосуванням на кермі для рівномірних заданих обертів керма і коліс. Положення центру ваги енергетичного засобу МТЗ-80 встановлювалось на платформених вагах з повною ємністю пального.

В якості додаткового обладнання застосовувався пристрій для лінійних вимірів довжин, висот, площ, об'ємів для внутрішнього і зовнішнього використання – лазерний далекомір (рис. 2.3).

### **Технічні характеристики лазерного далекоміра Bosch GLM-250:**



- Лазерний діод - 635 нм, <1 мВт.
- Діапазон вимірювань - 0,05 - 250 м.
- Клас лазера - 2.
- Точність вимірювань -  $\pm 1$  мм.
- Номін. час вимірювання - <0,5 с.
- Макс. час вимірювання - 4 с.
- Джерела живлення - 4 x 1,5 В LR03 (AAA).
- Автоматика відключення - 4 хв.
- Вага - 0,24 кг.
- Розміри - 120 \* 66 \* 37 мм.
- Одиниці виміру - м / см / мм.
- Кількість збережених значень - 30.
- Захист - IP 54.

**Рис. 2.3. Загальний вигляд пристрою далекоміру та його характеристики.**

**Bosch GLM 250 VF** - лазерна рулетка для точного вимірювання довжини, висоти, площі і об'єму приміщення. Вимірювання від передньої і задньої кромки інструменту.

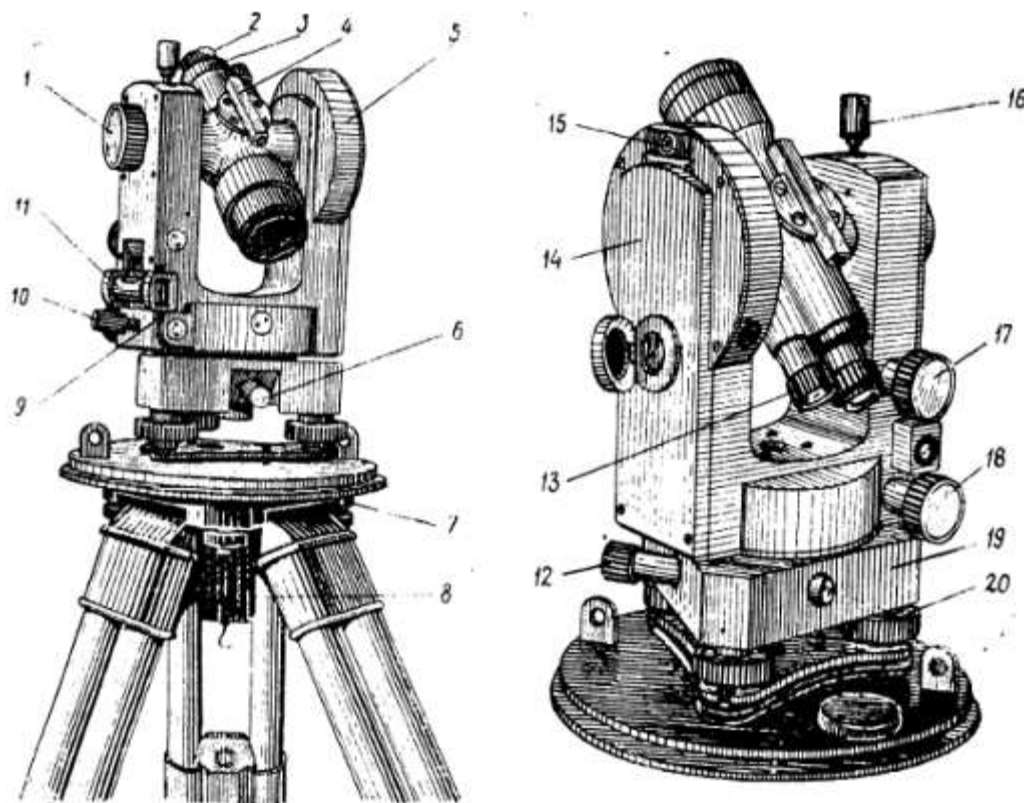
Лазерний далекомір **GLM 250 VF** має:

- Вбудованим оптичним прицілом для оптимальної видимості лазерної точки на відстані до 250 м;
- Міцним і надійним корпусом із захистом від пилу і бризок IP 54;
- Простою і зрозумілою клавіатурою;
- Великим 4-рядковим дисплеєм з підсвічуванням;
- Високою точністю вимірювання  $\pm 1$  мм для забезпечення оптимальних результатів роботи;
- Включається функцією таймера для точного вимірювання в складних умовах;
- Функцією автоматичного збереження результатів останніх 30 вимірювань і однією постійною;
- Зносостійким оптичним держателем з кераміки для забезпечення максимальної точності;
- Багатофункціональним висувним нівелювальним гвинтом для точного вимірювання з важкодоступних місць і кромки;
- Функцією трапеції для вимірювання висоти і ухилу скатів даху;
- Функціями вимірювання максимальної і мінімальної відстані між двома точками;
- Функціями додавання і віднімання довжини, площі та об'єму;
- Функцією розмітки для маркування повторюваних ділянок;
- Функцією непрямого вимірювання висоти за формулою Піфагора;
- Рівнем на корпусі для точного встановлення далекоміра по горизонталі.

У комплект поставки входить штатив BS 150 для робочої висоти від 52 до 147 см.

