

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КАЛНАГУЗ ОЛЕКСІЙ МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 631.171:631.3.075

ДИСЕРТАЦІЯ

**МОДЕЛЮВАННЯ КРИВОЛІНІЙНОГО РУХУ ПОЛЬОВИХ
АГРЕГАТІВ ЗІ ВСІМА КЕРОВАНИМИ КОЛЕСАМИ**

05.05.11 – Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва

Галузь знань – технічні науки

G11(133) – Галузеве машинобудування

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____О.М. Калнагуз
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник: **Мельник Віктор Іванович**, доктор технічних наук, професор кафедри агроінженерії Державного біотехнологічного університету.

АНОТАЦІЯ

Калнагуз О.М. Моделювання криволінійного руху польових агрегатів зі всіма керованими колесами. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук спеціальності 05.05.11 – Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва. (технічні науки) – Центральноукраїнський національний технічний університет. Міністерство освіти і науки України. Кропивницький, 2026.

Дисертаційна робота висвітлює питання криволінійного руху енергетичного засобу та його дослідження. Основні дослідження були присвячені вивченню кінематики руху центра ваги енергетичного засобу. Отримані результати можуть бути використані для будь-якого енергетичного засобу.

Багато науковців вітчизняних та закордонних займались вивченням питання кінематики руху чотирьохколісних енергетичних засобів, роботів та автомобілів. Тенденції останніх наукових статей присвячені питанням економії палива, поліпшенню робочих умов водія та збільшення показників надійності. При дослідженні роботи в складних умовах енергетичного засобу: на складних рельєфах, надвологих ґрунтах малої густини, на крутих схилах, з'являються ще багато недосліджених питань науковцями. І одне з таких питань є кінематика криволінійного переміщення трактора та формування його траєкторії під впливом різних чинників. Під час руху енергетичного засобу обов'язково присутній криволінійний поворот (рух). Існує багато видів поворотів. На повороті на колісний трактор діють зовнішні сили, які створюють «пасивний поворот» без впливу керування водія. Ці явища впливають на проектування нових енергетичних засобів та дослідження їх. Тому дана дисертаційна робота і досліджує важливу наукову тематику – криволінійний рух енергетичного засобу.

Траєкторія криволінійного переміщення машинно-тракторного агрегату (МТА) суттєво відрізняється від руху по прямій. Питання кінематики руху енергетичних засобів набагато складніше і потребує дослідження багатьох впливаючих чинників на стабільність, надійність, керованість.

Сучасні енергетичні засоби розвертаються обертанням керованих коліс, так званим, кінематичним способом, паралельним площині руху відносно рами трактора. Широке використання мають чотириколісні трактора та машини з передньою керуючою рамою. Тому дослідженню підлягає в даній дисертації формули коліс 4К2 і 4К4 тракторів. При дослідженні руху енергетичного засобу по кривим траєкторіям необхідно одержати аналітичні рівняння для ділянок входу та виходу з повороту та повороту зі сталим курсовим кутом.

Передумовами створення рівнянь траєкторії несталого руху є два основних чинника. Один відповідає за впровадження автоматизації керування польовим агрегатом під час здійснювання операцій вирощування культур. На даний час такі спроби відтворюються агрегатом по траєкторіям паралельним першій прямій лінії оброблювального краю поля. Прикладаються також зусилля автоматизувати розвороти при виконанні робочих циклів. Для повної автоматизації руху агрегату без тракториста на протязі всього часу роботи щодо першої лінії, необхідні дані про точне місцерозташування МТА. Траєкторія керування є задана лінія точного переміщення енергетичного засобу – теоретична відображаюча залежність руху по кривим для будь-яких умов зміни положення.

В порівнянні з великими полями, при здійснюванні сільськогосподарських робіт на маленьких полях суттєву частину від всього обсягу робіт займає криволінійних рух (розвороти). При роботі агрегату на полі розвороти займають десятки кілометрів шляху та входять до непродуктивних втрат, і потребують досконалого вивчення. На ущільнених,

деформованих площах полів (розворотних ділянок) маємо зменшення показників родючості. Раціоналізація криволінійного руху польового агрегату не повністю досліджена в наукових працях, тому вивчення економічних показників ефективності використання МТА все більш актуальне.

Часто шлях робочих циклів та шлях на поворотах з вимкненими робочими органами має криволінійну форму. Він повинен бути найменшим та економним. Вибір виду переміщення агрегату під час виконання операцій, повинен забезпечити виконання якісно вимог до роботи таких, як: мінімізація витрат на одиницю зробленої роботи з максимальними показниками продуктивності, забезпечення безпеки роботи механізатора; зменшення шкоди навколишньому середовищу. В комплексі це все основна задача кінематики руху польового агрегату.

Головною ціллю дисертаційної роботи є підвищення показників ефективності експлуатації машинно-тракторного агрегату при виконанні технологічних операцій вирощування сільськогосподарських культур шляхом дослідження і моделювання траєкторії криволінійного руху агрегату зі всіма керованими колесами.

В дисертації зроблений аналіз досліджень публікацій та наукових праць криволінійного переміщення енергетичних засобів. В працях сучасних науковців прослідковується намагання описати відтворення криволінійного руху математичними рівняннями, як проекції на осі координат швидкості, але без розв'язання.

В даній роботі створений метод аналітичного рішення рівнянь диференційної форми криволінійного руху польових агрегатів. Для ділянок (вхід та вихід) повороту з несталим кутом повороту керуючих коліс центру маси енергетичного засобу зі всіма керуючими колесами були виведені математичні залежності визначення параметрів траєкторії. Ці рівняння дають можливість проводити аналіз характеристик показників під час повороту

МТА різних конфігурацій для зниження витрат; моделювати маневри агрегатів при виконанні операцій вирощування культур; для автоматизації управління. Розроблені аналітичні рівняння забезпечують вибір раціонального способу руху енергетичного засобу в залежності від складу МТА.

Також були проведені дослідження аналітичних рівнянь енергетичного засобу по кривим траєкторіям, відтворений чисельний розв'язок рівнянь на прикладі модельного енергетичного засобу з колісною схемою 4х4. Змодельовані траєкторії за допомогою створеної математичної моделі можуть бути використані для створення програм автоматизації переміщення польовим агрегатом по кривим траєкторіям.

Ключові слова: модельний енергетичний засіб, рух по кривим, траєкторія маневру руху, кут коліс повороту, кут рами повороту енергетичного засобу, вхід в лівий (правий) та вихід з лівого (правого) повороту, рівняння траєкторії, коефіцієнт використання часу зміни, коефіцієнт використання робочих ходів, витрата палива, продуктивність.

ABSTRACT

Kalnahuz A.H. Modeling of curvilinear motion of field aggregates with all steerable wheels. – Qualification scientific work submitted as a manuscript.

The dissertation is submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Candidate of Technical Sciences in specialty 05.05.11 – Machines and Means of Mechanization of Agricultural Production (Technical Sciences) – Central Ukrainian National Technical University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kropyvnytskyi, 2026.

The dissertation addresses the issues of curvilinear motion of a power unit and its investigation. The main research is devoted to the study of the kinematics of motion of the power unit's center of mass. The obtained results can be applied to any type of power unit.

Many domestic and international researchers have investigated the kinematics of motion of four-wheeled power units, robots, and automobiles. Recent scientific publications primarily focus on fuel efficiency improvement, enhancement of driver working conditions, and increasing reliability indicators. When studying the operation of power units in difficult conditions: on complex terrain, wet soils of low density, steep slopes, there are still many questions that have not been researched by scientists. One of these unresolved problems is the kinematics of curvilinear motion of a tractor and the formation of its trajectory under the influence of various factors. During the operation of a power unit, curvilinear turning (motion) is inevitably present. There are numerous types of turning maneuvers. During a turn, external forces act on a wheeled tractor, which may induce a so-called «passive turn» without direct input from the driver's steering control. These phenomena significantly affect both the design of new power units and the methodologies used for their analysis. Therefore, this dissertation is devoted to the investigation of an important scientific problem – the curvilinear motion of an agricultural power unit.

The trajectory of curvilinear motion of a machine-tractor aggregate (MTA) differs significantly from straight-line motion. Issues related to the kinematics of power units are considerably more complex and require investigation of many influencing factors affecting stability, reliability, and controllability.

Modern power units perform turning maneuvers by rotating the steerable wheels using the so-called kinematic steering method, in which the wheels are oriented parallel to the plane of motion relative to the tractor frame. Four-wheeled tractors and machines with a front steering frame are widely used. Therefore, this dissertation focuses on the investigation of tractors with 4K2 and 4K4 wheel configurations. When studying the motion of a power unit along curvilinear trajectories, it is necessary to obtain analytical equations for the entry into and exit from a turn, as well as for turning with a constant heading angle.

The prerequisites for developing trajectory equations for non-steady motion are based on two main factors. The first factor is related to the implementation of automated control of a field aggregate during crop production operations. At present, such attempts are realized by guiding the aggregate along trajectories parallel to the initial straight line of the cultivated field edge. Efforts are also being made to automate turning maneuvers during the execution of working cycles. For full automation of aggregate motion without a tractor operator throughout the entire working process relative to the initial reference line, accurate data on the exact position of the MTA are required. The control trajectory represents a predefined line of precise motion of the power unit, serving as a theoretical representation of curvilinear motion under any conditions of positional change.

In comparison with large fields, when agricultural operations are performed on small fields, curvilinear motion (turning maneuvers) constitutes a significant portion of the total amount of work. During field operation of the aggregate, turning maneuvers account for tens of kilometers of travel distance and are classified as non-productive losses, thus requiring thorough investigation. On compacted and deformed field areas, particularly headlands (turning zones), a

reduction in soil fertility indicators is observed. The rationalization of curvilinear motion of field aggregates has not been sufficiently investigated in scientific studies; therefore, the analysis of economic efficiency indicators of MTA utilization is becoming increasingly relevant.

The way of working cycles and the way during turns with disengaged working implements often have a curvilinear shape. They should be as short and as economical as possible. The choice of the aggregate's mode of motion during the performance of operations should ensure that work requirements are met, such as: minimizing costs per unit of completed work while achieving maximum productivity, ensuring operator safety; reducing environmental impact. Taken together, these aspects represent the main task of the kinematics of field aggregate motion.

The primary objective of the dissertation is to improve the operational efficiency of a machine–tractor aggregate during the performance of technological operations in agricultural crop production by investigating and modeling the trajectory of curvilinear motion of an aggregate equipped with fully steerable wheels.

The dissertation presents an analysis of published studies and scientific works devoted to the curvilinear motion of power units. In the works of contemporary researchers, there is an effort to describe curvilinear motion using mathematical equations in the form of velocity projections onto coordinate axes; however, these equations are often presented without being solved.

In this study, a method for the analytical solution of differential-form equations describing the curvilinear motion of field aggregates is developed. For the turning sections (entry and exit) with a non-steady steering angle of the center of mass of a power unit equipped with fully steerable wheels, mathematical relationships for determining trajectory parameters are derived. These equations make it possible to analyze performance characteristics during turning of MTA s with different configurations in order to reduce operating costs, to model aggregate

maneuvers during crop production operations, and to enable automation of control. The developed analytical equations provide a basis for selecting a rational mode of motion of the power unit depending on the composition of the MTA.

In addition, analytical equations describing the motion of the power unit along curvilinear trajectories were investigated, and a numerical solution of these equations was implemented using a model power unit with a 4×4 wheel configuration as an example. The trajectories simulated using the developed mathematical model can be applied in the development of automation programs for controlling the motion of field aggregates along curvilinear trajectories.

Keywords: model power unit, curvilinear motion, maneuvering trajectory, wheel steering angle, power unit frame articulation angle, entry into a left (right) turn and exit from a left (right) turn, trajectory equation, shift time utilization coefficient, working pass utilization coefficient, fuel consumption, productivity.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України та у інших наукових виданнях.

1. Довжик М.Я., Соларьов О.О., **Калнагуз О. М.**, Таценко О.В. (2019). Спосіб врахування відводу коліс при визначенні траєкторії криволінійного руху трактора. Вісник Сумського НАУ. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів, (1-2(35-36), 25-29..
<https://doi.org/10.32845/msnau.2019.1-2.5>

(Здобувачем розроблені аналітичні рівняння в параметричній формі координат x та y центру тяжіння енергетичного засобу з передніми керованими колесами окремо для ділянок: входу в поворот і виходу з повороту енергетичного засобу. Проведений розв'язок рівнянь траєкторії криволінійного руху в інтегральній формі через розкладання функцій $\cos$ і $\sin$ в ряди Маклорена. Введені коефіцієнти інтенсивності повороту передніх коліс, які можуть враховувати відведення коліс. На прикладі трактора МТЗ-80 з використанням отриманих рівнянь побудовані графіки траєкторії центру ваги трактора без урахування відведення та з урахуванням відведення передніх коліс, на якому наочно зображено відхилення траєкторії енергозасобу від початкової під впливом відведення передніх коліс).

2. Довжик М.Я., Сіренко Ю.В. & **Калнагуз О.М.** (2022). Аналіз кінематики руху польових агрегатів зі всіма керованими колесами. Вісник Сумського НАУ. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів, 2(48), 14-20. <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.2.3>

(Здобувачем проведений аналіз наукових досліджень праць вітчизняних та закордонних науковців зі створення математичних рівнянь криволінійного руху польового агрегату).

3. Зубко В.М., Сіренко Ю.В., **Калнагуз О.М.** (2023). Використання алгоритмів під час моделювання маневрів польовими агрегатами. Вісник

Сумського НАУ. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів, (3 (53), 32-39. <https://doi.org/10.32782/msnau.2023.3.6>

(Здобувачем проведени моделювання маневрів польового агрегату на базі енергетичного засобу на розворотній полосі з використанням запропонованих математичних рівнянь для криволінійного руху, які дозволять підвищити його ефективність (продуктивність) використання).

Статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus.

4. Dovzhik M., **Kalnaguz A.**, Sirenko Yu. Curvilinear movement of a four-wheel machine using a satellite navigation system. Scientific Horizons. 2020, (07), pp.126-136. <https://doi.org/10.33249/2663-2144-2020-92-7-126-135>

(Здобувачем проведений експеримент відтворення криволінійних траєкторій з використанням супутникової навігаційної системи під час виконання маневрів (лівого та правого поворотів) на транспортному засобі з передніми керованими колесами. Виконана статистична оцінка координат траєкторії на відповідність експерименту до моделювання криволінійного руху).

Тези і матеріали конференцій.

5. **Калнагуз О.М.**, Довжик М.Я., Сіренко Ю.В. Визначення координат центру колової траєкторії грушоподібного розвороту МТА // Збірник тез VI Всеукраїнської науково-практичної конференції. Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу с.-г. машин і знарядь. (2–3 квітня 2020 року).– Житомир, 2020.–с. 310. (с. 95–98).

6. **Калнагуз О.М.**, Сіренко Ю.В. Отримання траєкторії повороту експериментальним шляхом. Технічне забезпечення інноваційних технологій в АПК: матеріали I Міжнар. наук.-практ. конференції молодих учених

(Мелітополь, 01-26 лютого 2021 р.) / ТДАТУ: ред. кол. В.М. Кюрчев, В.Т. Надикто, [та ін.]. - Мелітополь: ТДАТУ, 2021. - 229 с. (с. 213).

7. **Калнагуз О.М.,** Сіренко Ю.В. Системи автоматичного керування рухом польових агрегатів. Сучасні проблеми землеробської механіки: матеріали XXII Міжнар. наук.-практ., присвяченої 121-й річниці з дня народження академіка П. М. Василенка, 16-18 жовтня, 2021 р., м. Ніжин/ Міністерство освіти і науки України. – Київ: НУБіП, 2021. – 370 с. (с. 90-94)

8. **Калнагуз О.М.,** Сіренко Ю.В. Раціональний поворот – один із шляхів підвищення продуктивності роботи МТА. Збірник тез доповідей XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки» (10-12 листопада 2021 р.), - Кропивницький: ЦНТУ, 2021.- с. 205, (с. 123–124).

9. **Калнагуз О.М.,** Сіренко Ю.В., Соларьов О.О., Мартинюк А.В., Марченко М.В. Траєкторія криволінійного руху трактора. Технології XXI сторіччя: Збірник тез за матеріалами 27-ої міжнародної науково-практичної конференції (24-26 листопада 2021 р.). Ч.1. – Суми-Одеса: СНАУ, 2021 - 235 с. – С. 39-40.

10. **Калнагуз О.М.,** Сіренко Ю.В., Горовий М.В. Вивчення криволінійного руху агрегату. Технічне забезпечення інноваційних технологій в АПК: матеріали III Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференції (01-26 листопада 2021 р.) / ТДАТУ: ред.кол. В.М. Кюрчев, В.Т. Надикто [та ін.]. - Мелітополь: ТДАТУ, 2021. - 657 с. (С.351-353).

11. **Калнагуз О.М.,** Довжик М.Я., Соларьов О.О., Сіренко Ю.В. Сучасні системи автоматичного керування агрегатами Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасна інженерія агропромислових і харчових виробництв» (25–26 листопада 2021 року). – Харків: ДБТУ, 2021. – 263 с. (с.123-125).

12. **Калнагуз О.М.,** Довжик М.Я., Сіренко Ю.В. Продуктивність машинних агрегатів. Матеріали міжнародної науково-практичної

конференції «Сучасна інженерія агропромислових і харчових виробництв» (25–26 листопада 2021 року). – Харків: ДБТУ, 2021. – 263 с. (с.125-128).

13. **Калнагуз О.М.,** Зубко В.М., Довжик М.Я., Баличев Є.В. Огляд теоретичних досліджень криволінійного руху агрегату // Збірник тез доповідей XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки» (10-12 листопада 2021 р.), – Кропивницький: ЦНТУ, 2021.- с. 205, (с. 40–42).

14. **Калнагуз О.М.,** Семерня О.В., Сіренко Ю.В. Дослідження руху криволінійного руху машинно-тракторного агрегату // Збірник тез доповідей XXIII Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (16–18 жовтня 2022 року). МОН України, НУБіП України, Житомирський агротехнічний фаховий коледж. Київ. Житомир. 2022. 289 с. (с. 24-27).

15. **Калнагуз О.М.,** Сіренко Ю.В., Горовий М.В., Семерня О.В., Сілюченко В.М. Дослідження кінематики машинно-тракторних агрегатів // Збірник тез доповідей Міжнародної. наук.-практ. конференції (Запоріжжя, 01-25 листопада 2022 р.) / ТДАТУ: ред. кол. С. В. Кюрчев, В. М. Кюрчев, В. Т. Надикто, О. Г. Скляр [та ін.]. – Запоріжжя: ТДАТУ, 2022. 239 с. (с. 56-59).

16. **Калнагуз О.М.,** Сілюченко В.М. Поворот енергетичного засобу та способи його виконання // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Автомобільний транспорт в аграрному секторі: проектування, дизайн та технологічна експлуатація». – (1-2 грудня 2022 року) Харків: ДБТУ, 2022. – 189 с. (с. 159-160).

17. **Калнагуз О.М.,** Довжик М.Я. Дослідження та удосконалення енергетичних засобів. Збірник праць учасників міжнародної науково-практичної конференції «100-річчя Поліського національного університету: здобутки, реалії, перспективи». – (1 листопада 2022 р.) Житомир: Поліський національний університет, 2022. 680 с. (с. 671-674).

18. **Калнагуз О.М.** Траєкторія руху агрегату по полю/ Калнагуз О.М., Сіренко Ю.В. // Збірник тез доповідей XXIV Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–19 жовтня 2023 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 2023. 450 с (с. 315-317).