Після проходження лінійної частини початкової ділянки знімаємо значення по швидкості переміщення трактора, найменшої відстані повороту до центру ваги, величину куту відхилення керованих коліс переднього приводу. Для рівномірного розподілу повороту керованих коліс за рахунок рівномірного обертання керма за заданими кутами реалізують апробаційні переміщення.

Характеристики кінематики криволінійного переміщення центру тяжіння енергетичного засобу (відхилення, координати точок) знімають значення після здійснення маневру і зображення на поверхні траєкторії стрижнем. Час маневру визначався секундоміром від позначки початку входження в маневр. Під час здійснення енергозасобом маневру стрижень відтворює лінію маневру центру тяжіння трактора на поверхні ґрунту. Далі поділяють криволінійну траєкторію на однакові частини довжиною 1-2 м і встановлюють в цих точках дерев'яні стовпчики. На вертикальній вісі маневру на деякій відстані розташують геодезичний пристрій-теодоліт (рис. 2.4) в положенні  $O_T$ , за допомогою якого встановлюють розміри відстаней до стовпчиків  $\ell_i$ ,  $\rho_i$ , та розміри кутів між радіусами та наступними стовпчиками.



**Рис. 2.4. Загальне зображення будови та складових пристрою (теодоліту) для вимірювання кутів:**

1 – гвинт кремальєри; 2 – діоптрійне кільце; 3 – кришка, яка закриває виправні гвинти сітки ниток; 4 – коліматорний візир; 5 – вертикальний круг; 6 – закріпний гвинт горизонтального круга; 7 – головка штатива; 8 – становий гвинт; 9 – виправні гвинти рівня; 10 – закріпний гвинт алідади; 11 – циліндричний рівень; 12 – навідний гвинт горизонтального круга; 13 – окуляр мікроскопа; 14 – бокова кришка; 15 – кронштейн бусолі; 16 – закріпний гвинт зорової труби; 17 – навідний гвинт зорової труби; 18 – навідний гвинт алідади; 19 – підставка; 20 – підймальні гвинти.

Необхідно перетворити координати у звичайну декартову систему, так само, як і математичні залежності ходу польового агрегату:

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

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

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

де  $H$  – розмір по вертикалі до оптичного прицілу приладу.

Точки розташування дерев'яних стовпчиків встановлювалися електронним приладом-лазерним далекоміром методом зняття розміру від точки місця теодоліта до вісі координат. Відтворенні координати кривої на поверхні поля та які встановлювалися теодолітом, мають високий відсоток точності.

Швидкість реального переміщення енергозасобу:

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

де  $S$  - протяжність свієї траєкторії кривої,  $t$  - час реалізованого повороту.

#### 2.4. Обчислення відтворених координат експерименту кривої.

Для позначення ліній розмірної сітки на ділянки поверхні поля у певній точці  $O_T$  (рис. 2.5.) розміщують теодоліт на відрізок до першого дев'яного

стовпчика  $\rho_o$ . Перпендикулярно під прямим кутом до вертикальної вісі  $y$  за допомогою теодолітного кутового пристрою ставиться ще один дерев'яний стовпчик на вісі  $x$ . Стабілізуюча ділянка трактора до повороту становить 10 м.

Першочергово визначаємо початкові показники лінії відтвореного маневру: швидкість ходу агрегату, число часу на початкову ділянку маневру (вхід) та кінцеву ділянку (вихід) з маневру, відхилення рами енергозасобу відносно початкового стану по горизонтальній вісі, число зміни курсового кута, далі кут ходу обертів керма для визначення невизначених залишкових параметрів маневру і обрахувати середній кут відхилення коліс керування переднього приводу енергозасобу:

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

далі використовуємо передаточне число співзалежності зубів шестернів  $j = 17,5$ , приймаючи його сталим і обраховуємо необхідне кут оберт руля.

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

Це призводить до рівномірних відхилень керованих коліс на полі за рахунок кута рівномірного обертання руля.

Щоб ідентично провести оцінку даних отриманих значень координат кривої маневру треба привести координати до єдиного масштабного коефіцієнту обох траєкторій енергозасобу, сумісно зобразити дві траєкторії кривої поворотів в одній системі координат і обробити данні з визначенням похибки відхилення координат одних від інших відповідно до траєкторій.

На утворення кривої траєкторії поворотів енергозасобу чинять два основних показника: швидкість ходу трактора та безрозмірною характеристикою зміни курсового кута відхилення траєкторії енергозасобу.

В результаті ми маємо дві криволінійні траєкторії поворотів трактора, які дозволяють обґрунтовано дослідити справедливність роботи математичних рівнянь криволінійного руху енергозасобу та точність проведених дослідів.

Для оцінки точності проведення дослідів у відповідності до створених математичних залежностей ходу по кривим енергосаби треба застосувати наступні залежності:

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

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

де  $x_{1e}, x_{2e}, \dots, x_{ne}$  і  $y_{1e}, y_{2e}, \dots, y_{ne}$  – відстані до точок по системі координат;

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

де  $x, y$  – значення в середньому;  $n$  – число точок кривої лінії маневру.

## РОЗДІЛ 3

### ОТРИМАНІ ЗНАЧЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБРОБКА.

#### 3.1. Створення математичних спряжених координат теоретичного складного маневру агрегату: енергозасобу МТЗ-80 та КПК-4,2.