19. **Калнагуз О.М.** Кінематика руху складного агрегату / О.М. Калнагуз, Ю.В. Сіренко // Збірник тез IX Міжнародної науково-практичної конференції. «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу с.-г. машин і знарядь». (5 квітня 2023 року).– Житомир, 2023. 336 с. (С.73-74).

20. **Калнагуз О.М.** Рух енергетичного засобу по полю та способи його повороту/ О.М. Калнагуз // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Експлуатаційна та сервісна інженерія» «AutoTRAK-2023» . (4-5 травня 2023 року).– Київ: НУБіП України, 2023. – 193 с. (С.30-32).

21. **Калнагуз О.М.** Супутникові технології у сільському господарстві / Груць О.А., Сіренко Ю.В., Горовий М.В., Калнагуз О.М.// Матеріали Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–19 жовтня 2024 року) / МОН України, НУБіП України. Київ. 2024. 527с. – (с. 220–223).

22. **Калнагуз О.М.** Системи авторозвороту / Пилипенко І.І., Сіренко Ю.В., Горовий М.В., Калнагуз О.М. // Матеріали Міжнар. наук.-практ. "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–19 жовтня 2024 року) / МОН України, НУБіП України. Київ. 2024. 527с. – (с. 230–233).

23. **Калнагуз О.М.** Аналіз систем розумного землеробства / Харченко Ф.М., Калнагуз О.М., Пилипенко І.І. // Матеріали Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–19 жовтня 2024 року) / МОН України, НУБіП України. Київ. 2024. 527с. – (с. 233–236).

ЗМІСТ

ВСТУП.....	19
РОЗДІЛ 1 СТАН ПИТАННЯ КІНЕМАТИКИ КРИВОЛІНІЙНОГО РУХУ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ЗАСОБУ ЗІ ВСІМА КЕРОВАНИМИ КОЛЕСАМИ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	33
1.1 Дослідження кінематики криволінійного руху колісних машин.....	33
1.2 Аналіз, переваги та недоліки математичних моделей криволінійного руху.....	36
1.3 Поворот - один із складних елементів криволінійного руху.....	47
1.4 Аналіз сучасних систем з автоматичним управлінням енергетичних засобів.....	52
1.5 Висновки по розділу 1.	65
Список використаних джерел до розділу 1.....	68
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ТРАЄКТОРІЇ КРИВОЛІНІЙНОГО РУХУ ЧОТИРЬОХКОЛІСНОГО ЕНЕРГОЗАСОБУ З УСІМА КЕРОВАНИМИ КОЛЕСАМИ.....	76
2.1 Дослідження закономірностей кінематичних параметрів енергетичного засобу криволінійного руху.....	76
2.2 Отримання математичних рівнянь траєкторії руху маневрів для енергетичних засобів.....	79
2.3 Придатність (універсальність) отриманих рівнянь для прямолінійного руху.....	83
2.4 Коловий рух енергетичного засобу зі всіма керованими колесами...	84
2.5 Приклади моделювання маневрів за допомогою отриманих універсальних рівнянь криволінійного руху.....	89
2.5.1 Лівий поворот.....	89
2.5.2 Правий поворот.....	102
2.5.3 Крабовидний маневр.....	111

2.6 Висновки по розділу 2.....	117
Список використаних джерел до розділу 2.....	120
РОЗДІЛ 3 ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ТРАЄКТОРІЇ РУХУ МОДЕЛЬНОГО ЕНЕРГЕТИЧНОГО ЗАСОБУ.....	123
3.1 Методика проведення моделювання грушоподібного розвороту з використанням передньої вісі в лабораторних умовах.....	123
3.2 Методика використання GPS навігації для отримання траєкторії петлеподібного розвороту модельного енергетичного засобу зі всіма керованими колесами в польових умовах.....	131
3.3 Методика проведення статистичної оцінки на відповідність координат змодельованих траєкторій маневрів модельного енергетичного засобу зі всіма керованими колесами до координат спряжених траєкторій, отриманих в польових умовах з використанням GPS навігації.....	133
3.4 Висновки по розділу 3.....	141
Список використаних джерел до розділу 3.....	144
РОЗДІЛ 4 ПЕРЕВІРКА АДЕКВАТНОСТІ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ КРИВОЛІНІЙНОГО РУХУ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ЗАСОБУ ЗІ ВСІМА КЕРОВАНИМИ КОЛЕСАМИ.....	147
4.1 Петлевидний розворот модельного енергетичного засобу - маневр 1.....	147
4.1.1 Ділянки-повороти розвороту маневру 1.....	147
4.2 Петлевидний розворот модельного енергетичного засобу - маневр 2..	156
4.2.1 Ділянки-повороти розвороту маневру 2.....	156
4.3 Крабовий маневр 3 на прикладі модельного енергетичного засобу зі всіма керованими колесами в лабораторних умовах.....	162
4.3.1 Ділянки-повороти розвороту маневру 3.....	162

4.4 Застосування GPS-навігації при отриманні відтворених маневрів модельного енергетичного засобу.	166
4.5 Висновки по розділу 4.....	181
Список використаних джерел до розділу 4.....	183
РОЗДІЛ 5 ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ АЛГОРИТМІВ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВОДІННЯ АГРЕГАТІВ.....	185
5.1 Вивчення класичних методик розрахунку техніко- експлуатаційних показників.....	185
5.2 Застосування запропонованого методу моделювання для виконання різних маневрів польовим агрегатом в складі: трактора (Claas Xerion 5000 Trac) і борони (Lemken Gigant 10/1200 Heliodor).....	187
5.2.1 Результат моделювання кожної ділянки маневру 1 – петлевидний розворот з передніми керованими колесами.....	188
5.2.2 Результат моделювання кожної ділянки маневру 2 – петлевидний розворот зі всіма керованими колесами.....	196
5.3 Висновки по розділу 5.....	208
Список використаних джерел до розділу 5.....	209
ВИСНОВКИ.....	214
ДОДАТКИ.....	217
Додаток А Технічні характеристики модельного енергетичного засобу MANITOU MLX-X 735-120 LSU SERIE 6-E3.....	218
Додаток Б Технічні характеристики трактора Claas Xerion 5000 TRAC	219
Додаток В Технічні характеристики борони LEMKEN Gigant Heliodor	221
Додаток Г Критичні значення χ^2 - розподілу Пірсона χ ($\alpha; \gamma$) для рівнів значущості α та γ ступенів.....	222

Додаток Г Показники експлуатації машинно-тракторного парку..... 223

Додаток Д Список публікацій здобувача за темою дисертацій..... 231

Додаток Е Акт впровадження.....236

Додаток Є Акт впровадження СТОВ «Вікторія»..... 238

Додаток Ж Акт впровадження в навчальний процес СНАУ.....240

ВСТУП

Актуальність теми. Тракторний агрегат – це основний тяговий енергетичний засіб для широкого використання в господарчих сферах діяльності. Всі існуючі трактори поділяються на гусеничні та колісні. І в цьому їхня найголовніша відмінність, тому що в інших, наявних у них технічних характеристиках, вони постійно прагнуть зблизитися і оволодіти здібностями свого оппонента. Іншими словами, розробники тракторної техніки працюють над зменшенням кількості недоліків у кожній окремо взятій категорії тракторів та над додаванням до вже наявних нових можливостей [1]. Завдяки меншій металоємності та простоті в обслуговуванні перевагу мають колісні трактори перед гусеничними. Колісні трактори не пошкоджують дорожніх покриттів, легші від гусеничних за однокової потужності, значно комфортніші умови праці водіям, але основний чинник - вони дешевші, простіші в ремонті та з меншими працезатратами. Та колісні трактори і мають недоліки перед гусеничними: ранньою весною на полях менша прохідність, на пересічній місцевості менша стійкість, маневреність, продуктивність та і відповідно тяговий коефіцієнт. Універсальність чотириколісних тракторів полягає в придатності до використання в будь-яку пору року не тільки на полях, а і на господарствах та виробництвах. Саме тому загальне виробництво світової кількості колісних тракторів майже 90%.

Споживач сучасності експлуатує колісні трактори в залежності від виду виконаної роботи. І не завжди трактори відповідають попереднім вимогам до експлуатації, тому потребують деякі удосконалення.

При виконанні робіт в польових умовах агрегати, в складі машина-трактор, рухаються по складним траєкторіям маневрів: прямолінійними ділянками та криволінійними зі змінною кривизною. Переміщення енергетичних засобів по прямим траєкторіям можна розглядати як один з

випадків криволінійного руху, але з нульовою кривизною (нескінченості дорівнює радіус кривизни траєкторії) [3].

Рух по кривим траєкторіям МТА значно розбігається від руху по прямій. Створюються значно складні умови кінематики і динаміки роботи агрегату при цьому. Фактори, які виникають і впливають на рух (керованість, надійність, стійкість), потребують додаткового вивчення. Тому вивчення руху МТА по кривим траєкторіям має вагоме значення для практики.

Започаткував вивчення криволінійного руху Жуковський Н.Є. на податку XVIII століття для колісної машини. Продовжували досліджувати теорію повороту для колісних машин з переднім ведучим мостом Чудаков Я.М. та Пензлер Я.М. Вони розглядали взаємодію жорсткого колеса з опорною площадкою не враховуючи ковзання коліс. Спрощена модель машини на повороті з жорсткими колесами керування отримала застосування на початку проєктування. Модель мала багато неврахованих факторів: пружні властивості шин, проковзування коліс, навантаження на гаку, розташування центра мас поздовжньо, але вона була базовою для подальшого розвитку теорії про поворот машини колісної з колесами керування.

Багато наукових робіт присвячено дослідженню криволінійного руху вченими: В.І. Піддубним, В.Я. Аніловичем, Ю.Т. Водолажченком, С.М. Григорьевим, І.Є. Кавчинським, Б.Я. Татьянченко, М.Я. Довжик, А.Т. Лебедев, А. Коробко, М.А. Подригайло, О.А. Бобошко, Є.І. Калінін та інші. В праці [4] наведені результати математичної моделі для моделювання руху з оптимізацією під час виконання технічних операцій конструкційних параметрів. В наукових роботах [5; 6] розглядається та досліджується кінематика опори з довільним розташуванням колеса чи гусениці з визначенням швидкості руху миттєвого центру. Є також наукові роботи присвячені розгляду взаємодії колеса з ґрунтом на розвороті [7, 8].

Узагальнена теорія переміщення колісних енергетичних засобів наведена в праці [6].

У підручниках значна частина розрахунків присвячена такій рисі тракторів, як маневреність, що є однією із важливих експлуатаційних властивостей цих агрегатів. Саме маневреність визначає ефективність їх використання. Керування поворотом трактора може здійснюватися як у сталій стадії, так і в перехідних етапах, тобто при вході і виході його з повороту. Основним маневром трактора в роботі, що здійснюється МТА, є розворот агрегату та заїзд на поле для нового проходу. Ширина поворотної смуги повинна бути мінімальною.

Детально розглянута властивість колісної машини здійснювати повороти по траєкторіях якомога більшої кривизни за мінімально можливою площею на опорній поверхні, яка має назву повороткість [3].

Описано і математично доведено розрахунки мінімального радіусу повороту, який є показником статичної повороткості трактора. Цей показник найбільш важливий, але не дає вичерпної характеристики повороткості. У ряді випадків має значення не тільки сам факт повороту трактора з певним радіусом, а й те, за який час і на який кут зможе повернутися трактор, або наскільки знизиться його швидкість в процесі повороту в порівнянні з прямолінійним рухом.

Найбільш небезпечними етапами виконання повороту є вхід і вихід з повороту. Ці етапи, на відміну від сталої фази (при постійній кутовій швидкості трактора), характеризуються виникненням кутового прискорення машини у площині дороги. Одним із критеріїв керованості є стійкість руху тракторів [3]. В навчальній літературі [9] спостерігаються спроби визначення траєкторій повороту графічними способами.

Велика кількість робіт науковців розглядають та досліджують криволінійний рух машини, але можна зазначити, що це питання потребує ще подальшого вивчення. Мало, в аналізованих нами джерелах, зустрічається

математичних рівнянь для визначення траєкторії руху енергетичного засобу, які прості та придатні для використання на практиці для створення відповідних програм управління рухом колісної машини, польовими агрегатами, енергетичними засобами.

Багатьма науковцями наведена математична модель з застосуванням диференціальних рівнянь механіки з врахуванням силової взаємодії машини з оточенням, але без рішення, так як задача складна. Зокрема деякі отримані траєкторії руху, не мають належного підґрунтя [10], і тому закінчуються створенням рівнянь без розв'язку. Для прикладу, робота [11] використовує теореми для кількості і моменту руху центру мас трактора в проекціях на осі координат для створення узагальненої системи рівнянь руху трактора. Результатами математичної моделі руху трактора по кривим траєкторіям є графіки кутової швидкості, швидкості руху від часу і траєкторії переміщення, але без розв'язку вихідних диференціальних рівнянь. Автором розроблений алгоритм роботи системи автоматизації управління переміщенням енергетичного засобу керуючись зміною кутів повороту коліс керування. Це дає можливість компенсувати відхилення від траєкторії керування під дією відведення, юза, ковзання.

В праці [12] розглянута залежність траєкторії руху по кривим під час повороту з передніми та задніми колесами керування з ламаною віссю від кінематичних параметрів, але сама траєкторія не наведена.

Автор в науковій праці [13] досліджує, під час руху по кривим траєкторіям енергетичного засобу МТЗ-80 зі спареними колесами, його тягово-зчіпні властивості. Підвищити продуктивність польового агрегату та зменшити небажаний вплив на механіко-технологічні властивості ґрунту під колесами, зменшити тиск під рушіями та поліпшити тягові властивості можливо завдяки цьому. Під час складання математичної моделі автор використовував три рівняння Лагранжа в диференціальній формі, але кінематичні параметри (пройдений шлях, час) і енергетичні показники

(витрати палива, навантаження тягове та інші) визначалися тільки з експериментальних даних.

Криволінійний рух полягає в непаралельному переміщенні точок тіла, і відповідно, різні параметри кінематичні і динамічні їх траєкторій руху. Значно завантажуються механізми, частини машини під час роботи. Утворюються додаткові зовнішні сили (моменти опору повороту, бокові, вертикальні і поздовжні) та випадкові, які спричиняють перевантаження систем керування і деталей, і механізмів керування. Під час повороту ускладнюється закон зміни їх від часу та миттєво збільшуються кути повороту коліс керування енергетичного засобу, спадає стійкість і керованість трактора із заданою кривизною. Всі ці фактори можуть бути ускладнені і кваліфікацією водія і залежать від його досвіду в екстремальних ситуаціях.

Радіус мінімальний траєкторії повороту, відповідна швидкість, сила тяги, час, витрачений на поворот – це економічні показники енергетичного засобу руху по кривим траєкторіям, які взаємопов'язані. Поворотливість краща польового агрегату при меншому радіусі повороту, але тоді втрачається стійкість і виникає можливість втрати керованості. А керованість, в свою чергу, залежить від витрат енергії на пальне, людських ресурсів на здійснення повороту. Важливим показником роботи колісного трактора є сила тяги. Зменшення значення цього показника забезпечує зменшення витрат потужності під час роботи двигуна. Під час повороту необхідно раціонально застосовувати силу зчеплення, яка забезпечується коефіцієнтом зчеплення коліс: відношення сил (зчеплення та сумарної) до сили тяги зчеплення. Забезпечення більшого показника цього коефіцієнту надає можливість енергетичного засобу здійснювати криволінійний рух, достатню повороткість та керованість.

Традиційно дослідники під час розробки математичної моделі дисертаційного дослідження беручи до уваги все більше і більше врахування

початкових параметрів, аргументують тим, що саме їхня модель дає більшу точність отриманим математичним залежностям. Але це не завжди так. Шляхом аналізу криволінійного руху енергозасобу встановлено, що основний вплив на формування траєкторії відіграє обмежена кількість параметрів (20%), у той час як більшість інших чинників (80%) мають мінімальний, або другорядний вплив.

Метою дисертаційного дослідження було створення та розробка малоресурсоемкісної математичної моделі криволінійного руху керування чотирьохколісним енергетичним засобом зі всіма керованими колесами. Під поняттям «малоресурсоемкісна математична модель» мається на увазі в обчислювальному сенсі, яка використовує найменшу кількість впливових кінематичних параметрів агрегату з базовим програмним забезпеченням, але при цьому реалізує достатню точність придатності даної математичної моделі на практиці. Це дозволяє спростити математичну модель без втрати в точності результату.

Під час досліджень спиралися на принцип Парето, який стосується в однаковій мірі точності керування і величини похибки. За більшість обсягу ефекту (80%) відповідає менша кількість параметрів (20%). Аналогічно і відповідно похибка: чим більше параметрів дослідження тим більше значення похибки. Скорочення кількості параметрів за принципом Парето дає змогу отримати просту обчислювальноефективну математичну модель, яка зберігає необхідну точність результату (до 80% від максимального).

Відповідно до принципу Парето збільшення кількості кінематичних показників агрегату під час дослідження, не забезпечує більшу точність отриманих значень результатів. За більшу точність результату відповідає менша кількість впливових показників, а збільшення показників дослідження призводить до збільшення похибки придатності даної математичної моделі на практиці. Тому необхідно завжди зберігати баланс: між ймовірністю отримання великої похибки обчислень і точністю траєкторії керування.

Збільшення кількості кінематичних показників в математичній моделі збільшує складність їх визначення в початкових умовах без належної точності. Тому задачею досліджень передбачалось розробити спрощену та ефективну математичну модель криволінійного руху енергетичного засобу.

Вирішення диференціальних рівнянь чисельними методами з обчислювальними ресурсами має нескінчену можливість, але при цьому виникають і певні труднощі. Швидкодія обрахунків математичної моделі забезпечується тоді, коли модель не потребує значних обчислювальних ресурсів (процесорна потужність, оперативна пам'ять, дисковий простір, енергоспоживання та відповідно час обробки). Такий підхід дозволяє досягти оптимального співвідношення між точністю моделювання та обчислювальною складністю. Тому розробка математичної моделі криволінійного руху польового агрегату, перш за все, зорієнтована на те, щоб одержати малоресурсоємкісне математичне рівняння, яке не потребує застосування чисельних методів в процесі автоматизації керування агрегатом. Тому нами була поставлена задача проаналізуватим кінематику криволінійного руху енергетичного засобу зі всіма керованими колесами.

Зв'язок роботи з науковими темами та програмами. Дисертаційна робота виконана на базі Сумського національного аграрного університету в рамках науково-дослідної роботи кафедри агроінжинірингу: «Удосконалення технологічного процесу та технічних засобів для виробництва та переробки аграрної продукції» (НДР 0119U103235); «Формування функціональної стабільності та енергоощадних режимів експлуатації транспортно-технологічних агрегатів у аграрному виробництві, за умови змінної маси вантажу» (НДР 0124U001115, (2024 – 2028 pp)); «Обґрунтування методології синтезу технології; складу елементів машинного парку та оптимального використання ґрунтів за умови максимуму врожайності конкретної сільськогосподарської культури» (НДР 0124U001116. (2024 – 2028 pp)).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення показників ефективності експлуатації машинно-тракторного агрегату при виконанні технологічних операцій вирощування сільськогосподарських культур шляхом дослідження і моделювання траєкторії криволінійного руху агрегату зі всіма керованими колесами.

Для реалізації поставленої мети в роботі розв'язувалися наступні завдання:

- провести аналіз математичних моделей криволінійного руху енергетичного засобу зі всіма керованими колесами з метою аналітичного вирішення рівнянь криволінійного руху енергетичного засобу під час маневрів;

- розробити математичну модель нелінійного руху центра ваги енергетичного засобу зі всіма керованими колесами у функції кута повороту остова машини з урахуванням інтенсивності повороту;

- розробити методи моделювання маневрів та провести експериментальні дослідження в польових умовах для перевірки розробленої математичної моделі нелінійного руху на адекватність;

- здійснити впровадження та визначити економічних ефект під час використання запропонованих алгоритмів управління криволінійним рухом для систем автоматизації.

Об'єктом дослідження є процес криволінійного руху польового агрегату на базі енергетичного засобу зі всіма керованими колесами.

Предметом дослідження є параметри криволінійного руху енергетичного засобу зі всіма керованими колесами.

Методи дослідження. При проведенні теоретичних досліджень використовувалися методи системного та структурного аналізу, математичної статистики, які базувалися на математичному моделюванні нелінійного руху польових агрегатів з використанням теорії диференціальних рівнянь вищої математики, основних положень теоретичної механіки, теорії

машин, кінематики криволінійного руху. Експериментальні дослідження виконували в лабораторних і польових умовах відповідно до вимог діючих стандартів і розроблених методик планування експерименту. Математичне моделювання з використанням запропонованих алгоритмів для автоматичного водіння польових агрегатів та статична оцінка експериментальних досліджень проводили на персональному комп'ютері за допомогою систем комп'ютерної графіки та програми для роботи з електронними таблицями Microsoft Excel.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у моделюванні маневрів криволінійного руху машинно-тракторного агрегату з побудовою малоресурсної моделі, яка дає можливість збільшити його продуктивність:

вперше:

- розроблено універсальні аналітичні залежності криволінійного руху координат центру ваги енергетичного засобу, в тому числі зі всіма керованими колесами, з урахуванням рівномірності розподілу повороту керованих коліс для моделювання та подальшого використання в програмах автоматизації управління рухом польового агрегату;

- розроблено методи моделювання маневрів, які дають можливість використання запропонованих алгоритмів для автоматизації управління криволінійним рухом машинно-тракторних агрегатів в процесі роботи;

удосконалено:

- математичні залежності траєкторії центра ваги енергетичного засобу польового агрегату зі всіма керованими колесами для криволінійного руху, які дозволяють отримати раціональні траєкторії маневрів енергетичного засобу та підвищити ефективність роботи польових агрегатів;

отримало подальший розвиток:

- функціональні зв'язки, які описують криволінійний рух центра ваги енергетичного засобу з чотирма керованими колесами, з врахуванням інтенсивності повороту керованих коліс, що дозволило покращити

кінематичні характеристики експлуатації польових агрегатів та підвищити продуктивність;

– метод відтворення траєкторій маневрів нелінійного руху енергетичного засобу для моделювання траєкторій поворотів та розворотів польових агрегатів, що дає можливість за рахунок раціональних маневрів збільшити продуктивність роботи польового агрегату.

Практичне значення отриманих результатів.

Запропоновано новий метод моделювання траєкторії нелінійного руху центра ваги енергетичного засобу польового агрегату зі всіма керованими колесами, шляхом урахування інтенсивності повороту коліс, що дає можливість узгоджувати траєкторії його руху.

Розроблений алгоритм побудови складної траєкторії руху центра ваги енергетичного засобу, який має знижену обчислювальну ресурсоємність, дозволяє складання програм повної автоматизації при виконанні технологічних операцій машинно-тракторними агрегатами.

Застосування запропонованих алгоритмів керування дозволяє підвищити продуктивність праці та раціонального використання площі поля (за рахунок зменшення ширини розвореної смуги).

Обґрунтованість і достовірність наукових положень та отриманих результатів забезпечується підтвердженням достовірними експериментальними траєкторіями несталоного руху модельного енергетичного засобу MANITOU MLT-X 735-120 LSU всіма керованими колесами, які були відтворені за допомогою планшетного додатку та системи супутникової навігації. Статистична обробка відтворених координат та змодельованих координат, отриманих за аналітичними рівняннями математичної моделі, траєкторій маневрів на відповідність показали повну ідентичність і достатню відповідність.

Особистий внесок здобувача. Основні положення, теоретичні та експериментальні результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист

і складають наукову новизну виконаних досліджень, одержані здобувачем особисто. У публікаціях, які підготовлені за участі співавторів, особистий внесок, що належать здобувачеві, вказаний в списку опублікованих праць за темою дисертації.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались та отримали позитивні відгуки на: VI всеукраїнській наукова-практичній конференції "Перспективи розвитку і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу с.г. машин і знарядь (м. Житомир, 2-3 квітня 2020 р.); міжнародній наукова-практичній конференції молодих учених, (м. Мелітополь, 1-26 лютого 2021 р.); XXII міжнародній науковій конференції: «Сучасні проблеми землеробської механіки», присвяченої 121-й річниці з дня народження академіка П. М. Василенка, (м. Ніжин, 16-18 жовтня, 2021 р.); XIII міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки» (м. Кропивницький, 10-12 листопада 2021 р.); 27 міжнародній науково-практичній конференції "Технології XXI сторіччя" (м. Суми, 25-26 листопада 2021 р.); міжнародній III науково-практичній інтернет-конференції «Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі» (м. Мелітополь, 01-26 листопада 2021 р.); XXIII міжнародній науковій конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (м. Київ. Житомир. 16–18 жовтня 2021 р.); міжнародній науково-практичній конференції «Сучасна інженерія агропромислових і харчових виробництв» (м. Харків, 25–26 листопада 2021 року); міжнародній науково-практичній конференції «Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі» (м. Запоріжжя, 1-25 листопада 2022 р.); міжнародній науково-практичній конференції «Автомобільний транспорт в аграрному секторі: проектування, дизайн та технологічна експлуатація» (м. Харків, 1-2 грудня 2022 р.); міжнародній науково-практичній конференції «100-річчя Поліського національного

університету: здобутки, реалії, перспективи» (м. Житомир, 1 листопада 2022 р.); міжнародній науково-практичній конференції «Прогресивні технології в сільському господарстві» (м. Суми, 23-25 листопада 2022 р.); IX міжнародній науково-практичній конференції «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу с.-г. машин і знарядь» (м. Житомир, 5 квітня 2023 року); міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні аспекти розвитку автомобільного транспорту України» присвячена 30-ти річчю кафедри автомобілі та автомобільне господарство (м. Кам'янське, 16-18 травня 2023 року); міжнародній науково-практичній конференції «AutoTRAK-2023» «Експлуатаційна та сервісна інженерія». (м. Київ, 4-5 травня 2023 року); IX Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні технології в АПК» (м. Луцьк, 7-8 червня 2023 року); 6th International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange (High Tatras, Slovak Republic, June 6-9, 2023); XXV міжнародній науковій конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–19 жовтня 2024 року, НУБіП України, Київ.).

В повному обсязі дисертаційна робота обговорювалась та позитивно схвалена на науковому семінарі кафедри агроінжинірингу інженерно-технологічного факультету Сумського НАУ (м. Суми, 13 жовтня 2025 року).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковано в 23 наукових працях, у тому числі: 3 статті у спеціалізованих наукових фахових виданнях України категорії «В»; 1 стаття у науковому виданні, включеному до міжнародної науково-метричної бази даних Scopus та 19 тез у збірниках доповідей наукових конференцій.

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел з 110 найменувань і 9 додатків. Повний обсяг дисертації викладено на 240 сторінках комп'ютерного тексту (основна частина – 167 сторінок), в тому числі містить 25 рисунків, 60 таблиць.

Список використаних джерел

1. Який трактор краще. Grozber: веб-сайт. URL: <https://grozber.ua/news/kakoy-traktor-luchshe> (дата звернення: 2.02.2024).
2. Коваленко О. Гусеничний трактор створює вдвічі менший тиск на ґрунт за колісний. AgroTimes.ua: веб-сайт. URL: <https://agrotimes.ua/tehnika/gusenychnyj-traktor-stvoryuye-vdvichi-menshyj-tysk-na-grunt-za-kolisnyj/> (дата звернення: 2.02.2024).
3. Черкас В. Тракторні нюанси [Електронний ресурс] / В. Черкас // Агробізнес Сьогодні. Механізація АПК. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <https://agro-business.com.ua/agro/mekhanizatsiia-apk/item/11765-traktorni-niuanisy.html> (дата звернення: 2.02.2024).
4. Островерх О.О. Керованість та стійкість рух тракторів: навчальний посібник / О.О. Островерх, В.М. Краснокутський, Т.О. Крюкова. – Харків : Друкарня Мадрид, 2021. 156 с
5. Гецович Є.М. Дослідження маневрів ґрунтообробного агрегату в функції часу [Електронний ресурс] / Є.М. Гецович // Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів, по. 1 (39). – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <http://repo.snau.edu.ua/bitstream/123456789/8663/1/7.pdf>. (дата звернення: 2.02.2024).
6. Волков В.П., Вільський Г.Б. Теорія руху автомобіля: підручник. МОН України, ХНАДУ, МПП. – Суми : Університетська книга, 2015. – 320 с.
7. Лебедєв А.Т., Калінін Є.І., Шуляк М.Л., Колеснік І.В. Аналітична модель повороту трактора з шарнірнозчленованою рамою. Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. 2016. Вип. 173. С. 161 – 167.
8. Калінін Є.І., Кусков М.А., Бельорін-Еррера О.М. Особливості повороту шарнірно-зчленованого трактора. Сучасні інформаційні системи, 2022. № 6(1). С. 30–33. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.1.021>.

9. Трактори та автомобілі. 4.8. Практикум. Основи теорії та розрахунку тракторів і автомобілів: навч. Посібник / В.М. Антощенко, Р.В. Антощенко, М.П. Артьомов, А.Т. Лебедев // За ред. проф. А.Т. Лебедева. Х.: Факт, 2013. 260 с.

10. Гавриш В.І., Бондаренко В.О. Основи теорії розрахунку мобільних енергетичних засобів: Навч. посібник. – Миколаїв: МДАУ, 2011. – 284 с.

11. Експлуатація машин і обладнання. Електронний підручник. 1 Експлуатаційні властивості та основи раціонального комплектування машинно-тракторних агрегатів [Електронний ресурс] / С.А.Шуліка, Л.А. Дяченко, Є.К. Іванов, В.М. Кіяшко // Науково-методичний центр вищої та фахової передвищої освіти. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: https://evgivanov.github.io/expl_html_book/book/zmist_book.html. (дата звернення: 2.02.2024).

12. Melnik, V., Dovzhik, M., Tatyanchenko, B., Solarov, O., & Sirenko, Y. (2017). Аналітичний спосіб дослідження криволінійного руху чотирьохколісної машини. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3(7 (87), 59–65. <https://doi.org/10.15587/17294061.2017.101335>.

13. Довжик М.Я. Графічний спосіб визначення траєкторії криволінійного руху чотирьохколісного трактора з передніми керованими колесами / М.Я. Довжик, Б.Я. Татяниченко, О.О. Соларьов // Інженерія природокористування. - 2016. - № 1. - С. 6-9. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Iprk_2016_1_3.

14. Ярошенко П.М. (2015). Про дослідження маневрових властивостей комбінованих начіпних машинних агрегатів. Technology Audit and Production Reserves, 6(1(26), 26–30. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2015.56635>

15. Заборський В.П., Чуба В.В., Соларьов О.О. Кінематика руху та ущільнення ґрунту машинно-тракторними агрегатами: монографія / НУБіп. Київ: ТОВ "Прінтеко", 2020. ISBN 978 - 7876 - 27 - 3.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ КІНЕМАТИКИ КРИВОЛІНІЙНОГО РУХУ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ЗАСОБУ ЗІ ВСІМА КЕРОВАНИМИ КОЛЕСАМИ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Дослідження кінематики криволінійного руху колісних машин

Однією з найважливіших сучасних завдань тракторобудування є автоматизація управління агрегатами. Трактори рухаються траєкторіями, які мають як криволінійний напрямок зі змінним значенням кривизни, так і прямолінійний характер робіт сільськогосподарського призначення. Криволінійний рух (поворот) присутній у роботі будь-якої енергетичної машини. Теорія повороту налічує безліч різних моделей руху.

Слід зазначити, що процес криволінійного руху вивчений недостатньо. Істотно має відмінність криволінійного руху енергетичного засобу з технологічною робочою машиною по криволінійних траєкторіях від прямолінійного руху. Застосовується кінематичний спосіб повороту у більшості енергетичних засобів: за рахунок повороту щодо остова машини керованих коліс у площині, паралельній площині руху. Набагато складніше вивчення кінематики та динаміки криволінійного руху машин. Це потребує більш детального вивчення багатьох факторів, що впливають на керованість, стабільність та надійність руху енергетичного засобу.

Причина дослідження криволінійного руху – це впровадження практично автоматичного управління польових агрегатів (ПА) під час проведення польових операцій при вирощуванні сільськогосподарських культур.

При виконанні операцій колісними тракторами та сільськогосподарськими машинами, внаслідок збурень з боку опорної

поверхні, дії сил інерції та нахилу опорної поверхні відбувається відхилення від заданої траєкторії руху ПА. При цьому створюються похибки, відбувається збільшення шляху та підвищення витрати палива, витрата насіння та добрив. При спробах збільшити швидкість руху водій не встигає реагувати на відхилення і змушений знизити швидкість, що негативно впливає на продуктивність його роботи [20].

Забезпечення точною інформацією про положення агрегату щодо заданої траєкторії необхідне для повної автоматизації управління роботою ПА. Саме задана траєкторія руху агрегату називається траєкторією управління. Саме вона є теоретичною функцією криволінійного руху, яку необхідно отримати для будь-яких переміщень агрегату з високою точністю. Теоретичні дослідження вимагають насамперед отримання математичних рівнянь траєкторії руху під час повороту та розвороту як для агрегатів з передніми керованими колесами, так і для агрегатів зі всіма керованими колесами.

Розвороти тракторного агрегату в умовах невеликих розмірів полів, становлять значну частину загального обсягу робіт. В результаті розворотів отримуємо ущільнену, деформовану земельну площу. Фактично це втрати родючості ґрунту. Тому питання економічної ефективності оптимізації криволінійного руху тракторного агрегату має все більш практичного значення.

Залишається ще мало вивченим питання економії енерговитрат – непродуктивних витрат енергії – розворотів польових агрегатів під час роботи на полях. Дорога завдовжки багато десятків кілометрів проходить ПА під час роботи. Шлях складається з робочих циклів, які мають часто криволінійний характер, та холостих поворотів. Дуже важливо, щоб якнайменше був холостий шлях агрегату. Вибір способу руху ПА і є основним завданням кінематики та динаміки руху агрегату. З виконанням

вимог: максимальна продуктивність при найменших витратах палива та мінімальний вплив на ґрунт.

У сучасній науковій літературі робляться спроби описати криволінійний рух машини аналітичними рівняннями. Науковці присвячують багато світових наукових праць плануванню розворотів та поворотів ПА під час проведення технологічних операцій для управління агрегатами та машинами за допомогою систем автоматизації. Це дає можливість вибрати найбільш раціональний спосіб руху машини.

Завдання моделювання повороту є складання аналітичних рівнянь руху по криволінійних траєкторіях. Здійснюються роботи з автоматизації управління навісним та причіпним обладнанням, механізмами самого трактора, настав час комплексної автоматизації ПА, яка забезпечить: покращення умов роботи, якість роботи, підвищення продуктивності, скорочення витрат насіння та засобів механізації. Автоматизація управління – це база для роботизації тракторів.

Існує потреба у дослідженні криволінійного руху трактора, пов'язана з розворотами агрегатів під час виконання робіт. Щоб скоротити непродуктивні витрати потужності та мінімізувати пошкодження ділянок поля на розворотних смугах, маневри необхідно зробити найбільш раціональними. Підвищується негативний вплив рушіїв на ґрунт. Вирішення цих завдань забезпечується завдяки детальному аналізу кінематики та динаміки криволінійного руху ПА. Для цього необхідно отримати результат у вигляді рівнянь траєкторій руху криволінійного характеру [20].

Рух агрегатів по кривих – найскладніший елемент руху в польових умовах. Основна частина часу робіт польових агрегатів присвячена криволінійному руху, коли траєкторія змінюється за бажанням водія або в наслідок зовнішніх збурень, або в наслідок зміни деяких параметрів під час руху. Траєкторія колісної машини – це траєкторія її кінематичного центру, яка не має принципової відмінності між трактором і автомобілем, так як

функціональні якості під час криволінійного руху однакові. В даний час теоретичні та експериментальні методи дослідження криволінійного руху не в достатній мірі розроблені для польових агрегатів при виконанні сільськогосподарських робіт.

1.2 Аналіз, переваги та недоліки математичних моделей криволінійного руху

Дослідженню та вивченню траєкторії повороту чи розвороту будь-якого енергетичного засобу чи ПА під час польових робіт присвячено багато наукових статей світових дослідників. Зокрема у статті [11] розглянуто спробу оптимізувати дорожні точки та продемонструвати створення запланованого шляху для автономних тракторів-косарок. На підставі схем роботи було заплановано алгоритм планування шляху для автономної косарки-трактора. В результаті польових досліджень було отримано деякий збіг даних, особливо в точках повороту. Але самих рівнянь траєкторії шляху автономних тракторів-косарок і придатність алгоритму планування шляху для інших енергетичних засобів не наведено.

У статті [1] для отримання траєкторії криволінійного руху пропонується використовувати змінену траєкторію лінійного відрізка з траєкторією параболічної ділянки (LSPB) з оптимізацією рою частинок (PSO), щоб змусити траєкторію LSPB проходити через зазначені точки шляху. Результати моделювання показали хорошу роботу взаємодії зміненої траєкторії LSPB з PSO лише у перевірених випадках. Цей метод програмування дуже простий і можна використовувати для оперативного планування шляху, але математичних рівнянь кінцевих параметрів траєкторії руху не наведено.

У деяких наукових працях зустрічаються аналітичні вирази для визначення кінематичних параметрів криволінійного руху колісної машини,

які можуть бути використані для більшості кінематичних способів повороту, якщо приймати при розрахунках рівними нулю кути поворотів відповідних коліс, що дозволить і на стадії проектування, і в процесі експлуатації колісної машини з високим ступенем точності оцінити кінематику її повороту.

У праці [8] наведено результати експериментальних досліджень визначення параметрів траєкторії руху чотириколісного бавовняного трактора на базі трактора Case IH (модель 4240XL) із шестирядним культиватором на розворотній смузі бавовняного поля. За допомогою пристрою встановлених маркерів у кожному колесі та по осі трактора визначали на поверхні поля траєкторію руху. В результаті були отримані експериментальні польові траєкторії, які потім перетворили на форму таблиці з координатами X і Y для відтворення теоретичної траєкторії руху. Але метод отримання траєкторії складний, так як с початку вимагає проведення експерименту, а тільки потім дає можливість отримання траєкторії руху розвороту чотириколісного бавовняного трактора, тим саме ускладнює створення криволінійної траєкторії будь якого енергетичного засобу.

Час повороту займає значну частину операцій виконуваних тракторними та навісними агрегатами, особливо на полях з короткими пробігами. Нераціонально зроблені повороти значно збільшують ширину поворотних смуг, суттєво збільшуючи холостий хід агрегату навісного обладнання та трактора, що негативно впливає на ефективність роботи. У науковій статті [3] теоретично проаналізовано поворотну здатність асиметричного знаряддя-тракторного агрегату з урахуванням його швидкості руху та конструктивних параметрів. Отримані аналітичні рівняння для визначення мінімального радіусу повороту, значення оптимального кута між поздовжньою віссю трактора і зчіпного пристрою, а також ширину поворотної смуги для виконання повороту, які дозволили здійснити чисельне моделювання для оцінки маневреності повороту знаряддя-тракторного

агрегату на розворотній смузі з огляду на причіпну асиметричну валкову жатку з тракторним агрегатом. Але ці рівняння не дають можливості визначити траєкторію руху агрегату. Траєкторію розвороту запропоновано визначати тільки за двома ділянками: лінійної та колової, що обмежує моделювання всіх видів поворотів. Описаний експеримент отримання кінематичних параметрів та траєкторії на розворотній смузі розглянутий для трактора з передніми керованими колесами. Але змодельованих або практично отриманих траєкторій не наведено. Придатність застосування рівнянь для енергетичного засобу зі всіма керованими колесами не наведено. В результаті була розглянута параметри знаряддя-тракторного агрегату, але окрім координат траєкторії та рівняння криволінійного руху.