Повний складний криволінійний маневр являє собою траєкторію, яка формується з кількох простих ділянок-маневрів поворотів. Для моделювання всього складного розвороту необхідно змодельовати його окремі складові спочатку: візд та виїзд з лівостороннього та правостороннього маневрів, а також хід по дузі кола в обраному чи заданому напрямку.

Сталі початкові значення характеристик для цих всіх простих ділянок-елементів:  $v = 1,3$  м/с ;  $\ell = 0,93$  м ;  $R_{\min} = 5,2$  м ; шлях  $S = vt$ .

*Початкова та кінцева ділянки простого лівостороннього повороту:*

Початкова лівостороння ділянка з параметрами для розрахунку:

$$\alpha_k = \ell / R_{\min} = 0,93 / 5,2 = 0,1788 \text{ рад} = 10,25^\circ .$$

$$\alpha_o = 0 \text{ і час } t = 2,2 \text{ с. } k = \alpha_k / t = 0,179 / 2,2 = 0,08129 \text{ с}^{-1} \quad \theta_1 = 0.$$

Отримані розрахункові значення за математичними залежностями вказані в таблиці 3.1. та криволінійна змодельована лінія маневру на рисунку 3.1.

Кінцева лівостороння ділянка з параметрами для розрахунку:

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

$$\alpha_k = 0.$$

$$t = 2,2 \text{ с.}$$

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

$$\varphi_{k2} = 15,76^\circ . \text{ і } \theta_2 = \varphi_{k1} = 15,76^\circ .$$

Отримані розрахункові значення за математичними залежностями вказані в таблиці 3.1. та криволінійна змодельована лінія маневру на рисунку 3.1.

Початкова та кінцева ділянки простого правостороннього повороту:

Початкова правостороння ділянка з параметрами для розрахунку:

$$\alpha_o = 0,$$

$$k = -0,08129 \text{ с}^{-1},$$

$$t = 2,0 \text{ с};$$

$$\alpha_k = \alpha_o + kt = 0 - 0,08129 \cdot 2,2 = -0,1788 \text{ рад} = -10,25^\circ,$$

$$\varphi_{кз} = -15,76^\circ. \theta_3 = \theta_2 + \varphi_2 = 15,76 + 15,76 = 31,52^\circ.$$

Отримані розрахункові значення за математичними залежностями вказані в таблиці 3.1. та криволінійна змодельована лінія маневру на рисунку 3.1.

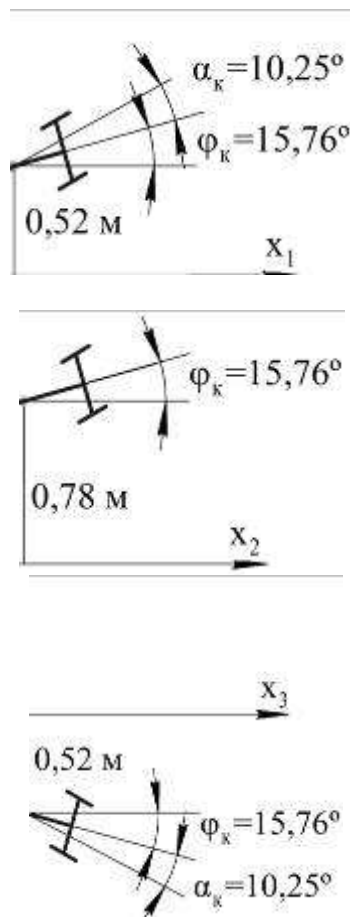


Рис. 3.1. Схема результату моделювання вїзду в поворот.

Хід енергозасобу по лінії кола:

Таблиця 3.1. Значення повороту трактора.

№ 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
				0,179	-0,020	0	0	0	0	0	0				
1	0	0	0	0,179	-0,020	0	0	0	0	0	0	∞	0	0	2,10
2	0,25	0,32	0,01	0,159	-0,041	0,020	1,17	0,059	3,38	0	-0,20	45,76	0,33	0,32	2,10
3	0,50	0,65	0,02	0,138	-0,061	0,041	2,33	0,111	6,35	0,01	-0,81	22,88	0,65	0,65	2,12
4	0,75	0,97	0,04	0,118	-0,081	0,061	3,50	0,156	8,92	0,03	-1,83	15,25	0,98	0,97	2,14
5	1,00	1,30	0,08	0,098	-0,102	0,081	4,66	0,193	11,07	0,05	-3,26	11,44	1,30	1,30	2,18
6	1,25	1,62	0,13	0,077	-0,122	0,102	5,83	0,224	12,82	0,08	-5,09	9,15	1,63	1,62	2,23
7	1,50	1,93	0,20	0,057	-0,142	0,122	6,99	0,247	14,17	0,12	-7,33	7,63	1,95	1,93	2,30
8	1,75	2,25	0,29	0,037	-0,163	0,142	8,16	0,263	15,10	0,17	-9,97	6,54	2,28	2,25	2,39
9	2,00	2,55	0,41	0,016	-0,179	0,163	9,32	0,273	15,63	0,22	-13,03	5,72	2,60	2,55	2,51
10	2,20	2,79	0,52	0	0	0,179	10,25	0,275	15,76	0,27	-15,76	5,20	2,86	2,79	2,62

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

$$k = 0; t = 14,77 \text{ с}; \varphi_k = -211,67^\circ.$$

$$\text{Оси } x_4 y_4 \quad \theta_4 = \theta_3 + \varphi_3 = 31,52 - 15,76 = 15,76^\circ.$$

Отримані розрахункові значення за математичними залежностями вказані в таблиці 3.2. та криволінійна змодельована лінія маневру на рисунку 3.2 та рисунку 3.3.