В статті [5] для створення найкращих траєкторій за критерієм ефективності для автономного колісного мобільного робота з причепом (AWMRT) між початковою та кінцевою ситуаціями була використана методологія, яка враховує кінематичні та динамічні можливості коліс мобільного робота. В результаті було проведено кілька досліджень для пошуку розв'язків проблеми планування траєкторії, оптимальних за часом виконання. Підхід, що використовується, є розширенням підходу випадкового профілю (RPA) для планування траєкторії тракторів з причепами. Цей підхід заснований на перетворенні вихідного завдання на задачу параметричної оптимізації з обмеженнями, в якій одним із параметрів є час виконання завдання. В результаті була отримана математична модель руху, яка записана в початковій формі з певними обмеженнями. Кінцевого розв'язку математичної моделі не наведено. Рівнянь траєкторії руху автономного робота не викладено, а використана програма з введенням початкових параметрів та часу, яка моделює задану траєкторію, а потім робот відтворює її з певними похибками. Наведені рівняння руху складні для використання на практиці та експериментально не перевірені на адекватність у реальних умовах.

В статті [12] представлений скоординований підхід до керування тракторно-причіпним енергетичним засобом, завдяки якому можна відстежувати траєкторії. Координований контроль складається з багаторівневих контролерів, кожен з яких побудований за різними алгоритмами. У зв'язку з цим на рівні кінематики для окремого проєктування регулятора постави використовуються лінійний квадратичний регулятор і модельний прогнозний контроль (МРС); щоб розробити динамічний контролер для відстеження бажаних швидкостей, створених он-лайн. Проведено математичне моделювання кінематичних та динамічних параметрів руху, складена система рівнянь для контролерів та наведені їх переваги та недоліки.

У роботах [14; 15] представлено метод проєктування керування для реалізації планарного поворотного руху двоколісного перевернутого маятника із затримкою введення. Особливістю даної роботи є застосування теорії планарної кривої при проектуванні контролера. З запропонованого дизайну контролю можна вивести два основні моменти. Один - для того, щоб рухатися по кривій цільовій траєкторії, важливо добре відстежувати кривизну кривої цільової траєкторії. Запропонована конструкція забезпечує похибку відстеження позиції значно зменшену в порівнянні з використанням нединамічної цілі стеження. Використання прямої швидкості як цільової дає змогу значно зменшити накопичену помилку, викликану початковою помилкою швидкості, а оптимальний контролер траєкторії легко визначити, просто розв'язавши алгебраїчні рівняння Ріккаті. Чисельне моделювання показує, що за допомогою розробленого контролера не тільки добре відстежується задана крива траєкторії, а й добре стабілізується перевернутий маятник [16; 17].

В статті [21] досліджуються проблеми планування руху для мобільного робота з причепом. Це досить складне завдання, навіть без перешкод. Найпростіший випадок представляє кінематичну модель мобільного робота,

схожого на автомобіль, тобто коли позиція причепа не враховується. У статті також надається короткий огляд існуючих методів вирішення проблеми планування руху для мобільного робота та мобільного робота з причепом. Один з методів базується на концепції нільпотентної апроксимації. Різні рішення, отримані з різних класів управлінь, використовуються для управління нільпотентною системою. Оптимальне управління, в сенсі мінімізації управлінь, відповідає нільпотентним під-Ріманновим проблемам.

В статті [4] розглянутий тракторний причіпний колісний мобільний робот (TTWMR), який рухається вздовж трактора для відстеження заданої бажаної траєкторії. Основні труднощі стабілізації та контролю відстеженням TTWMR пов'язані з нелінійними та недопустимими системами, на яких діють неголономні обмеження. Розроблено модель TTWMR і перетворено модель помилки відстеження в трикутну форму, щоб запропонувати закон керування та адаптивний закон. В цій статті представлений змінний адаптивний контролер, який було запропоновано для тракторного причепа з колесами мобільного робота. Результати моделювання для кількох випадків траєкторії показали ефективну продуктивність методу керування відстеження траєкторії.

У статті [13] викладено про ефективний підхід до планування траєкторії на основі квінтичного полінома та надійний метод прогнозного керування на основі трубчастої моделі (RTMPC) для системи тракторно-прицепного енергетичного засобу. Для реалізації планування траєкторії вводиться квінтична поліноміальна функція на основі часу, яка враховує безпеку, комфорт та ефективність руху транспортної системи. Після цього пропонується схема RTMPC, що складається з номінального системно-орієнтованого модельного контролера з прогнозуванням і закону керування допоміжним зворотним зв'язком, щоб побудувати регулятор положення, щоб можна було досягти сприятливих перехідних характеристик для процесу відстеження траєкторії. Результати моделювання підтверджують, що

запропоновані методи планування траєкторії можуть бути ефективно використані для енергетичних засобів з причепами.

У науковій праці [22] запропоновано дві негладкі кінематичні стратегії керування для стабілізації положення колісного мобільного робота з диференційованим приводом. У поточному дослідженні буде запропоновано перетворення декартової координати. Це перетворення вводить положення та орієнтацію бажаних розташувань у координати, які прикріплені до робота. Розроблений підхід базується на кінематичному перетворенні координат і методі стійкості за Ляпуновим. Представлені закони керування можуть асимптотично стабілізувати систему на бажаній меті та запропонувати два різних маневру. Крім того, відповідь запропонованих алгоритмів порівнюється з недавніми попередніми дослідженнями. Далі закони керування змінюються, щоб вирішити проблему уникнення перешкод, поки робот наближається до кінцевої бажаної пози. Отримані результати моделювання, а також експериментальні випробування підтверджують ефективність представлених методик.

У роботі [23] представлена ієрархічна структура внутрішнього-зовнішнього керування з модельно-прогнозованим контролером (МРС) у зовнішньому контурі та РІ-контролером у внутрішньому контурі для виконання відстеження траєкторії на неголономних роботах. Розглядаються дві різні формуляції МРС: (1) МРС на основі кінематичної моделі, яка припускає, що внутрішній контур має нескінченну ширину смуги пропускання, (2) МРС на основі динамічної моделі, яка враховує обмеження ширини смуги пропускання, накладені внутрішнім контуром. Для того щоб підкреслити важливість МРС на основі динамічної моделі порівняно з МРС на основі кінематичної моделі, вивчаються критичні компроміси між похибками відстеження та шириною смуги пропускання внутрішнього контуру для змінних довідкових швидкостей. Новизна цієї статті полягає у систематичному підході до відповіді на питання: (1) коли достатньо МРС на

основі кінематичної моделі, (2) коли необхідно використовувати MPC на основі динамічної моделі, щоб отримати добрі властивості відстеження траєкторії. Враховуються як результати моделювання, так і апаратні результати.

У багато робіт світових науковців [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18,] присвячені розробці різних видів контролерів, на основі теорії планарної кривої для відстеження потрібної кривої траєкторії колісних мобільних роботів, та порівнянні контролерів на практиці. Наведено формули та алгоритм планування траєкторій руху робота з виходом на задані координати траєкторії руху, проте не отримано кінцевих рівнянь руху.

У роботі [9] вперше детально описані різноманітні конфігурації колісного робота-тягача (TTWR), які є результатом контролерів відстеження траєкторії, орієнтованих на вихід. Потім розробляється контролер відстеження траєкторії повного стану, що не тільки гарантує асимптотичну стабілізацію вихідних помилок, але також дозволяє TTWR слідувати заданим шляхам як у прямому, так і в зворотному русі. Відповідь запропонованого кінематичного регулятора порівнюється з одним із найвідоміших попередніх досліджень для підтвердження переваг запропонованого регулятора. Нарешті, результати експерименту підтверджують роботу запропонованого контролера на практиці. Проблема відстеження траєкторії TTWR є складною, оскільки вони є дуже нелінійними, недостатньо спрацьованими та системами з багатьма входами та багатьма виходами.

У документі [24] пропонується нова архітектура керування відстеженням шляху, яка розроблена з використанням контролера MPC на основі кінематики енергетичного засобу для обробки збурень на кривизні дороги, ПД-регулювання зі зворотним зв'язком швидкості повороту, щоб усунути невизначеності та помилки моделювання, а також компенсатор кута бокового ковзання енергетичного засобу для корекції вищезазначеного процесу прогнозування. Запропонований контролер, заснований на

кінематичній моделі, дуже добре слідує бажаному шляху, починаючи від низької швидкості до висока швидкість навіть на межі керованості. Результати моделювання демонструють, що запропонований контролер успішно вирішує дилему, що кінематичний МРС добре працює лише на низькій швидкості, тоді як динамічний МРС має низьку обчислювальну ефективність і погіршується на низькій швидкості, з покращенням відстеження шляху, що гарантує менше помилок відстеження ніж 0,16 м, в діапазоні від низької до високої швидкості навіть на межі керованості. Крім того, завдяки використанню кінематичної моделі запропонований метод керування досягає порівнянного рівня обчислювальної ефективності порівняно з класичним кінематичним МРС. Крім того, моделювання та польові експерименти, проведені з автономним енергетичним засобом A60EV, підтверджують стійкість до перешкод датчиків і затримки часу. Нарешті, це дослідження також підтвердило.

Для підвищення характеристик маневреності, а також керованості та стійкості колісного трактора способи його криволінійного руху на поворотній смугі вибираються з врахуванням конкретних умов роботи. Існують різні варіанти вирішення цього завдання. В деяких наукових роботах одним з варіантів вирішення цієї задачі є виведення параметричних рівнянь для визначення поточних координат теоретичної кривої траєкторії для руху трактора «Крабом» на несталому етапі повороту [20].

В науковій праці [17] представлено підхід відстеження кривизни для колісної мобільної конструкції трактор-причеп (TTWMS), так що причіп може точно відстежувати потрібну криву траєкторії. Ключовий закон руху, пов'язаний з функціями кривизни траєкторних кривих, виявлено вперше в термінах тягача та причепа з неголономними обмеженнями. Потім, на основі цього ключового закону руху, крива траєкторії цілі причепа перетворюється на динамічну мету стеження, що відповідає рівнянню динаміки TTWMS, щоб перетворити початкову задачу руху в загальну задачу керування стеженням.

Результати моделювання показують, що запропонований метод може змусити TTWMS точно слідувати заданій кривій траєкторії цілі.

Щоб забезпечити точне відстеження траєкторії та задовільне навантаження та розвантаження ґрунту для системи вирівнювання землі на основі трактор-скребок на основі глобальної навігаційної супутникової системи (GNSS), в статті [7] був розроблений новий метод керування на основі кінематичної моделі з компенсацією ковзання та розраховано закон регулювання кута повороту керма. Метод був підтверджений за допомогою польових експериментів, під час яких систему вирівнювання землі на основі трактор-скребок керували для відстеження заданих шляхів на вологому полі для завершення автономної операції вирівнювання землі. Результати експерименту показали, що порівняно з продуктивністю відстеження шляху методу чистого контролю переслідування середньоквадратична помилка сумарних бічних відхилень трактора та скрепера за запропонованим способом зменшено на 0,433 м та 0,169 м відповідно при повороті на розворотній смузі. Результати показали, що запропонований метод може забезпечити точне відстеження траєкторії.

У роботі [10] представлено нову нелінійну математичну модель зчленованої системи тягач-причіп, яку можна використовувати в поєднанні з методами віддалення горизонту для покращення виконання завдань зчленованих систем відстеження шляху. Завдяки своїм подвійним механізмам керування цей тип енергетичних засобів може бути дуже корисним у точному сільському господарстві, зокрема для посіву, обприскування та збирання врожаю на невеликих полях. Модель зчленованої системи тягач-причіп була вбудована в контролер нелінійної моделі з прогнозуванням, а положення причепа відстежувалося. При врахуванні кінематики причепа відхилення положення причепа було суттєво зменшено не тільки на прямій дорозі, а й на поворотах. Дана запропонована

математична модель дає можливість контролювати положення самого причепа, а не положення трактора.

У роботі [18] запропонований метод керування відстеженням траєкторії для колісного робота тракторного причепа, за якого і причіп, і тягач здатні точно відстежувати ідентичну криву траєкторії цілі на низькій швидкості. По-перше, пасивний кут повороту і його редукторний механізм рульового керування підведене для керування причепом, щоб він якісно слідував за траєкторією трактора. По-друге, шляхом аналізу неголономних обмежень встановлено закони руху колісного робота тракторного причепа з пасивним кутом повороту. На цій основі застосовано стандартний метод для встановлення його кінематичних і динамічних моделей. Результати чисельного моделювання показують, що як тягач, так і причіп можуть точно рухатися по бажаному шляху одночасно завдяки застосуванню динамічної мети стеження та відповідного пасивного кута повороту, навіть якщо похибка швидкості стеження трактора велика.

У праці [19] планування траєкторії є ключовим питанням управління рухом системи тягача. У цій роботі розроблено уніфікований підхід диференціально-алгебраїчних рівнянь для побудови кінематичних моделей загальних тракторно-причіпних систем. З метою ефективного чисельного розв'язання запропоновано новий симплектичний метод. Запропонований симплектичний метод підтверджується трьома прикладами з різними конфігураціями системи. Результати моделювання демонструють, що даний метод перевершує псевдоспектральні методи за обчислювальною ефективністю та стійкістю до початкових припущень. Зокрема, можна прийняти багатоетапну стратегію для досягнення надійного рішення за наявності перешкод, завдяки чому система успішно пересувається вузькими коридорами.

У дисертаційному дослідженні Бабошко О.А. проведені дослідження повороту автомобілів з передніми керованими колесами, який присвячений

визначенню бічних реакції на колесах передньої і задньої осей повнопривідного автомобіля (формули (2.8), (2.9)); вертикальні реакції на передній і задній осях повнопривідного автомобіля (формули (2.22), (2.23)) та з урахуванням перерозподілу вертикальних реакцій між бортами (2.37), (2.38), що призвело до ускладнення аналітичних виразів, але дає можливість отримати більш точний результат; визначені дотичні реакції на ведучих колесах задньопривідних і передньопривідних автомобілів (2.41), (2.42). Проведені дослідження автором визначення умов втрати автомобілем стійкості і керованості на прикладі вантажного автомобіля Урал-4320 в спорядженому стані в двовісному виконанні, в результаті якого врахування перерозподілу вертикальних реакцій між бортами дозволяє підвищити точність розрахунку $R\delta_1$ всього на 1–2 %, а $R\delta_2$ – на 3,9–4,1 %, що незначне, і тому, при розрахунках достатньо використовувати аналітичні залежності, одержані без урахування перерозподілу вертикальних реакцій між бортами автомобіля. Кутове прискорення, що виникає в несталій стадії повороту, є критерієм керованості. Введене поняття силового коефіцієнта керованості та отримана формула для його визначення (2.68), зі зменшенням якого і кутове прискорення автомобіля зменшується (керованість погіршується). Це ж відбувається із збільшенням колії автомобіля B . Автором визначенні реакції дороги на колесах передньої і задньої осей автомобіля з урахуванням бічного відведення шин (2.91), (2.92), але аналітичними методами вказане здійснити складно, тому слід використовувати чисельні методи. Автором запропоновано для оцінки динаміки повороту використовувати таке поняття (критерій), як кутова швидкість повороту та наведено формули для розрахунку кутової швидкості повороту (2.243) та кутового прискорення автомобіля (2.224). В роботі [46] описано елемент повороту автомобіля динамічним способом, який показав про збільшення кутових швидкостей коліс зовнішнього та внутрішнього бортів; розглянуто динаміку одиночного

колеса, рівняння його руху, лінійне та кутове прискорення, яке призводить до появи динамічного повертаючого моменту.

В роботі [46] описані диференціальні рівняння, які дозволяють описати динаміку повороту автомобіля. Наведені автором результати дослідження закону керування рухом коліс автомобіля при відомих і перспективних способах виконання маневру можуть бути реалізовані у електромобілях та автомобілях з комбінованим енергоустановкам з використанням мехатронних систем [46].

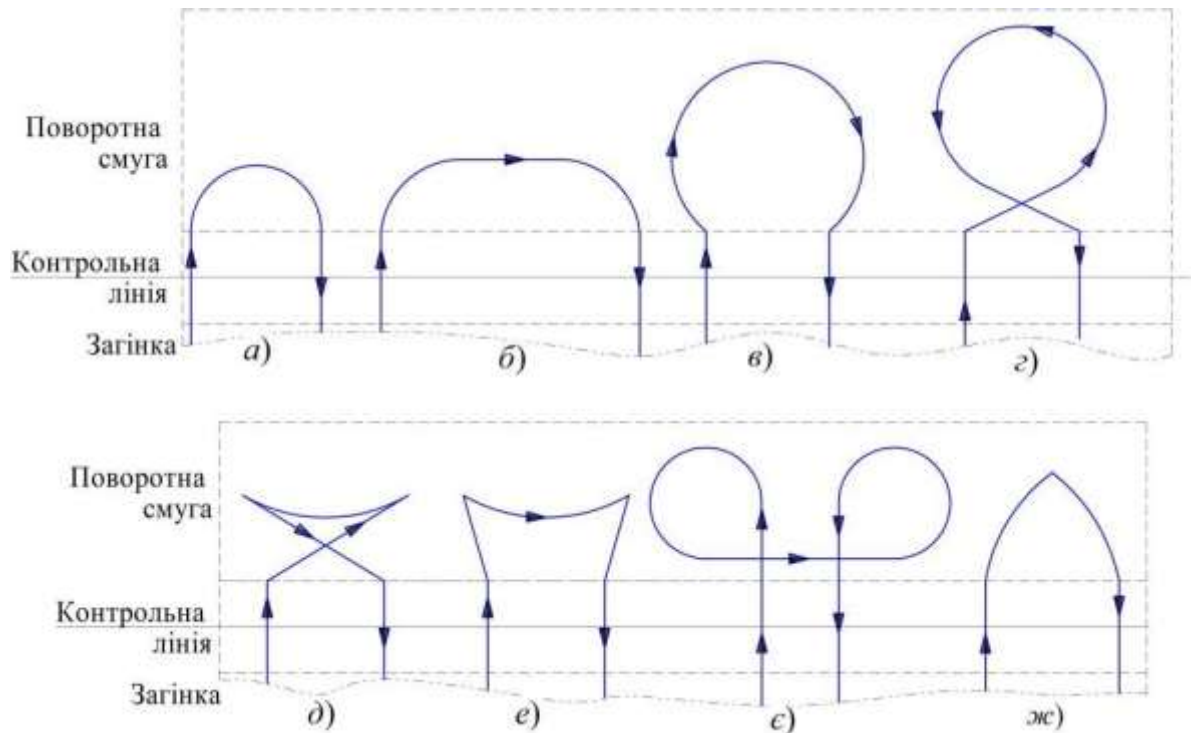
1.3 Поворот – один з елементів криволінійного руху

Траєкторія криволінійного руху (повороту або розвороту) має багато класифікацій. Повороти агрегати виконують як на 90^0 так і на 180^0 . Агрегати, що працюють гоновим способом, повертають на 180^0 , а агрегати, що рухаються коловим способом - на 90^0 . При русі діагональним способом агрегат повертається на різні кути. Повороти діляться також на: петльові (з закритою й відкритою петлею), безпетльові [6] та перехресно-петльові.

Види поворотів агрегатів на 180^0 зображено на рисунку 1.1.

В світовій практиці найбільш перспективним є оновлення парку з використанням тракторів з усіма керованими та ведучими, як правило однакових розмірів, колесами. Дані трактори мають можливість виконувати операції з використанням широкозахватних комбінованих агрегатів. Тому для використання таких тракторів необхідно удосконалювати його конструкцію та експлуатаційні показники.

Вимоги до таких тракторів наступні: різні приклади приєднання сільськогосподарських машин (на передню або задню навіску); наявність незалежного валу відбору потужності (с переді або с заді) для приводу активних робочих органів, а також при можливості приєднання ємностей для мінеральних добрив або посівного матеріалу.



а) безпетльовий по колу; б) безпетльовий з прямолінійним рухом; в) петльовий грушоподібний (відкрита петля); г) петльовий вісілкоподібний (закрита петля); д і е) із застосуванням заднього ходу трактора (закрита і відкриті петлі); є) петльовий здвоєний; ж) голчастоподібний.

Рисунок 1.1 – Класифікація поворотів на 180°

Багатьма науковцями був описаний криволінійний рух руху МТА на базі інтегрованого універсально-просапного трактора з усіма керованими і ведучими колесами. Наведені методики по визначенню мінімального радіуса повороту універсально-просапного трактора з усіма керованими колесами дозволили покращити точність розрахунків. В роботі описані шляхи підвищення ефективності роботи МТА на прикладі інтегрованого універсально-просапного трактора, а саме раціональний вибір експлуатаційних параметрів тракторів та модернізація їх рульового керування.

Основну частину часу трактор рухається криволінійним рухом, це в свою чергу залежить від перешкод під час руху або від самого бажання водія. Траєкторію яку описує кінематичний центр колісної машини прийнято

називати траєкторією колісної машини. Одним із елементів криволінійного руху є поворот колісної машини, який складається з 3 частин:

- 1 частина – коли перехід відбувається з прямолінійного руху до криволінійного (збільшення кривизни – «вхід в поворот»);
- 2 частина – рух по сталій привізній (рівномірний сталий поворот);
- 3 частина – повернення до прямолінійного руху (траєкторія кривизни доходить до нуля «вихід із повороту»).

Особливістю повороту (криволінійного руху) колісної машини є непаралельне переміщення будь-яких двох точок, що мають різні за значенням або напрямом швидкості руху. Процес повороту машин складається із трьох етапів: перехід від прямолінійного руху до криволінійного, коли кривизна траєкторії збільшується – вхід у поворот; рух з постійною кривизною - рівномірний поворот; повернення до прямолінійного руху, коли кривизна траєкторії зменшується до нуля – вихід із повороту. Машина з передніми провідними колесами має більшу стійкість, ніж із задніми провідними колесами [25].

Здійснення повороту задніх провідних коліс негативно впливає на стійкість, так як складова сили тяги, яка виникає при повороті керованих коліс, призводить до збільшення сили задньої осі, що особливо проявляється при режимі руху, коли змінюються кути повороту керованих коліс [26].

Під час руху трактора, а саме його повороту, можна виконати його наступними способами (рис. 1.2): зміна положення керованості коліс в горизонтальній площині, зміною крутних моментів однієї з сторін (на прикладі гусеничного трактора), та зміна положення трактора, а саме однієї частини по відношенню до іншої [26].

Під час повороту трактора (рис. 1.2, а), що найбільш розповсюджений в порівнянні з іншими, передні колеса є керованими, і мають менший діаметр в порівнянні з задніми. При повороті на тракторі коліс як передніх так і задніх в різні сторони (рис. 1.2, в), він буде рухатись по криволінійній траєкторії.

Другий спосіб полягає в тому, що всі колеса на енергетичному засобі повернуті в одну сторону (праву чи то ліву). Під час такого способу засіб не виконує поворот, а рухається вбік, так званий «собачій» чи «крабовий» рух [26]

Спосіб повороту (рис. 1.2, б) «складена рама», на тракторах що мають шарнірно-з'єднану раму мають можливості повертатися відносно один одного в горизонтальній площині [26].

Розвиток тракторобудування призвів до створення тракторів на гусеничному ході (рушію) (рис. 1.2, д), що дозволив робити поворот або розворот зупиняючи чи збільшуючи швидкість одного з бортів (справа, або зліва) [26].

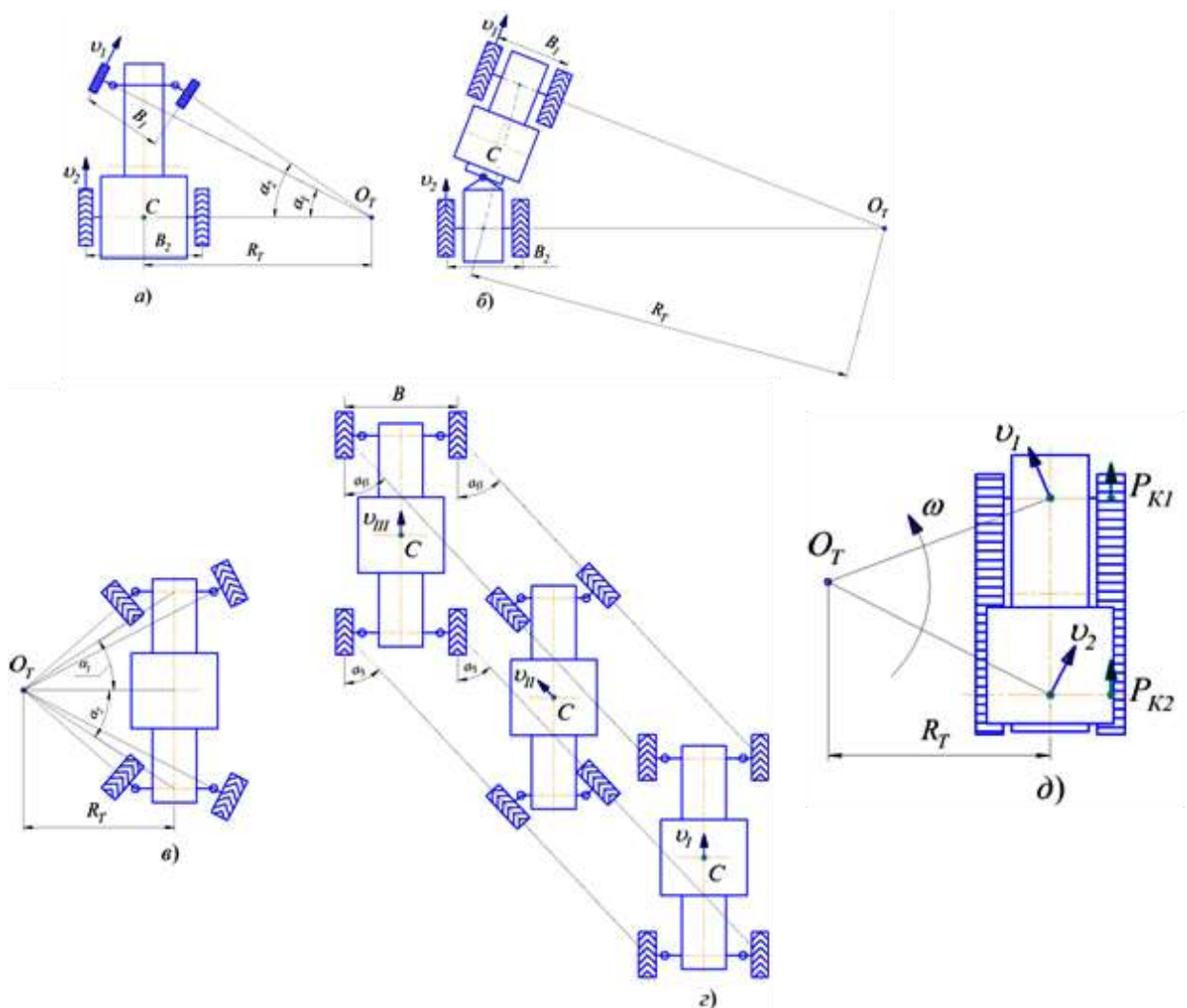


Рисунок 1.2 – Способи повороту енергетичного засобу [26]

Існують два методи підвищення ефективності обертання тракторів. Перший полягає в тому, щоб спроектувати траєкторію повороту на смузі, що складається з кількох ліній і кривих, включаючи розворот, R-поворот/розворот, обертання риб'ячим хвостом-динамічне поворотне коло назад (DCB) та його вдосконалення вищезазначеного методу. Наведені вище методи повороту на поворотній смузі визначають мінімальний шлях повороту через робочу ширину та колісну базу тракторів. R-поворот/розворот із кульковим механізмом і поворот у формі риб'ячого хвоста/поворот DCB можуть змусити трактори розвернутися безпосередньо до наступного ряду, але простір на поворотній смузі має бути відносно великим. Операцію повороту скіпової гусениці також можна виконати за допомогою розвороту повороту, щоб отримати більше простору для розвороту, але в процесі повороту колії буде більше непотрібної відстані. Крім того, поширеними методами модифікації автоматичного повороту трактора є встановлення двигуна постійного струму на кермо або встановлення електромагнітного клапана на гідравлічному контурі рульового керування. Однак ці два методи модифікації контролюють лише поворот передніх коліс, що не може збільшити кут передніх коліс трактора та зменшити радіус повороту та простір повороту на поворотній смузі [27].

Більшість дослідників досліджують оптимізацію алгоритмів планування шляху на поворотній смузі. Це в основному включає глобальне планування шляху та локальну оптимізацію шляху на поворотній смузі. Для глобального планування траєкторії популярними методами є зменшення кількості кіл тракторного поля шляхом обходу паралельної послідовності траєкторій сільськогосподарських угідь, щоб знайти оптимальну послідовність траєкторій або поділ складної форми сільськогосподарські угіддя на кілька підмодулів простої форми. Наприклад, Д.Д. Бохтіс запропонував метод оптимального покриття сільськогосподарських угідь шляхом перетворення планування покриття поля в проблему шляху

енергетичного засобу (VRP). Це дозволяє скоротити загальну неробочу відстань на 50%. Що стосується локальної оптимізації на поворотній смузі, алгоритм адаптивного керування динамічно планує траєкторію руху під час процесу повороту, регулюючи відсоток вимог, що призводить до зменшення витрат часу на повороті та відстані шляху на 17 % та 21 %. Деякі інші дослідження зазвичай додають додаткові траєкторії кривизни на поворотній смузі і прямі траєкторії, щоб узгодити кут коліс для підвищення точності відстеження поворотів. Бекмен розробив алгоритм генерації траєкторії згладжування поворотної смуги, який враховує швидкість повороту та прискорення трактора для отримання плавної траєкторії з безперервною кривизною та траєкторією швидкості. Однак оптимізація цих алгоритмів базується на куті повороту переднього колеса трактора, а величина кута повороту переднього колеса обмежує ефективність планування шляху [27].

1.4 Аналіз сучасних систем з автоматичним управлінням енергетичних засобів

Як полегшити фізичну працю трактористів і при цьому дати їм можливість стежити за самим технологічним процесом? Як оптимізувати норми і якість внесення добрив і засобів захисту рослин? До недавнього часу ці питання були «головним болем» і вчених, і практиків, але розвиток техніки за останнє десятиліття зробило справжню революцію в цій галузі. Наявність космічних навігаційних систем і аналітичної електроніки в тракторах і машинах привели до виникнення нового напрямку в агросекторі – прецизійного (точного) землеробства. Вирішальну роль в цьому зіграло впровадження приладів управління технікою на основі космічних навігаційних систем [28].

Основне завдання, під час виробництва сільськогосподарської продукції, є підвищення продуктивності праці під час виконання

технологічних операцій по вирощуванні той чи іншої сільськогосподарської культури, але з одночасним дотриманням якості виконання відповідних робіт

Автоматизація техніки що використовується в сільському господарстві активно використовується фермерами та потужними агрохолдингами. Використання даного обладнання дозволяє вести енергозасіб (трактор, комбайн чи обприскувач) по лінії рядка, тим самим оператор даного засобу може просто спостерігати що знижує його втомлюваність [29].

Під час руху польового агрегату в складі енергетичного засобу та сільськогосподарської машини відбувається незначне відхилення від заданого прямолінійного руху, яке пов'язане з поверхнею поля, діючою силою інерції та іншими факторами. Дані фактори впливають на утворення огріхів під час виконання технологічної операції, збільшення шляху та витрати палива (насіння, або добрив) і підвищується втомленість оператора енергетичного засобу під час керування ним. Так при виконанні обприскування через перекриття оброблювальних смуг відбувається перевитрата засобів захисту рослин, що призводить до передозування препарату, який потрапляє на рослину. При збільшенні швидкості руху на обприскувачі оператор не встигає реагувати на ситуацію яка складається, і змушений знову зменшувати швидкість, а це призводить до зменшення продуктивності машинно-тракторного агрегату (МТА).

Останніми роками масовим явищем у зарубіжному тракторобудуванні стало застосування електронних засобів автоматизації для управління, контролю і регулювання режимами роботи вузлів і агрегатів тракторів, якими в тому або іншому ступені штатно або на замовлення оснащені практично всі трактори зарубіжних фірм. Зокрема, переважна більшість машин штатної комплектації оснащена електрогідравлічним регулюванням задньої начіпної системи, системами автоматичного контролю технічного стану і режимів роботи трактора з електронними щитками приладів, часто з'єднаними з різними варіантами інформаційно-обчислювальної системи, що мають

радарні датчики дійсної швидкості для оцінки роботи трактора і продуктивності машинно-тракторного агрегату. Засоби автоматизації широко використовуються у конструкціях тракторів високої потужності [30].

Отже, для зниження описаних негативних факторів та моментів які впливають на кількісні, або якісні показники під час роботи МТА є використання точних (прецизійних) технологій в землеробстві використовуючи супутникову навігацію.

Використання супутників та інформації, яку вони надають через оптичні та радіолокаційні датчики (яке ще декілька років тому було лише досить поширеною практикою для комунікації з операторами МКС), сьогодні вже стало дуже популярною технологією і у сфері сільського господарства, основною метою впровадження якого стало забезпечення більш інтенсивної та ефективної практики вирощування. Так, супутникове визначення здо-ров'я та зрілості рослин забезпечує фермера необхідною (і до того ж швидкою) інформацією про можливі проблеми з врожаєм, а супутникові знімки, часто в поєднанні з геоінформаційними системами (ГІС), використовуються для деталізації характеристик полів [31].

Точне землеробство, або «розумне землеробство», значно змінює традиційні сільськогосподарські методи, підвищуючи ефективність і продуктивність на кожному етапі виробництва. Застосування цього підходу, зокрема, дозволяє оптимізувати використання добрив і засобів захисту рослин, скорочувати витрати та покращувати якість врожаю. Завдяки технологіям точного землеробства, фермери мають можливість більш точно вести техніку в полі, що знижує стомлюваність операторів та зменшує витрати палива. Точне землеробство стає доступним і ефективним при земельному банку від 500-1000 га. На світовому ринку існує п'ять провідних виробників спеціального обладнання для точного землеробства: Trimble, Raven, Hexagon, John Deere та Precision Planting (рисунк 1.3). Ці компанії є лідерами у розробці та виробництві технологій, які допомагають аграріям

підвищувати ефективність та продуктивність сільськогосподарських робіт. Їхнє обладнання, як правило, використовується у партнерстві з виробниками сільськогосподарської техніки [32].



Рисунок 1.3 – Обладнання точного землеробства

Майже 30 років тому фермери США почали впроваджувати «точні» технології: використовувати GPS, дані супутників, змінні норми внесення ресурсів та ін. І цей «американський прорив» полягав не лише у застосуванні космічних технологій і модернізації обладнання, але й у зміні підходу до землеробства: поки в деяких країнах світу ще тривала «гонка за врожайністю», американські фермери намагалися досягнути максимального «профіту» через оптимізацію використання ресурсів. Близько 80% американських фермерів використовують сучасні технології для відбору (з GPS) і аналізу зразків ґрунту, 65% проводять картографування властивостей ґрунтів, тільки понад 60% змінно вносять вапно або однокомпонентні мінеральні добрива, близько 60% — аналіз карт урожайності, 55%

використовують дані, отримані із супутників, понад 30% застосовують безпілотні літальні апарати. Прогресивні американські фермери розуміють, що інвестиції в інновації і технології — це ефективний шлях розвитку. Наприклад, на фермі Ryan Haack, Westesen Farms системно впроваджують точне землеробство вже протягом 10 років [33].

Для сьогоденної України звичайною є ситуація, коли основною метою аграрного виробництва є "гонка за врожай". Рентабельність такого підходу ґрунтується не тільки на сучасних технологіях, новітній техніці, селекції, а й недорогій робочій силі, поки ще родючому ґрунті, дешевій орендній платі. Але дана ситуація вже терпить зміни. Задарма працювати вже ніхто не хоче, податки ростуть, так і силою утримувати ринок землі довго не вийде. Залишається одне - оптимізувати використання ресурсу і відсікання зайвих витрат. Цей шлях був застосований американськими фермерами ще 30 років тому і називається він точне землеробство [34]. Точне землеробство дозволяє аграріям пришвидшити темп польових робіт, оптимізувати обсяги використання ЗЗР та добрив, налаштувати чітку схему висіву, задіяти всі 100% можливостей техніки і полів в цілому [35].

Отже, в Україні точне землеробство стає самим популярним аграрним трендом в фермерських господарствах, тим самими дозволяє їм бути конкурентоздатними на світовому рівні в економічному просторі. Основні переваги, елементи та технології точного землеробства зображені на рисунку 1.4.

Система рульового керування автопілотом є однією з основних технологій, розроблених для керування трактором у точному землеробстві. За останні кілька десятиліть технологія отримала хороші відгуки серед фермерської спільноти в усьому світі. Система автопілота зменшує втручання людини в систему керування трактором, допомагаючи його оператору керувати без рук під час роботи на сільськогосподарських угіддях. Це дозволяє оператору отримати кращу продуктивність у полі з більш

ефективними вхідними ресурсами для збільшення врожайності та підвищення прибутку сільськогосподарського бізнесу в той же час.

Переваги точного землеробства	Елементи точного землеробства	Технології точного землеробства
➤ Підвищення врожайності посівів. ➤ Зменшення витрат агрохімікатів. ➤ Збереження чистої води. ➤ Поліпшення стану ґрунтів. ➤ Максимальний контроль. ➤ Високий ступінь автоматизації.	➤ Агрохімічний аналіз ґрунту. ➤ Картографування полів. ➤ Оптимізація маршрутів руху техніки. ➤ Диференційоване внесення. ➤ Моніторинг погоди. ➤ Застосування дронів.	➤ Глобальне позиціонування ➤ Географічні інформаційні системи ➤ Технології оцінки врожайності ➤ Системи змінного нормування ➤ Дистанційне зондування землі ➤ Протокол передавання даних.

Рисунок 1.4 – Категорії використання точного землеробства

Система автопілота або автоматизована система керування - це комбінація кількох інструментів (таких як камери, цифровий аналіз і методи обробки зображень) і системи географічного позиціонування (GPS), яка пов'язана із супутниковою навігацією та системою комп'ютеризації. Система складається з двох важливих компонентів, таких як апаратне забезпечення (різні датчики та виконавчі механізми, такі як GPS і датчик кута повороту) та програмне забезпечення (планувальник шляху, навігаційне керування та керування кермом). Автоматизоване рульове управління автоматично контролює рух трактора з високою точністю супутникової навігаційної системи в межах потрібного шляху, не завдаючи шкоди рослинності, зберігаючи широкий діапазон вимірювань [2].