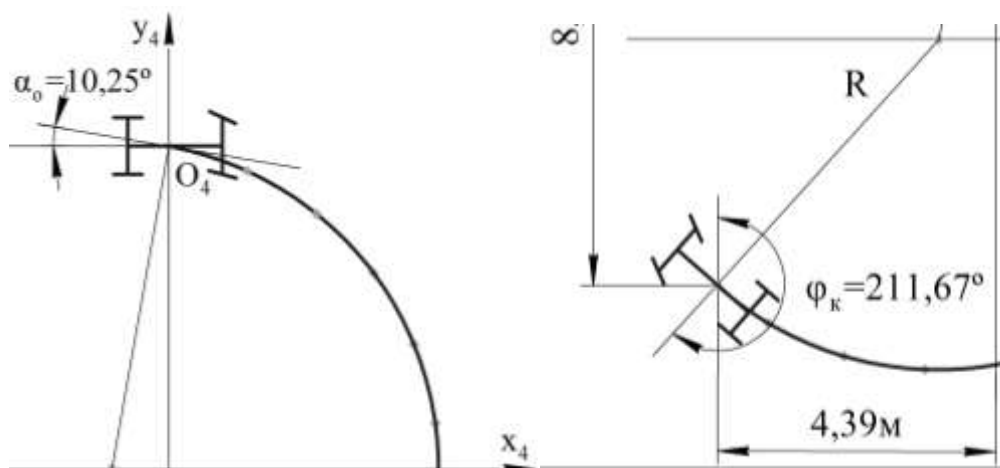


Рис. 3.2. Схема елементів повороту по колу.

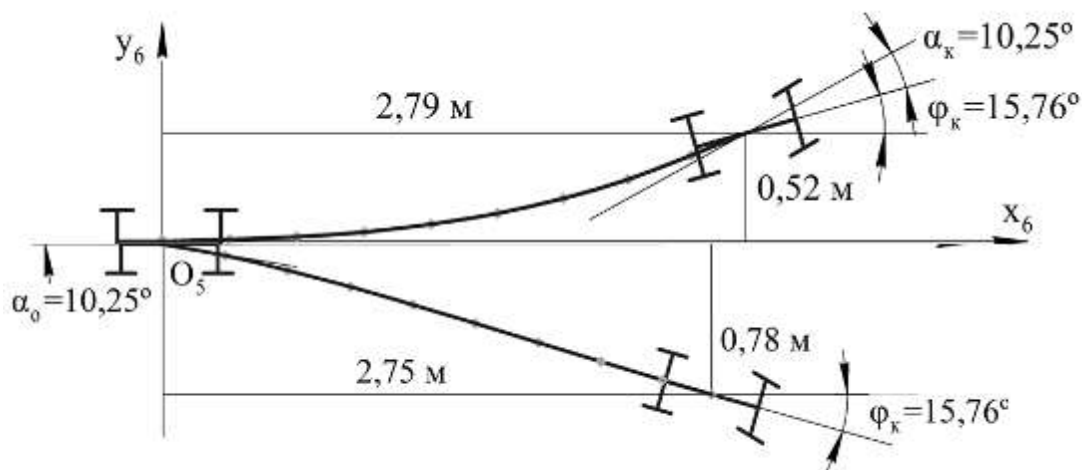


Рис. 3.3. Схема елементів повороту трактора вправо та в ліво.

Кінцева правостороння ділянка з параметрами для розрахунку:  
 $\alpha_o = -0,1788 \text{ рад} = -10,25^\circ$ ,  $\alpha_k = 0$ .  $t = 2,2 \text{ с}$ .  $k = 0,08129 \text{ с}^{-1}$ .

$$x_5 y_5 \text{ на кут} . \theta_5 = \theta_4 + \varphi_4 = 15,76 - 211,53 = -196,05^\circ.$$

Отримані розрахункові значення за математичними залежностями вказані в таблиці 2.3. та криволінійна змодельована лінія маневру зображена на слайді пояснювальної записки.

Дані:  $\alpha = -0,179$  рад (-10,25 град);  $R = 5,2$  м;  $t = 0 \dots 15$ , с