Для впровадження в господарствах точного землеробства Вам знадобиться лише три речі: GPS – монітор; автопілот та базова станція. Причому остання поєднанні з RTK-сигналом дасть точність руху вашої техніки на полі і відхилення будуть у межах ± 2 см. GPS-монітори призначені для визначення напрямку руху машини. Вони дозволить вам отримати візуальний контроль за переміщенням транспортного засобу по полю з точністю до 15-50 см. Автопілот призначений для автоматичного коригування напрямку руху трактора. Для цього до кермового колеса підключається спеціальний прилад - пристрій, що підрулює. Він може бути електричним та гідравлічним. Електричний пристрій коштує менше, але має недолік – діє з запізненням. Автопілот з гідравлічним пристроєм оснащений системою компенсації крену, яка на схилах робить поправку на знесення транспортного засобу [36].

Однією з найбільш доступних і в той же час найбільш популярних технологій точного землеробства є система паралельного водіння. Вона вимагає набагато менше витрат на впровадження, ніж інші, а ефект помітний відразу. Дана система дозволяє проводити польові роботи (оранка, культивування, сівба, внесення добрив, збирання врожаю) з максимальною точністю і мінімумом «непотрібних» рухів [32].

Система аграрної навігації (курсовказівник, система паралельного водіння, агронавігатор) дозволяє досягти високої точності при роботах пов'язаних з вирощуванням сільськогосподарських культур. Завдяки використанню супутникових даних та геопозиціонування, трактори точно слідує заданим маршрутам і контролюють витрати добрив, хімічних препаратів та насіння. Це дозволяє скоротити перекриття оброблюваної площі, уникнути нестачі або надлишку ресурсів, а також покращити рівномірність розподілу, що призводить до оптимального використання ресурсів та підвищення якості сільськогосподарських робіт. Застосування системи паралельного водіння на тракторах сприяє підвищенню

продуктивності та скорочення витрат. Завдяки автоматизованому управлінню та точному позиціонуванню, сільгосптехніка може працювати більш ефективно, знижуючи час виконання завдань та збільшуючи площу обробки. Це дозволяє скоротити витрати на паливо, час та трудовитрати, що є значною економічною перевагою для сільськогосподарських підприємств. Система паралельного водіння (курсовказівник) надає цінні дані про поля та роботи, що дозволяє аналізувати та оптимізувати процеси ведення сільськогосподарського господарства [37].

Використання системи паралельного водіння базується на використанні сигналів супутникової навігації, а саме використання безкоштовного або платного GPS-сигналів. Використання першого дає можливість здійснювати рух по полю МТА з точністю до 30 см, а другий має кращу точність – до 2,5 см. Тому використання платного сигналу GPS дає можливість скоротити час та площу оброблювальних ділянок на полі, тим самим скоротивши довжину холостого ходу МТА та ширину його розворотної смуги. Отже можна впевнено сказати, що майже на 18% зменшиться питома витрата ресурсів: палива, посівного матеріалу, добрив та засобів захисту рослин.

Звести до мінімуму випадки перекриття і пропусків на сьогодні більш, ніж реально. Для цього в системі точного землеробства застосовується курсовказівник, він же — система паралельного водіння, що працює на базі навігації GPS. Система паралельного водіння забезпечується супутниковим сигналом, що спрямовує машину в потрібному напрямку за довільними лініями. Дана система повністю знімає такі питання, як пропуски і перекриття. Система паралельного водіння забезпечує чітке виконання усіх агрооперацій. Агрохолдинги в Україні використовують системи паралельного водіння наступних виробників: Trimble, John Deere, Leica, Topcon (компанія Topcon Precision Agriculture (TPA)): Claas GPS Copilot та Hexagon [38].

Сенсорний кольоровий дисплей, в залежності від виробника має різну діагональ, дає можливість оператору енергетичного засобу бачити відхилення, або збіг з вказаною заздалегідь траєкторією руху. Оператором перед початком руху вказується: ширина агрегату, який приєднаний до енергетичного засобу та фіксується координати початку руху. Після першого проходу обов'язково вказується точка завершення руху.

Поля господарства на даний час майже всі мають кадастрові номери. Для планування польових робіт господарство має можливість якісно управляти земельним банком. Тому неточні відомості про розміри оброблюваних земель можуть викривляти інформацію про врожайність культур, ускладнюють ведення кадастрового обліку, планування польових робіт тощо, тобто призводять до додаткових витрат за «неіснуючими гектарами» і спричиняють проблеми під час використання інструментів точного землеробства. Словом, знання реально оброблюваної площі дає змогу правильно розрахувати обсяг витрат і уникнути невиправданих видатків ще на етапі планування [39]. Але трапляються випадки коли контури поля в господарстві зображені тільки на паперових носіях, або дані кадастрового номеру (плану) застарілі. Виникає необхідність обходу, або об'їзду поля для створення супутникових даних ділянки, різними способами використовуючи мобільні пристрої (смартфони, або планшети) та антени. Тому кожне підприємство обирає для себе той спосіб вимірювання площі полів, який вважає кращим враховуючи свої потреби та обладнання.

Така система паралельного водіння самостійно аналізує дані, будує лінії, які потім виводяться на екран (монітор) курсовказівника та дозволяє вести енергетичний засіб в складі МТА строго по лініям, які паралельні лініям при першому проході агрегату. Така система, маючи сигнал системи супутникової навігації, має можливість контролювати рух МТА як прямолінійно так і криволінійно. Така система має можливість

переставляться з одного трактора на інший та налаштовуватись на ньому для роботи.

Більшість операцій при роботі в полі передбачають багаторазове повторення циклу руху від ряду до ряду, з розворотами в кінці гону. Така монотонність, в результаті призводить до втоми оператора, і витримувати постійну точність управління агрегатом стає практично не здійсненним завданням. Продуктивність до кінця зміни падає на 30-40%, відповідно ні про яке питання підвищення виробки, до чого прагне фермер чи керівник господарства, мова не йде [40].

Тому для автоматизації управління енергетичним засобом і застосовують системи автоматичного підрулювання та автопілоти, які в свою чергу бувають з електричним, або гідравлічним приводом рульової колонки (рисунок 1.5).

Принцип роботи електричного автопілота полягає в установці на рульовому валу колонки, рульового колеса з електроприводом, який під'єднується до контролера і отримує сигнали на його поворот з певним кутом за допомогою електромотора [40].



Рисунок 1.5 – Автопілоти системи паралельного водіння

Незважаючи на максимальну автономність машин все ще необхідна присутність оператора. Система вимагає знаходження водія за кермом не

просто так. По-перше, трактор на автопілоті не може сам розвертатися. Це доводиться робити водієві. Водій піднімає сівалку і починає маневр розвороту, після чого передає управління автопілоту, який завершує маневр по оптимальній траєкторії повертаючись на курс з мінімальним зміщенням.

По-друге, при роботі поблизу ліній електропередач виникають перешкоди, і навігаційна система починає давати збої, що знову вимагає ручного управління. Більш того, в сільськогосподарських угіддях, що мають високі, щільні дерева і/або хвилястий рельєф місцевості з істотними перепадами висот, прийом сигналів GPS стає великою проблемою. Лише в деяких моделях при втраті GPS-сигналу дозволяє трактору ще протягом 15 хвилин рухатися по заданому курсу. По-третє, робота автопілоту дуже сильно залежить від якості Інтернет – з'єднання. У місцях, де покриття Інтернетом слабке, система автоматичного водіння може бути не придатна для використання. По-четверте автопілот не здатний розпізнавати перешкоди на шляху проходження, для їх об'їзду необхідно переходити на рульове керування. В системі передбачена лише функція попередньої постановки позначок на перешкоди і при наближенні до них оповіщення водія звуковим сигналом [32].

Система GPS універсальна. Приймач і термінал можна використовувати на інших спеціально підготовлених тракторах і самохідних машинах. Крім того, ця система дозволяє працювати вночі і при поганій видимості, скажімо, через дощ або туман, що часто трапляється при проведенні весняно-літніх або осінніх польових робіт. Дослідження показують, що, завдяки підвищенню точності виконання робіт, витрати робочого часу скорочуються в середньому на 7%, зменшуються витрати пального і раціонально використовуються мінеральні добрива та засоби захисту рослин. Також завдяки даним приладів необроблених гербіцидами смуг на полях немає. Для великих господарств і агросервісних підприємств

важливо, що така система дає інформацію про проведення робіт і щомиті фіксує координати розташування сільгосптехніки [32].

У науковій роботі Wang та Noguchi [41] представлено адаптивний алгоритм повороту, та його блок-схему, на розворотній смузі. Для проведення дослідження використовувались чотирьохколісні машини EG105 та EG83, виробництва YANMAR, причому перший агрегат був без знаряддя, а інший з роторним агрегатом. Для створення навігаційного шляху, з'єднаного безперервними примітивами, використовувалася цільова функція на основі ваг. Для точного слідування за траєкторією враховувалися ковзання робота та швидкість рульового керування шляхом оцінки радіуса повороту в реальному часі. Польові експерименти показали, що робот-трактор наближався до наступного шляху із середнім бічним відхиленням 3,9 см на швидкості 1,2 м. Вхідні дані алгоритму повороту включають положення транспортного засобу, його положення, швидкість, кут повороту колеса, бічні та курсові відхилення від навігаційної карти, а також обмеження швидкості, кута повороту колеса та зайнятості мису. Отже, проведені дослідження показали, що вищеописаний алгоритм схеми повороту зменшує майже на 20% час на виконання повороту.

Описані вище системи точного землеробства, які встановлюються на енергетичні засоби не дуже дорогі. Так, наприклад комплект для точного землеробства (універсальний дисплей, приймач, модем та інше) для енергетичних засобів на колісному русі, від фірми John Deere коштує майже 20 тис. євро, трошки дешевше їх вартість для агрегатів на гусеничному русі. Такий ключовий елемент точного землеробства як: система паралельного водіння коштує в половину дешевше.

З використанням новітніх технологій в сучасному сільському господарстві важливу роль відіграє автоматичне планування маршруту руху польових агрегатів по полю, особливо на розворот них смугах. Рух по таких розворотних смугах – це процес, який слід виконувати таким чином, щоб

максимізувати експлуатаційну ефективність польового агрегату шляхом мінімізації часу або відстані проходження під час розвороту [42].

У навчальному посібнику [45] детально висвітлюються основні розрахункові та експериментальні методи визначення характеристик криволінійного руху автопоїздів, а також дослідження стійкості й керованості колісних транспортних засобів під час транспортування великогабаритних конструкцій. Описано методологію прогнозування параметрів криволінійного руху транспортних систем великої вантажопідйомності. Запропонована авторами математична модель враховує можливість реалізації різноманітних законів і алгоритмів роботи систем рульового керування, різні варіанти тягових поєднань ланок автопоїзда, особливості конструкції зчіпних пристроїв, взаємодії між окремими ланками автопоїзда та між колесами й жорсткою опорною основою, а також включає моделювання сил повітряного опору [45].

Американська компанія AGRO (Allis-Gleaner Company), яка є лідером в розробці точних (прецизійних) технологій в землеробстві, в 2020 році запропонувала встановлення в тракторах FendtONE (трьох нових поколінь Fendt 500, Fendt 900 та Fendt 1000 Vario [43] системи інтуїтивного управління рухом енергетичного засобу Fendt Contour Assistant, Fendt TI Auto або Fendt TI Headland [44].

Система Fendt TeachIn (TI) Turn Assistant дозволяє виконувати автоматизовані повороти (розвороти) на полі тракторів Fendt із системою Fendt Guide. Дана система використовується тільки для новітніх поколінь тракторів даної фірми, які мають тільки одні передні керовані колеса, вона вбудована (інтегрована) в базову комплектацію тракторів нового покоління даного виробника і не має універсальності для використання другими енергетичними засобами.

Поворот на розворотній смузі повинен виконуватись максимально швидко, навіть за складних умов бездоріжжя. Оптимізація процесу

управління на цій ділянці дозволяє не лише стабільно зменшити час та витрати палива, але й підвищити ефективність використання земельних ресурсів. Це також може сприяти створенню більш точного та раціонального маршруту роботи техніки. Тому оптимізація траєкторії повороту є важливим напрямком для розробників сільськогосподарської техніки з автоматичними системами управління, оскільки вона напряду впливає на підвищення продуктивності мобільних польових машин.

1.5 Висновки по розділу 1

Протягом останніх років автоматизація енергетичного засобу була однією з найважливіших цілей багатьох дослідників у світі. Автоматичне водіння польового агрегату під час виконання сільськогосподарських операцій при вирощуванні культур – основна причина дослідження криволінійного руху тракторів. В багатьох статтях як вітчизняних, так і закордонних науковців зроблені спроби отримати траєкторію переміщення агрегату по кривих.

1. Один з основних сучасних способів отримання траєкторії маневру агрегату під час виконання технологічних операцій – це використання систем презиційного землеробства за допомогою супутникової навігації. Застосування технологій точного землеробства в господарствах збільшує продуктивність та підвищує ефективність використання агрегату. В Україні незначна кількість сільгосппідприємств охоплена системами точного землеробства. Автопілот, який забезпечує ведення агрегату по полю, досить кошковий до 21000 євро, що ускладнює їх застосування на всіх енергетичних засобах.

2. Зараз в складних для України умовах при виконанні технологічних операцій по полю без наявності GPS-сигналу виникають труднощі на ведення агрегату по заданій траєкторії, особливо під час виконання маневрів, де водій

покладається на власний розсуд і досвід, що безумовно позначиться на продуктивності МТА. Для цього маневри необхідно зробити найбільш раціональними. Тому виникає питання отримання траєкторії криволінійного руху польового агрегату без GPS-сигналу для підвищення ефективності використання МТА за рахунок оптимізації маневрів. Саме згадана траєкторія є траєкторією управління агрегатом. Для цього необхідно отримати загальні математичні рівняння неусталеного криволінійного руху центру ваги енергетичного засобу з суцільною рамою та зі всіма керованими колесами.

3. В результаті проведеного аналізу методів отримання траєкторії криволінійного руху агрегату, науковцями були використані як наближені методи, так і математичні моделі.

4. Відповідно до поставлених задач роботи, аналіз наукових статей дослідження питань кінематики неусталеного криволінійного руху МТА або енергетичного засобу показав, що методи отримання траєкторії та формули для визначення параметрів кінематики повороту агрегату мають ряд недоліків для використання на практиці:

- математичні рівняння для визначення траєкторії руху енергетичного засобу надто складні для використання на практиці та залежать від багатьох вхідних параметрів, які складно визначити;

- багато науковців використовують досвід ведення агрегату по полю людиною, пропонують графічному відображенні алгоритми планування шляху для прямолінійного і криволінійного руху автономного агрегату, без наведення вихідних математичних рівнянь руху, їх розв'язку та перевірки адекватності отриманих результатів;

- деякі науковці використовують графічні методи отримання траєкторії руху, сегменти траєкторії замінюють параболічними кривими з супроводом наведених формул та алгоритмом програмування вихідних параметрів з визначенням точності отриманих кривих до вихідних лінійних ламаних. В результаті пропонується метод отримання параболічної кривої траєкторії

криволінійного руху, але не наведено кінцеві математичні рівняння траєкторії руху агрегату;

- частина науковців використовують експеримент в якості планування траєкторії: отримують траєкторію руху трактора на поверхні поля, потім експериментальні координати перетворюють і отримують теоретичну траєкторію руху, але цей метод складний і не може бути використаний на практиці, так як вимагає проведення досліду і не має можливості моделювання маневрів агрегату по полю за допомогою параметричних рівнянь руху;

- для моделювання траєкторії руху агрегату інші науковці розглядають спрощену траєкторію повороту агрегату, яка складається з лінійної та колової ділянок з визначенням тільки оптимального радіусу повороту для агрегату, без перехідних ділянок маневру, в той час не встановлений взаємозв'язок між початково-вихідними даними і відсутні прості аналітичні рівняння криволінійного руху агрегату з усіма керованими колесами. Як моделювати траєкторії агрегату за допомогою кінцевих простих математичних рівнянь не наведено. Запропоновано лише формули для визначення кінематичних параметрів.

5. Сучасний стан систем автоматичного водіння агрегатів – те що декларують виробники, стосується антени GPS і ніяк не стосується автоматичного ведення агрегату в цілому. Чим більше параметрів досліджується в системі рівнянь, тим складніше вона має рішення і може не мати взагалі розв'язку. Чим більше параметрів враховує система рівнянь, тим більша похибка отриманих результатів, яка зростає, пропорційно кількості задіяних параметрів. Тому виникає необхідність розробки спрощеної математичної моделі (простих рівнянь в параметричній формі) криволінійного руху агрегату зі всіма керованими колесами під час виконання технологічних операцій, яка не потребує використання чисельних

методів. А від так не є ресурсоємкісною, і може бути застосована для автоматів керування енергетичних засобів.

Список використаних джерел до розділу 1

1. Al-khayyt, SZS. (2018). Creating Through Points in Linear Function with Parabolic Blends Path by Optimization Method. Al-Khwarizmi Engineering Journal, 14(1): 77-89. doi:[10.22153/kej.2018.10.005](https://doi.org/10.22153/kej.2018.10.005).
2. Anas Azmi, M., Mohammad, R., El Pebrian, D.. (2022) A computer-based mapping approach for evaluating straight-line accuracy of autopilot tractor traversing the oil palm field terrain, Smart Agricultural Technology, Volume 2, 100033., 1-8. doi:/10.1016/j.atech.2021.100033.
3. Bulgakov, V., Pascuzzi, S. & Beloev, H. (2019). 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>
4. Binh N.T., Tung N.A., Nam D.P. et al. (2019). An Adaptive Backstepping Trajectory Tracking Control of a Tractor Trailer Wheeled Mobile Robot. Int. J. Control Autom. Syst. 17, 465–473 <https://doi.org/10.1007/s12555-017-0711-0>
5. A. Bouzar, Essaidi, O, Lakhal, V, Coelen, A, Belarouci, M, Haddad, R, Merzouki (2020). Trajectory Planning For Autonomous Wheeled Mobile Robots With Trailer, IFAC-PapersOnLine, 53(2):9766-9771. doi:[10.1016/j.ifacol.2020.12.2657](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.2657)
6. Гарькавий А.Д. Методичні вказівки по виконанню лабораторних робіт з дисципліни Експлуатація техніки та обладнання в рослинництві [Електронний ресурс] / А.Д. Гарькавий, Д.Г. Кондратюк, О.Г. Холодюк // Вінниця. – 2005. – Режим доступу до ресурсу: <https://studfile.net/preview/1862388/page:11/#1862388>.

7. Jing, Y., Liu, G., Luo, C. (2021). Path tracking control with slip compensation of a global navigation satellite system based tractor-scraper land levelling system, *Biosystems Engineering*, Volume 212, Pages 360-377, ISSN 1537-5110, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.11.010>

8. Kambarov, B. (2016, July 28-29). Jeksperimental'noe opredelenie parametrov traektorii dvizhenija kul'tivatornogo mashinno-traktornogo agregata na povorotnoj polose hlopkovogo polja [Experimental determination of the parameters of the movement trajectory tiller machine and tractor units on the headland cotton field] *European Research: Innovation in Science, Education and Technology: Sb. st. po mat.: XVIII mezhd. nauch.-prakt. konf., №7(18)*, (pp.21-24). London (in United Kingdom).