Таблиця 3.4 – повороти правий та лівий

№ з/п	$x_i$ , м	$y_i$ , м	$t$ , с	$\varphi$ , рад		$S$ , м	$x$ , м	$x$ , м Кінцеве	$y$ , м	$y$ , м Кінцеве
1	0	0	0	-10,25	0	0	7,95	6,17	5,15	-4,69
2	1,24	-0,39	0,25	-9,09	-0,25	-14,33	9,25	5,88	5,12	-4,54
3	2,34	-1,07	0,50	-7,92	-0,50	-28,66	10,49	5,59	4,76	-4,38
4	3,24	-2,00	0,75	-6,76	-0,75	-42,99	11,61	5,30	4,11	-4,21
5	3,88	-3,13	1,00	-5,59	-1,00	-57,32	12,54	5,01	3,19	-4,04
6	4,22	-4,38	1,25	-4,43	-1,25	-71,66	13,21	4,73	2,08	-3,86
7	4,24	-5,68	1,50	-3,26	-1,50	-85,99	13,58	4,44	0,84	-3,67
8	3,95	-6,94	1,75	-2,10	-1,75	-100,32	13,63	4,16	-0,45	-3,49
9	3,34	-8,09	2,00	-0,93	-2,00	-114,65	13,37	3,87	-1,72	-3,31
10	2,48	-9,05	2,20	0,00	-2,25	-128,98	12,79	3,65	-2,88	-3,17
11	1,40	-9,77			-2,50	-143,31	11,95		-3,87	
12	0,17	-10,20			-2,75	-157,64	10,89		-4,62	
13	-1,12	-10,31			-3,00	-171,97	9,68		-5,08	
14	-2,40	-10,10			-3,25	-186,31	8,39		-5,22	
15	-3,59	-9,58			-3,50	-200,64	7,10		-5,04	
16	-4,39	-8,99			-3,69	-211,67	6,17		-4,69	

### 3.2. Застосування сигналу з супутників технології навігаційних систем для відображення криволінійного розвороту польового агрегату

В результаті впровадження супутникового сигналу була зображена лінія ходу дослідного треку 1:

*Початкова 1 та кінцева 2 ділянки простого правостороннього повороту:*

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

$$\alpha_{1\text{коліс}} = 180^\circ / 25 = 7,2^\circ = 0,1256 \text{ рад},$$

$$k = (\alpha_k - \alpha_o) / t = 0,0606 / 12,1 = 0,00501 \text{ с}^{-1}$$

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

Отримані розрахункові значення за математичними залежностями вказані в таблиці 3.5 та криволінійна змодельована лінія маневру, отримана з супутникових сигналів траєкторія наведені сумісно на рисунку 3.7.

Таблиця. 3.5. Значення повороту.

№ з/п	$x_{ie}, \text{ м}$	$t, \text{ с}$	$x_{it}, \text{ м}$	$x, \text{ м}$	$y_{ie}, \text{ м}$	$y_{it}, \text{ м}$	$y, \text{ м}$	$S, \text{ м}$	$\sigma_x$	$\sigma_y$
<i>Вхід в лівий поворот</i>										
1.	9,00	6,13	9,00	16,076	0,748	0,466	5,393	0	8,83	5,72
2.	17,40	12,15	17,43		3,42	3,099		2,64		
3.	24,38	18,12	23,64		8,57	8,40		5,28		
4.	29,81	24,14	30,31		15,77	15,00		7,92		
5.	30,35	23,88	30,44		13,80	13,52		10,57		
6.	33,58	28,34	33,65		19,47	19,30		13,21		
7.	35,61	31,62	35,77		23,80	23,70		15,85		
<i>Вхід в правий поворот</i>										
1.	9,84	5,715	9,89	26,40	0,579	-0,35	13,63	0	10,33	13,13
2.	16,77	9,88	16,98		2,67	-1,59		2,64		
3.	24,03	14,52	24,37		6,04	-4,76		5,28		
4.	32,93	21,71	32,76		14,80	-13,95		7,92		
5.	38,44	28,44	36,52		25,20	-25,06		10,54		
6.	42,01	34,68	37,90		35,40	-36,09		13,14		
7.	8,02	5,48	8,06		0,674	0,256		15,70		
8.	14,49	10,00	14,62		2,05	1,33		18,19		
9.	20,76	14,64	20,95		4,577	3,90		20,57		
10.	26,14	19,34	26,36		8,736	8,24		22,79		

Кут відхилення курсу спочатку  $\alpha_o = 0,0607 \text{ рад} = 3,48^\circ$ , вкінці  $\alpha_k = 0$ .

Час маневру  $t = 17,5$  с.

Коефіцієнт рівномірності зміни кута відхилення курсу  $k = (\alpha_k - \alpha_o) / t = (0 - 0,0607) / 17,5 = -0,00343$  с<sup>-1</sup>. Кут оберту вісей ділянки повороту до загальної системи координат  $\theta_2 = \varphi_{к1} = 41,50^\circ$ .

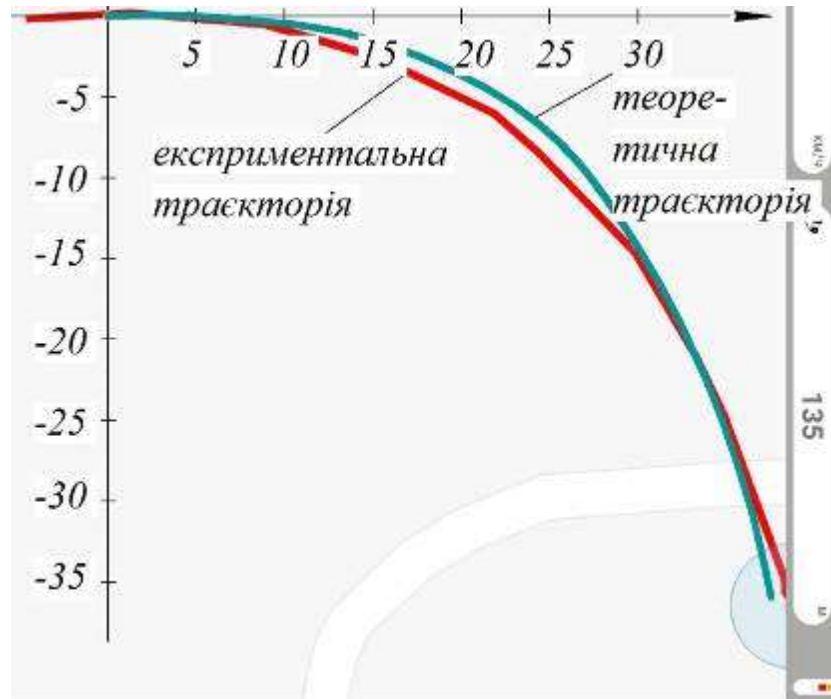


Рис. 3.7. Схема сумісного відтворення двох траєкторій правостороннього повороту центру тяжіння польового агрегату: МТЗ-80 та КПК-4,2 за сигналом супутнику.