9. Kassaeiyan, P., Alipour, K., Tarvirdizadeh, B. (2020). A full-state trajectory tracking controller for tractor-trailer wheeled mobile robots, *Mechanism and Machine Theory*, Volume 150, 103872, ISSN 0094-114X, <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2020.103872>

10. Murillo, M. & Sanchez, Guido & Deniz, Nahuel & Genzelis, Lucas & Giovanini, Leonardo. (2022). Improving path-tracking performance of an articulated tractor-trailer system using a non-linear kinematic model. *Computers and Electronics in Agriculture*. 196. 106826. 10.1016/j.compag.2022.106826.

11. Song, M.Z., Kang, S.W., Chung, S.O., Kim, K.D., Chae, Y.S., Lee, D.H., Kim, Y.J., Yu, S.H. & Lee, K.H. (2013). Development of Path Planning Algorithm for an Autonomous Mower Tractor. 4th IFAC Conference on Modelling and Control in Agriculture, Espoo, August 2013. Horticulture and Post Harvest Industry. Finland, p 154. doi:[10.7744/cnujas.2015.42.1.063](https://doi.org/10.7744/cnujas.2015.42.1.063).

12. Yue, M., Hou, X., Gao, R. et al. (2018). Trajectory tracking control for tractor-trailer vehicles: a coordinated control approach. *Nonlinear Dyn* 91, 1061–1074. <https://doi.org/10.1007/s11071-017-3928-9>.

13. Yue, M., Hou, X., Zhao, X. and Wu, X. (2020). "Robust Tube-Based Model Predictive Control for Lane Change Maneuver of Tractor-Trailer Vehicles

Based on a Polynomial Trajectory," in IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, vol. 50, no. 12, pp. 5180-5188, Dec. 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/TSMC.2018.2867807>.

14. Zhou, Y., Wang, Z. & Chung, Kw. (2019). Turning Motion Control Design of a Two-Wheeled Inverted Pendulum Using Curvature Tracking and Optimal Control Theory. J Optim Theory Appl 181, 634–652 <https://doi.org/10.1007/s10957-019-01472-4>.

15. Zhou, S. et al., (2020). "Robust Path Following of the Tractor-Trailers System in GPS-Denied Environments," in IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 5, no. 2, pp. 500-507, April 2020, doi: 10.1109/LRA.2019.2956380

16. Zhou, Y., Wen., X., Wang, Z. (2020). On the nonholonomic constraints and motion control of wheeled mobile structures¹) [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 52(4): 1143-1156. doi: 10.6052/0459-1879-19-257

17. Zhou, Y. & Wen, X. & Xu, Qi. (2021). Precise motion control of tractor-trailer wheeled mobile structures via a newly observed key motion law. Nonlinear Dynamics. 103. <https://doi.org/10.1007/s11071-020-06162-9>

18. Zhou, Y., Chung, K. Path tracking control of a tractor-trailer wheeled robot kinematics with a passive steering angle, Applied Mathematical Modelling, Volume 109, 2022, P. 341-357, <https://doi.org/10.1016/j.apm.2022.04.025>.

19. Peng, H., Shi, B., Song, J., Wang, X. A symplectic method for trajectory planning of general tractor-trailer systems, Applied Mathematical Modelling, Volume 114, 2023, Pages 205-229, <https://doi.org/10.1016/j.apm.2022.10.008>

20. Довжик М. Я., Сіренко Ю. В., & Калнагуз О. М. (2022). Аналіз кінематики руху польових агрегатів зі всіма керованими колесами. Вісник Сумського НАУ. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів, 2(48), 14-20. <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.2.3>.

21. Ardentov, Andrei. (2016). Controlling of a mobile robot with a trailer and its nilpotent approximation. *Regular and Chaotic Dynamics*. 21. 775-791. doi:10.1134/S1560354716070017.
22. P. Panahandeh, K. Alipour, B. Tarvirdizadeh, A. Hadi, (2019) A kinematic Lyapunov-based controller to posture stabilization of wheeled mobile robots, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 134, 106319, doi:10.1016/j.ymssp.2019.106319.
23. Mondal, K., Rodriguez, A. A., Manne, S. S., Das, N., & Wallace, B. (2019). Comparison of kinematic and dynamic model based linear model predictive control of non-holonomic robot for trajectory tracking: Critical Trade-offs Addressed. In *Proceedings of the IASTED International Conference on Mechatronics and Control, MC 2019* (pp. 9-17). (Proceedings of the IASTED International Conference on Mechatronics and Control, MC 2019). ACTA Press. doi:10.2316/P.2019.860-017.
24. L. Tang, F. Yan, B. Zou, K. Wang and C. Lv, (2020) "An Improved Kinematic Model Predictive Control for High-Speed Path Tracking of Autonomous Vehicles," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 51400-51413, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2980188.
25. Калнагуз О.М. Рух енергетичного засобу по полю та способи його повороту/ О.М. Калнагуз // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Експлуатаційна та сервісна інженерія» «AutoTRAK-2023» . (4-5 травня 2023 року).– Київ: НУБіП України, 2023. – 193 с. (С.30-34).].
26. Калнагуз О. М. Рух енергетичного засобу по полю та способи його повороту. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Експлуатаційна та сервісна інженерія», Київ, Україна, 4–5 трав. 2023 / Національний університет біоресурсів і природокористування України. М. Київ : НУБіП, 2023. С. 30–31.
27. Yang Yang, Gang Zhang, Zhizhen Chen, Xing Wen, Shangkun Cheng, Qianglong Ma, Jian Qi, Yang Zhou, Liqing Chen, (2022) An independent steering

driving system to realize headland turning of unmanned tractors, Computers and Electronics in Agriculture, Volume 201, 107278, doi: /10.1016/j.compag.2022.107278.

28. Каплонюк А. Автопілоти на сільськогосподарську техніку. ТОВ "ФРЕНДТ" - центр точного землеробства. Сайт <https://store.frendt.com.ua/>. сайт Центра точного землеробства / головна. URL: <https://store.frendt.com.ua/ua/g59436450-avtopiloty-selskohozyajstvennuyu-tehniku> (дата звернення: 08.11.2024).

29. Калнагуз О.М. Автоматизація енергозасобів в сільському господарстві / Петренко І.В., Харченко Ф.М., Калнагуз О.М. // Матеріали Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–19 жовтня 2024 року) / МОН України, НУБіП України. Київ. 2024. 527с. – (с. 223–225). https://drive.google.com/file/d/1lRYfKiRndxJNBm1X8mCKfs6_hXsequZl/view?usp=drive_link].

30. Макаренко М. Трактор як інтелектуальна система оптимального керування. Журнал "Агробізнес Сьогодні". <https://agro-business.com.ua/>. Статті/ Механізація АПК. 26.02.2018. URL: <https://agro-business.com.ua/agro/mekhanizatsiia-apk/item/9578-traktor-iaak-intelektualna-systema-optymalnoho-keruvannia.html> (дата звернення: 11.08.2025).

31. Крюков Д. Супутникові технології у сільському господарстві. Головний журнал з питань агробізнесу "Пропозиція". Сайт <https://propozitsiya.com/ua>. Головна/Статті/Техніка та обладнання/Інше. 26.07.2024. URL: <https://propozitsiya.com/articles/tekhnika-ta-obladnannya-inshe/suputnykovi-tekhnohohiyi-u-silskomu-hospodarstvi> (дата звернення: 11.12.2024).

32. Сіренко Ю.В. Дослідження та обґрунтування ефективних прийомів використання польових агрегатів : дис. ... д-ра філософії у галузі 20 Аграр. науки та продовольство : 133 Галузеве машинобудування / Сумський

національний аграрний університет. Суми, 2021. 198 с. URL: https://drive.google.com/file/d/1iwwQ81FZafecKG8BSI6WlaCKWx-1p_8j/view (дата звернення: 12.01.2025).

33. Бойко Я. Точне землеробство по-американськи: впроваджувати інновації — (не)дорого?. Агровини України та світу. Сайт <https://agroportal.ua/>. Головна/Блоги. 18.09.2018. URL: <https://agroportal.ua/blogs/tochnoe-zemledelie-poamerikanski-vnedryat-innovatsii-ne-dorogo> (дата звернення: 11.08.2025).

34. Перспективи та особливості точного землеробства в 2025. Сайт. <https://agroexp.com.ua/> Група компаній «АГРОЕКСПЕРТ-ТРЕЙД». Головна/. 24.01.2025. URL: <https://agroexp.com.ua/uk/perspektivy-i-osobennosti-tochnogo-zemledeliya> (дата звернення: 12.08.2025).

35. Богданов І. Названо основні етапи переходу господарств на точне землеробство, — досвід.. SuperAgronom.com. Головний сайт агрономів. Головна/Новини/Україна. 21.04.2021. URL: <https://superagronom.com/news/13011-nazvano-osnovni-etapi-perehodu-gospodarstv-na-tochne-zemlerobstvo--dosvid> (дата звернення: 12.08.2025).

36. Набок В. Точність – 2 сантиметри на полі 100 га. Журнал сучасного агропромисловця «Зерно». Головна / Журнали /. 27.03.2016. URL: <https://www.zerno-ua.com/journals/2011/fevral-2011-god/tochnost-2-santimetra-na-pole-v-100-ga/> (дата звернення: 13.08.2025).

37. Системи паралельного водіння, Агронавігація. Сайт <https://gpsgeometer.com>. Компанія Геометр Інтернешнл - виробник GNSS/RTK пристроїв та розробник програмного забезпечення для систем високоточного супутникового позиціонування.. Головна / Обладнання. URL: <https://gpsgeometer.com/catalog/tractor-gps-gnss-guidance-systems?srsId=AfmBOoqU2eqjRFcP52pOfrCXRyYusyQUZVF9i575fMckG2VVUOXMkckV> (дата звернення: 13.08.2025).

38. Несмачна М. Огляд систем паралельного водіння сільгосптехніки. Сайт <https://traktorist.ua/> Біржа сільгосптехніки. Головна / Статті /. 06.05.2021. URL: <https://traktorist.ua/articles/oglyad-sistem-paralelnogo-vodinnya-silgospptehniki> (дата звернення: 14.01.2025).

39. Вимірювання площі поля – перший крок до точного землеробства. Сайт <https://soft.farm.> Головна/. 19.10.2023. URL: <https://soft.farm/uk/blog/vimiruvanna-plosi-pola-persij-krok-do-tocnogo-zemlerobstva-200> (дата звернення: 14.01.2025).

40. Електричний або гідравлічний автопілот на трактор. Що вибрати?. Сайт <https://shop.gpsgeometer.com.> ГеоМетр Україна. Головна / Блог. 08.10.2021. URL: <https://shop.gpsgeometer.com/ua/blog/elektricheskij-ili-gidravlicheskij-avtopilot-na-traktor-chto-vybrat> (дата звернення: 15.08.2025).

41. Wang H, Noguchi N. (2018) Adaptive turning control for an agricultural robot tractor. *Int J Agric & Biol Eng*; 11(6). 113–119. doi: <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181106.3605>.

42. X. Tu, L. Tang. (2019) Headland Turning Optimisation for Agricultural Vehicles and Those with Towed Implements, *Journal of Agriculture and Food Research*, 1, 1-41,. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2019.100009>.

43. Fendt модернізував трактори серії 500, 900 і 1000 Vario. Всеукраїнський аграрний журнал "АгроЕліта". Сайт <https://agroelita.info/>. Головна / Новини /. 13.08.2021. URL: <https://agroelita.info/fendt-modernizuvav-traktory-serii-500-900-i-1000-vario/> (дата звернення: 30.07.2025).

44. Michele Catinari, Джерело: Agco. Fendt TeachIn Turn Assistant Adds Exclusive Automation for Headland Turns. *North America FarmQuip Magazine*. Сайт <https://www.americafem.com/>. Agricultural /Equipment/Tractors/Brand Index/AGCO. 31.08.2021. URL: <https://www.americafem.com/2021/08/31/fendt-teachin-turn-assistant-adds-exclusive-automation-for-headland-turns/> (дата звернення: 29.07.2024).

45. Ясній П.В. Методи моніторингу та розрахунку експлуатаційних впливів і динаміки руху колісних транспортних систем при транспортуванні великогабаритних вантажів : навчальний посібник / П.В. Ясній , В.З. Гудь , Ю.І. Пиндус , М. І. Гудь та ін. – Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2018. – 168 с. https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/24260/1/Navchalnyj_posibnyk_Gud_V_Z_.pdf

46. Бобошко О.А. Наукові основи підвищення показників маневреності автомобілів : дис. ... д-ра техн. наук : спеціальність 05.22.02 – Автомобілі і трактори. Галузь знань – 27 Транспорт / Харківський національний автомобільно-дорожній університет. Харків, 2019. 332 с. URL: https://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_Vchena_rada/VR_64_059_02/dis_Boboshko.pdf (дата звернення: 06.08.2025).

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТРАЄКТОРІЇ КРИВОЛІНІЙНОГО РУХУ ЧОТИРЬОХКОЛІСНОГО ЕНЕРГОЗАСОБУ З УСІМА КЕРОВАНИМИ КОЛЕСАМИ

2.1 Дослідження закономірностей кінематичних параметрів енергетичного засобу криволінійного руху

Криволінійний рух на поворотній смузі, є найбільш складним елементом кінематики агрегату, так як окремі його точки рухаються з різною швидкістю і описують різні траєкторії. Колісний машинно-тракторний агрегат не може миттєво перейти від прямолінійного руху до руху по дузі кола (зокрема, не може здійснювати поворот на деформованому ґрунті з мінімально допустимим радіусом) і від руху по дузі кола до прямолінійного руху. Він проходить ділянки зі змінними радіусами кривизни від $R = \infty$ до $R = R_d$ - при вході в поворот і від $R = R_d$ до $R = \infty$ - при виході з повороту [10].

Відомо два види найпростішого криволінійного руху чотирьохколісної машини: коловий рух по колу з постійним радіусом і незмінним положенням центра кривизни і, так званий, несталий (нелінійний) рух, при якому радіус кривизни траєкторії та інші параметри змінюються у часі. Останній випадок є загальний, а перший можна розглядати як частковий.

Розглянемо незалежне керування колесами обох осей під час входу в лівий поворот з постійною швидкістю v центра мас C (рис. 2.1) без урахування відведення коліс. Приймаємо позначення: $\alpha_1 = 0,5(\alpha_{1e} + \alpha_{13})$ – середній кут повороту передніх коліс у довільній точці знаходження центра C з координатами (x, y) ; $\alpha_2 = 0,5(\alpha_{2e} + \alpha_{23})$ – відповідний середній кут повороту задніх коліс, $\alpha_{1e}, \alpha_{2e}, \alpha_{13}, \alpha_{23}$, – кути повороту внутрішніх, відносно кривизни

траєкторії (показана пунктирною лінією), і зовнішніх коліс; φ – кут повороту остова енергетичного засобу; α – кут між вектором швидкості v і віссю трактора (курсний кут); R_T – теоретичний радіус повороту енергетичного засобу, що визначається без урахування відведення коліс; R – миттєвий радіус кривизни траєкторії в точці C .

Відомі співвідношення [11] $R_T = L / (\operatorname{tg} \alpha_1 + \operatorname{tg} \alpha_2) = L / (\alpha_1 + \alpha_2)$ і $\alpha = (\alpha_1 \ell_2 - \alpha_2 \ell_1) / L$, отримані для часткового випадку, коли чотирьохколісний енергетичний засіб з усіма керованими колесами здійснює правий поворот і при цьому середні кути повороту передніх і задніх коліс мають різні знаки, а саме: $\alpha_1 < 0$ і $\alpha_2 > 0$. Формули для R_T і α у загальному вигляді отримаємо, розглядаючи вхід енергетичного засобу в лівий поворот, коли всі кутові параметри додатні. Із $\triangle BDO_T$ (рис. 2.1) відрізок $\overline{BD} = R_T \operatorname{tg} \alpha_2 \approx R_T \alpha_2$, а з $\triangle ADO_T$ відрізок $\overline{AD} = R_T \operatorname{tg} \alpha_1 \approx R_T \alpha_1$. Тоді $\overline{AD} = L + \overline{BD}$, звідки маємо:

$$R_T = \frac{L}{\alpha_1 - \alpha_2}; \alpha = \frac{\overline{DC}}{R_T} = \frac{R_T \alpha_1 - \ell_1}{R_T} = \frac{\alpha_1 \ell_2 + \alpha_2 \ell_1}{L} \quad (2.1)$$

Ці формули справедливі для всіх можливих маневрів чотирьохколісного енергетичного засобу з усіма керованими колесами: вхід в поворот і вихід з повороту обох видів (як лівого так і правого), незалежно від того, які осі приймають участь у здійсненні входу в поворот, чи виходу з повороту, а також і під час так званого крабовидного руху, коли колеса обох осей повернуті на однаковий кут (прямолінійний рух під кутом α до осі Ox).

Тут і далі тангенс і синуси кутів α , α_1 , α_2 і φ приймаються рівними відповідним кутам в зв'язку з їх малістю, що тим більше допустимо для енергетичних засобів з жорсткою рамою, наприклад тракторів серії ХТЗ 120/160, у яких обмежені кути повороту керованих коліс. Всі кути в

формулах (2.1) слід приймати з урахуванням знаків відповідно до використаної системи координат.