Відповідно до послідовності обчислювання отриманих значень точок двох маневрів необхідно виконати розрахунок відхилення.

Таблиця 3.8. Визначення середньоквадратичного значення відхилення двох криволінійних маневрів польового агрегату з застосуванням сигналу з супутників.

N з/П	$x_{is}, \text{ м}$	$t, \text{ с}$	$x_{it}, \text{ м}$	$x, \text{ м}$	$y_{is}, \text{ м}$	$y_{it}, \text{ м}$	$y, \text{ м}$	$(x_{ns} - x)^2$	$(y_{ns} - y)^2$	$\sigma_x$	$\sigma_y$
<i>Трек 1. Вхід в правий поворот і вихід з правого повороту.</i>											
1.	9,84	5,715	9,89	26,40	0,579	-0,35	13,63	272,58	176,36	10,33	13,13
2.	16,77	9,88	16,98		2,67	-1,59		88,736	144,96		
3.	24,03	14,52	24,37		6,04	-4,76		4,12	78,68		
4.	32,93	21,71	32,76		14,80	-13,95		40,45	0,1024		
5.	38,44	28,44	36,52		25,20	-25,06		102,4	130,64		
6.	42,01	34,68	37,90		35,40	-36,09		132,25	504,45		

Аналізуючи значення таблиці можна зробити висновок, технологія навігаційної системи з використанням супутникового сигналу для відтворення криволінійних маневрів продемонструвала необхідну точність та достатньо узгодженість даних кривих між собою, про що показує середньоквадратичне число.

### 3.3. Розрахунок криволінійної траєкторії складеного довільного маневру на прикладі енергозасобу МТЗ-80.

Після проїзду контрольної стабілізуючої ділянки були зафіксовані наступні характеристики криволінійної траєкторії центру тяжіння трактора: швидкість ходу переміщення повороту енергозасобу, мінімальний відрізок від центру повороту до центру тяжіння енергозасобу, кут відхилення під час ходу від осьової лінії передніх регульованих коліс та рами трактора від лінії осі через центр тяжіння. В результаті проходження трактора по ґрунту були відображені на поверхні ґрунту три ділянки-траєкторії складеного маневру: початкові (входження) та кінцеві (завершення) ділянки лівостороннього та правостороннього поворотів (рис. 3.8). Результативні значення зображених дослідних координат ділянок-поворотів на поверхні знесені до таблиці 3.9 з сталими початковими значеннями криволінійного ходу:  $v = 1,2 \text{ м/с}$ ;  $R_{\min} = 5,2$ ;  $t = 8,9 \text{ с}$ ;  $S = 10,65 \text{ м}$ ;  $k = \pm 0,08942 \text{ с}^{-1}$ .

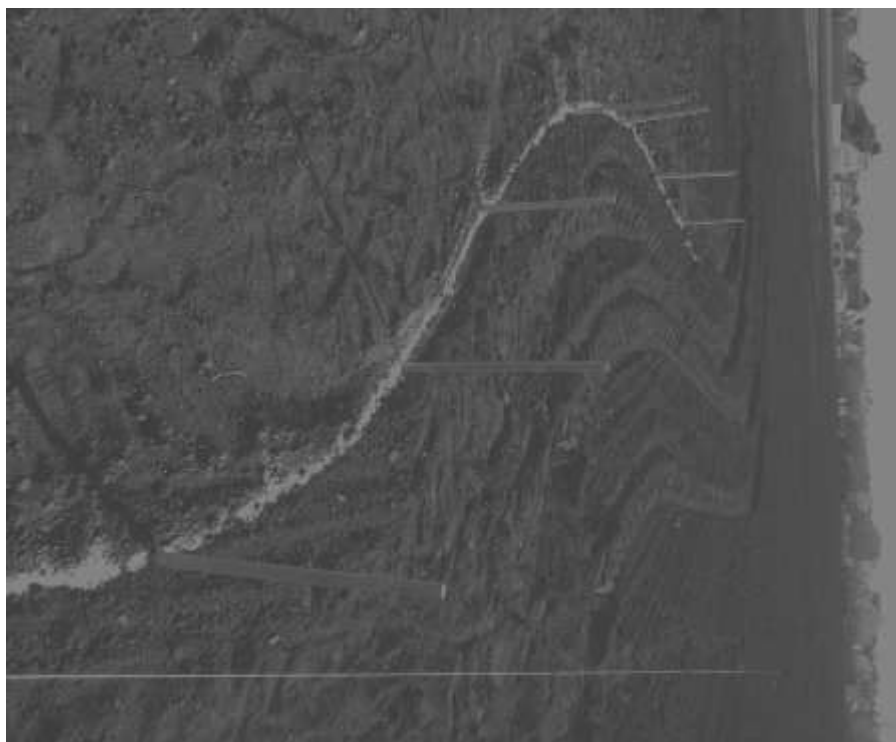


Рис. 3.8. Отриманий дослідний складений маневр енергозасобу МТЗ-80.

Таблиця 3.9. Результативні значення дослідної траєкторії на полі.

N 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.	$\eta_3$	т. 1 (т.О)	ЛН 6° 45'	17°40'	17°585'
		т. 4	ЛН 349° 05'	17°77'	
		т. 4	ПН 168° 53'		
		т. 1	ПН 186° 30'		
3.	$\eta_5$	т. 1 (т.О)	ЛН 6° 45'	33°45'	33°67'
		т. 6	ЛН 333° 00'	33°89'	
		т. 6	ПН 152° 41'		
		т. 1	ПН 186° 30'		
4.	$\eta_7$	т. 1 (т.О)	ЛН 6° 45'	45°90'	45°925'
		т. 8	ЛН 320° 50'	45°95'	
		т. 8	ПН 140° 40'		
		т. 1	ПН 186° 30'		

В результаті здійснених дослідних проїздів енергозасобу були отримані дві криволінійні подібні траєкторії складених маневрів: теоретичну та польову, які необхідно накласти одна на одну в єдиному масштабному

## ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній (магістерській) роботі наведено нове вирішення наукового завдання, що виявляється в підвищенні ефективності використання машинно-тракторного агрегату з передніми керованими колесами з використанням супутникової навігаційної системи шляхом удосконалення математичних рівнянь криволінійного руху енергетичного засобу. Це дозволило оптимізувати маневрові властивості на поворотах шляхом скороченням довжини маневру переміщення агрегату, скороченням ширини розворотної полоси та збільшенням довжини гону.

На основі проведених досліджень зроблені наступні основні висновки.

В першому розділі роботи проведений аналіз сучасних наукових літературних джерел вітчизняних і закордонних науковців, які описують криволінійний рух польового агрегату математичними залежностями, в результаті якого нами було встановлено: для побудови траєкторії центра ваги енергетичного засобу криволінійного руху необхідні нові прості аналітичні рівняння для застосування на практиці, які враховують інтенсивність розподілу кута повороту керованих передніх коліс, з подальшим використанням запропонованих алгоритмів для програмного забезпечення автоматичного водіння.

В другому розділі роботи розроблені аналітичні залежності визначення координат переміщення центра ваги енергетичного засобу криволінійного руху з передніми керованими колесами для ділянок входу в поворот і виходу з повороту з урахуванням рівномірності розподілу кута повороту керованих коліс під час здійснення маневрів. Також розроблена методика проведення еспериментальних досліджень відтворення змодельованих траєкторій складного грушоподібного розвороту центра ваги трактора МТЗ-80 з прополювальним культиватором КПК-4,2 в складі польового агрегату в польових умовах, з використанням супутникової навігаційної системи та проведенням статистичної обробки експериментальних даних координат маневру.

В третьому розділі наведені отримані координати змодельованої траєкторії маневрів та проведення польового експерименту відтворення теоретичної траєкторії моделювання центра ваги трактора МТЗ-80 на дослідних полях траєкторії лівого і правого поворотів (вхід і вихід) та отримані координати маневрів за допомогою супутникової навігаційної системи з проведенням відповідної статистичної обробки на придатність математичних залежностей криволінійного руху енергетичного засобу на практиці з визначенням середньоквадратичного відхилення.

Експериментально відтворені траєкторії лівого повороту (вхід і вихід) на тракторі МТЗ-80 показали повну ідентичність і достатню відповідність експериментальних і теоретичних траєкторій, тим самим підтверджують придатність математичних рівнянь нелінійного руху енергетичного засобу з передніми керованими колесами для ділянок входу в поворот і виходу з повороту для енергетичного засобу в польових умовах.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Маковей Ю. Сільське господарство 4.0 – приклад розвитку в Україні. *Онлайн-асистент фермера*. 16.05.2025. URL: <https://kurkul.com/spetsproekty/1743-silke-gospodarstvo-40--priklad-rozvitku-v-ukrayini> (дата звернення: 22.10.2025).
2. Чому гідравліка - найкраще рішення для автопілота на великі трактори. Пропозиція - Головний журнал з питань агробізнесу. Статті. Техніка та обладнання.. 22.07.2025. URL: <https://propozitsiya.com/articles/tekhnika-ta-obladnannya/chomu-hidravlika-naykrashche-rishennya-dlya-avtopilota-na-velyki> (дата звернення: 23.10.2025).
3. Курсовказівник або автопілот на трактор. З чого розпочати шлях до автоматизації робіт фермера.. Геометр - системи точного землеробства та GNSS для галузей.. Статті.. 25.01.2022. URL: <https://gpsgeometer.com/blog/tractor-guidance-or-autosteering-system?srsId=AfmBOop2x0cd9kgZPX4cEs1p-iWrRKeqkgQhM1cZV-ZsHIgo3L5mcErI> (дата звернення: 23.10.2025).
4. Автопілот на трактор: що це таке, які бувають, і як обрати найкращий варіант. *НАВІФАРМ ТЕХ. Блог*. 19.08.2025. URL: <https://www.navifarm.tech/blog/avtopilot-na-traktor-shho-cze-take-yaki-buvayut-i-yak-obraty-najkrashhyj-variant/> (дата звернення: 25.10.2025).
5. Просапний культиватор Steketee: надійний помічник для механічної боротьби з бур'янами. АгроЕліта-всеукраїнський аграрний журнал. Новини, техніка. 21.06.2021. URL: <https://agroelita.info/prosapnyy-kulyvator-steketee-nadiynyy-pomichnyk-dlia-mekhanichnoi-borotby-z-bur-ianamy/> (дата звернення: 26.10.2025).
6. Керованість та стійкість рух тракторів : навчальний посібник / О. О. Островерх, В. М. Краснокутський, Т. О. Крюкова. –Харків : Друкарня Мадрид. – 156 с.
7. Сіренко Ю. В. Дослідження та обґрунтування ефективних прийомів використання польових агрегатів.: Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії. Суми, 2021. 199 с.

8. Горват А.А., Молнар О.О., Мінькович В.В. Методи обробки експериментальних даних з використанням MS Excel: Навчальний посібник. Ужгород: Видавництво УжНУ “Говерла”, 2019. – 160 с.
9. Методи та засоби експериментальних досліджень: навч. посіб. / Г.Б. Параска, Д.В. Прибега, П.С. Майдан. – Київ: Кондор-Видавництво, 2017.–138 с.
10. 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>.
11. 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>
11. 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%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%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)
12. Zhihua Diao, Lele Chen, Yuanyuan Yang, Yuchen Liu, Jingyi Yan, Shengxian He, Baohua Zhang, Localization technologies for smart agriculture and precision farming: A review, *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 236, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.110464>.
13. Senthil G. A, S.U. Suganthi, L. Prinslin, R. Selvi, R. Prabha, Generative AI in Agri: Sustainability in Smart Precision Farming Yield Prediction Mapping System Based on GIS Using Deep Learning and GPS, *Procedia Computer Science*, Volume 252, 2025, 365-380, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.12.038>.
14. Caspar Krampe, Paul T.M. Ingenbleek, Jarkko K. Niemi, Jordi Serratos,

Designing precision livestock farming system innovations: A farmer perspective, *Journal of Rural Studies*, Volume 111, 2024, 103397, <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2024.103397>.

14. Shuwan Yu, Xiaoang Liu, Qianqiu Tan, Zitong Wang, Baohua Zhang, Sensors, systems and algorithms of 3D reconstruction for smart agriculture and precision farming: A review, *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 224, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109229>.

15. Sairoel Amertet, Girma Gebresenbet, Hassan M. Alwan, Application of hyper-automation in farming – an analysis, *Smart Agricultural Technology*, Volume 9, 2024, 100516, <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100516>.

16. Chaoke Guo, Jianqiu Mu, Jingyu Zhang, Liang Heng, Model Predictive Control Based Path Planner Design for On-road Autonomous Tractor Trailer Vehicles, *IFAC-PapersOnLine*, Volume 58, Issue 18, 2024, 59-64, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.09.010>.

17. Wei Zhang, Teng Sun, Yunhui Li, Chuangxin He, Xianchao Xiu, Zhonghua Miao, Optimal motion planning and navigation for nonholonomic agricultural robots in multi-constraint and multi-task environments, *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 238, 2025, 110822, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.110822>.

18. Yanming Li, Tao Wu, Yangfan Xiao, Liang Gong, Chengliang Liu, Path planning in continuous adjacent farmlands and robust path-tracking control of a rice-seeding robot in paddy field, *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 210, 2023, 107900, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107900>.

19. Ying Ding, Liang Wang, Yongwei Li, Daoliang Li. Model predictive control and its application in agriculture: A review, *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 151, 2018, 104-117, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.06.004>.

20. Chan-Woo Jeon, Hak-Jin Kim, Changho Yun, MinSeok Gang, Xiongzhe Han. An entry-exit path planner for an autonomous tractor in a paddy field,

Computers and Electronics in Agriculture, Volume 191, 2021, 106548, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106548>.

21. Ángel Madridano, Abdulla Al-Kaff, David Martín, Arturo de la Escalera. Trajectory planning for multi-robot systems: Methods and applications, Expert Systems with Applications, Volume 173, 2021, 114660, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114660>.

22. Ning Wang, Xi Yang, Tianhai Wang, Jianxing Xiao, Man Zhang, Hao Wang, Han Li. Collaborative path planning and task allocation for multiple agricultural machines, Computers and Electronics in Agriculture, Volume 213, 2023, 108218, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108218>.

23. Zhixin Yao, Chunjiang Zhao, Taihong Zhang. Agricultural machinery automatic navigation technology, iScience, Volume 27, Issue 2, 2024, 108714, <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.108714>.

24. Binbin Xie, Yucheng Jin, Muhammad Faheem, Wenjie Gao, Jizhan Liu, Houkang Jiang, Lianjiang Cai, Yuanxiang Li. Research progress of autonomous navigation technology for multi-agricultural scenes, Computers and Electronics in Agriculture, Volume 211, 2023, 107963, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107963>.

Експлуатація машин і обладнання: навчально-методичний комплекс за ред. І.М. Бендери / [І.М. Бендера, В.П. Грубий, П.І. Роздорожнюк та ін.]. – Кам'янець-Подільський: ФОП Сисин Я.І., 2013. – 576 с.

## **ДОДАТКИ**