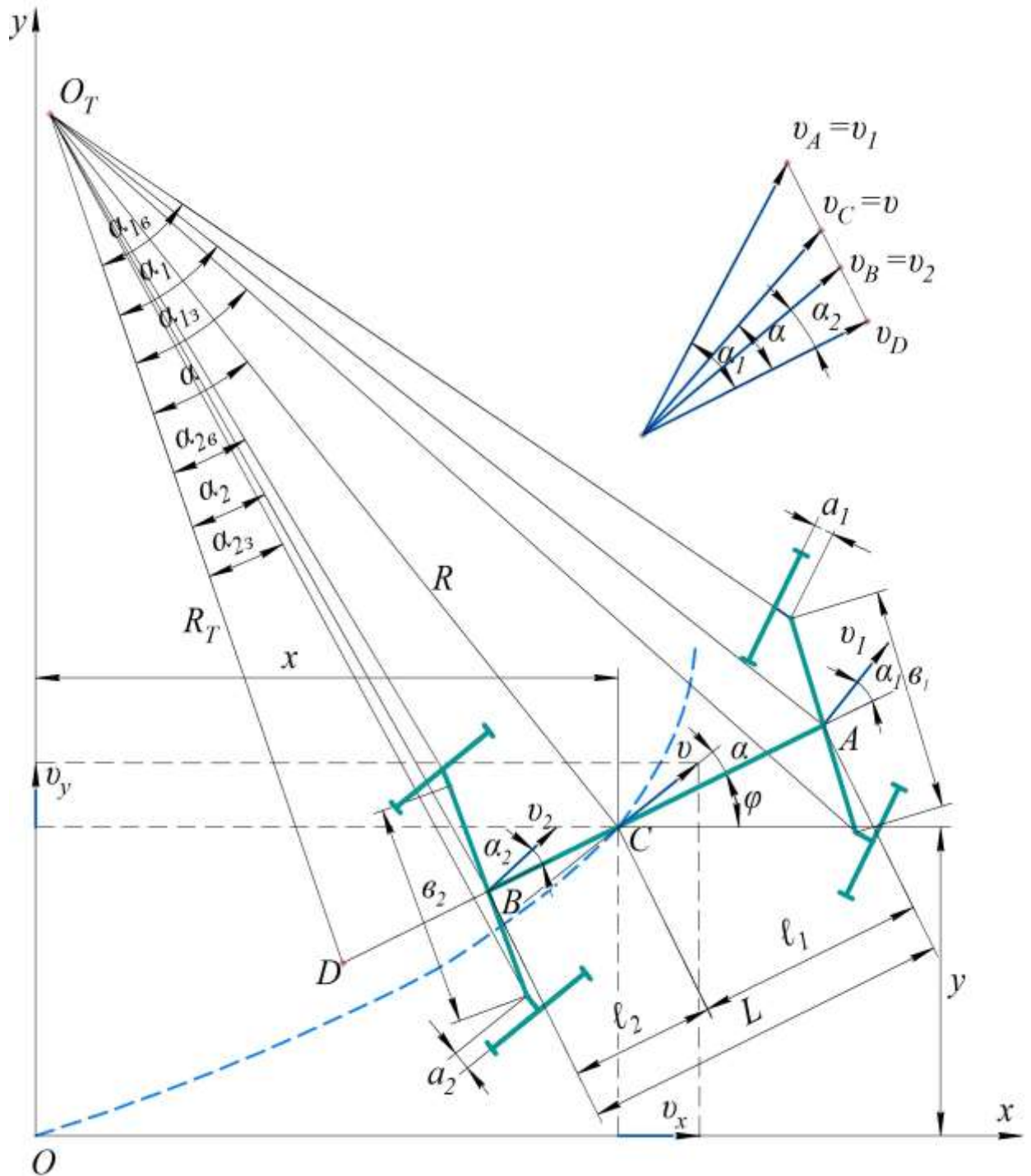


Рисунок 2.1 – Вхід в лівий поворот чотирьохколісного енергетичного засобу з усіма керованими колесами

2.2 Отримання математичних рівнянь траєкторії руху маневрів для енергетичних засобів

Проекції швидкості v на осі координат у довільній точці траєкторії з координатами (x, y) , якщо швидкість v залишається постійною за весь час криволінійного руху, дорівнюють:

$$\begin{aligned} v_x &= v \cos(\alpha + \varphi); \\ v_y &= v \sin(\alpha + \varphi); \end{aligned} \quad (2.2)$$

а самі координати будуть:

$$\begin{aligned} x &= \int v_x dt = v \int \cos(\alpha + \varphi) dt; \\ y &= \int v_y dt = v \int \sin(\alpha + \varphi) dt. \end{aligned} \quad (2.3)$$

В цих рівняннях під інтегралами маємо три незалежні змінні величини: α , φ і час t . Функцію курсового кута логічно прийняти лінійною, оскільки при рівномірному обертанні керма кут α пропорційний кутам α_1 і α_2 :

$$\alpha = \alpha_{\Pi} + \alpha_3 = \alpha_{оп} + k_{\Pi}t + \alpha_{оз} + k_3t = \alpha_o + kt \quad (2.4)$$

де $\alpha_o = \alpha_{оп} + \alpha_{оз}$ – початкове значення повного кута α на початку входу в поворот ($t = 0$); $\alpha_{оп}$ і $\alpha_{оз}$ – початкові значення складових повного курсового кута, обумовлені поворотом, відповідно, передніх і задніх осей; $k = k_{\Pi} + k_3$ – повне значення коефіцієнта інтенсивності зміни курсового кута; k_{Π} і k_3 – коефіцієнти інтенсивності зміни складових повного курсового кута, обумовлені поворотом, відповідно, передніх і задніх коліс.

Звичайно середні значення кутів повороту передніх і задніх коліс можна виразити через відповідні коефіцієнти інтенсивності їх зміни k_1 і k_2 , які є не що інше, як кутові швидкості обертання передніх і задніх коліс в горизонтальній площині:

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= \alpha_{10} + k_1 t; \\ \alpha_2 &= \alpha_{20} + k_2 t,\end{aligned}\tag{2.5}$$

де α_{10} і α_{20} – початкові значення кутів α_1 і α_2 .

Із співвідношень (2.1) маємо залежності:

$$\begin{aligned}k_{\Pi} &= \frac{\ell_2}{L} k_1 = \frac{\alpha_{\Pi K} - \alpha_{\Pi O}}{t}; \\ k_3 &= \frac{\ell_2}{L} k_2 = \frac{\alpha_{3K} - \alpha_{3O}}{t},\end{aligned}\tag{2.6}$$

де $\alpha_{\Pi K}$ і α_{3K} – значення кутів α_{Π} і α_3 в кінці повороту.

Тепер необхідно виразити кут φ , як функцію часу t . Елементарна дуга dS траєкторії центра C , що відповідає нескінченно малому часу dt буде:

$$\begin{aligned}dS &= R d\varphi = v dt; \\ R &= \frac{\overline{CD}}{\alpha} = \frac{\overline{CD}}{\alpha_0 + kt}.\end{aligned}\tag{2.7}$$

Оскільки при вході в лівий поворот радіус кривизни траєкторії позитивний, а знаки відрізка $\overline{CD}$ і кута α однакові, то згідно (2.7) і з урахуванням (2.1), (2.3) і (2.4) маємо:

$$d\varphi = \frac{v}{\overline{CD}} \alpha dt = \frac{v}{L} (\alpha_{\Pi} - \alpha_3) dt = v \left(\frac{\alpha_{\Pi}}{\ell_2} - \frac{\alpha_3}{\ell_1} \right) dt = v \left(\frac{\alpha_{\Pi O} + k_{\Pi} t}{\ell_2} - \frac{\alpha_{3O} + k_3 t}{\ell_1} \right). \tag{2.8}$$

Диференціал $d\varphi$ можна також виразити через час t , скориставшись планом швидкостей (рис. 2.1):

$$d\varphi = \omega dt = \frac{v_{CD}}{\overline{CD}} dt = v_{\alpha} \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{\alpha_1 \ell_2 + \alpha_2 \ell_1} dt = \frac{v}{L} (\alpha_1 - \alpha_2) = v \left(\frac{\alpha_{\Pi}}{\ell_2} - \frac{\alpha_3}{\ell_1} \right).$$

Тоді:

$$\varphi = v \left(\frac{\alpha_{\Pi O} t + 0,5 k_{\Pi} t^2}{\ell_2} - \frac{\alpha_{3O} t + 0,5 k_3 t^2}{\ell_1} \right) = v (mt + 0,5 nt^2), \tag{2.9}$$

звідки:

$$\nu = \frac{\varphi}{mt + 0,5nt^2},$$

$$t = -\frac{m}{n} + \sqrt{\frac{m^2}{n^2} + \frac{2\varphi}{\nu n}},$$

де $m = \frac{\alpha_{по}}{\ell_2} - \frac{\alpha_{зо}}{\ell_1}; n = \frac{k_{п}}{\ell_2} - \frac{k_3}{\ell_1}$. Розмірність цих коефіцієнтів:

$$[m] = \mathcal{M}^{-1}; [n] = \mathcal{M}^{-1}\mathcal{C}^{-1}.$$

Тепер інтегральні рівняння (2.3) можна записати у вигляді:

$$\begin{aligned} x &= \nu \int \cos \left[\alpha_0 + kt + \frac{\nu}{\ell_2} (\alpha_{по}t + 0,5k_{п}t^2) + \frac{\nu}{\ell_1} (\alpha_{зо}t + 0,5k_3t^2) \right] dt; \\ y &= \nu \int \sin \left[\alpha_0 + kt + \frac{\nu}{\ell_2} (\alpha_{по}t + 0,5k_{п}t^2) + \frac{\nu}{\ell_1} (\alpha_{зо}t + 0,5k_3t^2) \right] dt. \end{aligned} \quad (2.10)$$

Розкладаючи синус і косинус в ряди Маклорена і взявши для косинуса перші два члени ряду, а для синуса – один перший член, отримаємо підінтегральні функції у вигляді степеневих відносно часу t багаточленів.

$$\begin{aligned} x &= \nu t \left(1 - \frac{1}{2} \alpha_0^2 - \frac{1}{2} \alpha_0 kt - \frac{1}{2} \frac{\alpha_0 \alpha_{по} \nu}{\ell_2} t + \frac{1}{2} \frac{\alpha_0 \alpha_{зо} \nu}{\ell_1} t - \frac{1}{6} k^2 t^2 - \frac{1}{6} \frac{\alpha_0 k_{п} \nu}{\ell_2} t^2 + \right. \\ &+ \frac{1}{6} \frac{\alpha_0 k_3 \nu}{\ell_1} t^2 - \frac{1}{3} \frac{\alpha_{по} k \nu}{\ell_2} t^2 + \frac{1}{3} \frac{\alpha_{зо} k \nu}{\ell_1} t^2 - \frac{1}{6} \frac{\alpha_{по}^2 \nu^2}{\ell_2^2} t^2 - \frac{1}{6} \frac{\alpha_{зо}^2 \nu^2}{\ell_1^2} t^2 + \\ &+ \frac{1}{3} \frac{\alpha_{по} \alpha_{зо} \nu^2}{\ell_1 \ell_2} t^2 - \frac{1}{8} \frac{k k_{п} \nu}{\ell_2} t^3 + \frac{1}{8} \frac{k k_3 \nu}{\ell_1} t^3 - \frac{1}{8} \frac{\alpha_{по} k_{п} \nu^2}{\ell_2^2} t^3 + \frac{1}{8} \frac{\alpha_{зо} k_{п} \nu^2}{\ell_1 \ell_2} t^3 + \\ &+ \left. \frac{1}{8} \frac{\alpha_{по} k_3 \nu^2}{\ell_1 \ell_2} t^3 - \frac{1}{8} \frac{\alpha_{зо} k_3 \nu^2}{\ell_1^2} t^3 - \frac{1}{40} \frac{k_{п}^2 \nu^2}{\ell_2^2} t^4 + \frac{1}{20} \frac{k_{п} k_3 \nu^2}{\ell_1 \ell_2} t^4 - \frac{1}{40} \frac{k_3^2 \nu^2}{\ell_1^2} t^4 \right); \\ y &= \nu t \left(\alpha_0 + \frac{1}{2} kt + \frac{1}{2} \frac{\alpha_{по} \nu}{\ell_2} t + \frac{1}{6} \frac{k_{п} \nu}{\ell_2} t^2 - \frac{1}{2} \frac{\alpha_{зо} \nu}{\ell_1} t - \frac{1}{6} \frac{k_3 \nu}{\ell_1} t^2 \right). \end{aligned} \quad (2.11)$$

Після спрощення ці рівняння можна записати у вигляді:

$$\begin{aligned}
x &= \nu t \left[\left(1 - \frac{\alpha_o}{2} \right)^2 - \frac{\alpha_o}{2} (k + \nu m) t - \frac{1}{6} (k^2 + \alpha_o \nu n + 2k\nu m + \nu^2 m^2) t^2 - \right. \\
&\quad \left. - \frac{1}{8} \nu n (k + \nu m) t^3 - \frac{1}{40} \nu^2 n^2 t^4 \right]; \\
y &= \nu t \left[\alpha_o + \frac{1}{2} (k + \nu m) t + \frac{1}{6} \nu n t^2 \right].
\end{aligned} \tag{2.12}$$

Ці рівняння можна також отримати з інтегральних рівнянь (2.10), скориставшись виразом (2.9) для кута повороту корпусу трактора:

$$\begin{aligned}
x &= \nu \int \cos[\alpha_o + kt + \nu(mt + 0,5nt^2)] dt = \nu \int \left\{ 1 - \frac{1}{2} [\alpha_o + kt + \nu(mt + 0,5nt^2)]^2 \right\} dt = \\
&= \nu t \left(1 - \frac{\alpha_o^2}{2} - \frac{1}{6} k^2 t^2 - \frac{1}{2} \alpha_o kt - \frac{1}{2} \alpha_o \nu mt - \frac{1}{3} k \nu m t^2 - \frac{1}{8} k \nu n t^3 - \frac{1}{6} \alpha_o \nu n t^2 - \right. \\
&\quad \left. - \frac{1}{6} \nu^2 m^2 t^2 - \frac{1}{8} \nu^2 m n t^3 - \frac{1}{40} \nu^2 n^2 t^4 \right) = \nu t \left[1 - \frac{\alpha_o^2}{2} - \frac{\alpha_o}{2} (k + \nu m) t - \right. \\
&\quad \left. - \frac{1}{6} (k^2 + 2k\nu m + \alpha_o \nu n + \nu^2 m^2) t^2 - \frac{1}{8} \nu n (k + \nu m) t^3 - \frac{1}{40} \nu^2 n^2 t^4 \right]; \\
y &= \nu \int \sin[\alpha_o + kt + \nu(mt + 0,5nt^2)] dt = \nu \int [\alpha_o + kt + \nu(mt + 0,5nt^2)] dt = \\
&= \nu t \left(\alpha_o + \frac{1}{2} kt + \frac{1}{2} \nu mt + \frac{1}{6} \nu n t^2 \right) = \nu t \left[\alpha_o + \frac{1}{2} (k + \nu m) t + \frac{1}{6} \nu n t^2 \right].
\end{aligned} \tag{2.13}$$

Рівняння (2.11), (2.12) і (2.13) можна записати також у вигляді степеневих багаточленів:

$$\begin{aligned}
x &= \nu t (a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4); \\
y &= \nu t (b_0 + b_1 t + b_2 t^2),
\end{aligned} \tag{2.14}$$

$$\text{де } \alpha_o = 1 - \frac{\alpha_o^2}{2}; b_0 = \alpha_o;$$

$$\alpha_1 = -\frac{\alpha_o}{2} (k + \nu m); b_1 = \frac{1}{2} (k + \nu m);$$

$$\alpha_2 = -\frac{1}{6} (k^2 + 2k\nu m + \alpha_o \nu n + \nu^2 m^2); b_2 = \frac{1}{6} \nu n;$$

$$\alpha_3 = -\frac{1}{8}vn(k + \nu m);$$

$$a_4 = -\frac{1}{40}v^2n^2.$$

2.3 Придатність (універсальність) отриманих рівнянь для прямолінійного руху

Отримані рівняння описують також прямолінійний рух трактора, який може мати різновиди:

1. Прямий хід вздовж осі Ox , при цьому $\alpha_0 = 0$, $k = 0$, тоді $x = \nu t$, $y = 0$.
2. Крабовий хід, коли всі колеса повернуті в один бік на однаковий кут.

У цьому випадку $\alpha = \alpha_{\pi} + \alpha_3 = \alpha_1 \frac{\ell_2}{L} + \alpha_2 \frac{\ell_1}{L} = \alpha_{12} = \alpha_0$.

З урахуванням, що $\frac{\alpha_{30}}{\ell_1} - \frac{\alpha_{\pi 0}}{\ell_2} = \frac{\ell_2}{L} - \frac{\ell_1}{L} = \alpha_2 - \alpha_1 = 0$, рівняння траєкторії

руху будуть:

$$\begin{aligned} x &= \nu t \left(1 - \frac{\alpha_0^2}{2} \right); \\ y &= \nu t \alpha_0. \end{aligned} \tag{2.15}$$

3. Можливий ще один вид несталеного руху – так званий крабовидний вхід в поворот або вихід з повороту, – коли колеса обох осей синхронно повертаються на змінні у часі кути.

В цьому випадку $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_{10} + k_1 t = \alpha_{20} + k_2 t$, де $k_1 = k_2 = k_{12}$.

Вісь остова машини не обертається відносно осі Ox , тому $\varphi = 0$, але траєкторія будь-якої точки корпусу повинна мати кривизну, тому що курсовий кут змінюється у часі:

$$\alpha = \frac{\alpha_1 \ell_2 + \alpha_2 \ell_1}{L} = \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_{12}.$$

Згідно (2.9) маємо $m = \alpha_1 - \alpha_2 = 0$, $n = k_1 - k_2 = 0$. Рівняння траєкторії у цьому випадку приймають вид:

$$\begin{aligned} x &= vt \left(1 - \frac{1}{2} \alpha_0^2 - \frac{1}{2} k \alpha t - \frac{1}{6} k^2 t^2 \right); \\ y &= vt \left(\alpha_0 - \frac{1}{2} k t \right). \end{aligned} \quad (2.16)$$

2.4 Коловий рух енергетичного засобу зі всіма керованими колесами

Траєкторія колового руху енергетичного засобу з фіксованим положенням керма наведеними вище рівняннями не описується.

Для цього випадку були отримані рівняння раніше [2], для чого в інтегральних рівняннях (2.3) було прийнято $k = 0$ і $\alpha = \alpha_0$. В разі передніх керованих коліс колові траєкторії мають рівняння:

$$\begin{cases} x = \frac{\ell_2}{\alpha_0} \left\{ \sin \left[\alpha_0 \left(1 + \frac{v}{\ell_2} t \right) \right] - \sin \alpha_0 \right\}; \\ y = \frac{\ell_2}{\alpha_0} \left\{ \cos \alpha_0 - \cos \left[\alpha_0 \left(1 + \frac{v}{\ell_2} t \right) \right] \right\}. \end{cases} \quad (2.17)$$

Якщо ж керовані колеса всі, то з урахуванням (2.4) і (2.9) рівняння для колових траєкторій можна також отримати, вирішуючи інтегральні рівняння (2.3) і приймаючи $k_{II} = k_3 = 0$.

$$\begin{aligned}
x &= \nu \int \cos(\alpha + \varphi) dt = \nu \int \cos[\alpha_{оп} + k_{II}t + \alpha_{о3} + k_3t + \\
&+ \nu \left(\frac{\alpha_{оп}t + 0,5k_{II}t^2}{\ell_2} - \frac{\alpha_{о3}t + 0,5k_3t^2}{\ell_1} \right)] dt = \\
&= \nu \int \cos \left[\alpha_{оп} + \alpha_{о3} + \nu \left(\frac{\alpha_{оп}}{\ell_2} - \frac{\alpha_{о3}}{\ell_1} \right) t \right] dt = \nu \int \cos \left[\alpha_o + \nu \left(\frac{\alpha_{оп}}{\ell_2} - \frac{\alpha_{о3}}{\ell_1} \right) \nu t \right] dt = \\
&= \frac{1}{\frac{\alpha_{оп}}{\ell_2} - \frac{\alpha_{о3}}{\ell_1}} \sin \left[\alpha_o + \nu \left(\frac{\alpha_{оп}}{\ell_2} - \frac{\alpha_{о3}}{\ell_1} \right) \nu t \right] + C = \\
&= \frac{\ell_1 \ell_2}{\ell_1 \alpha_{оп} - \ell_2 \alpha_{о3}} \sin \left(\alpha_o + \frac{\ell_1 \alpha_{оп} - \ell_2 \alpha_{о3}}{\ell_1 \ell_2} \nu t \right) + C.
\end{aligned}$$

З умови ($x=0$, $t=0$) знаходимо $C = -\frac{\ell_1 \ell_2}{\ell_1 \alpha_{оп} - \ell_2 \alpha_{о3}} \sin \alpha_o$ і тоді

$$\begin{cases} x = \frac{\ell_1 \ell_2}{\ell_1 \alpha_{оп} - \ell_2 \alpha_{о3}} \left[\sin \left(\alpha_o + \frac{\ell_1 \alpha_{оп} - \ell_2 \alpha_{о3}}{\ell_1 \ell_2} \nu t \right) - \sin \alpha_o \right]; \\ y = -\frac{\ell_1 \ell_2}{\ell_1 \alpha_{оп} - \ell_2 \alpha_{о3}} \left[\cos \alpha_o - \cos \left(\alpha_o + \frac{\ell_1 \alpha_{оп} - \ell_2 \alpha_{о3}}{\ell_1 \ell_2} \nu t \right) \right], \end{cases} \quad (2.18)$$

де $\alpha_o = \alpha_{оп} + \alpha_{о3}$.

Якщо ж прийняти $\alpha_o = \alpha_{оп}$ і $\alpha_{о3} = 0$, то:

$$\begin{aligned}
x &= \frac{\ell_2}{\alpha_{оп}} \left[\sin \left(\alpha_{оп} + \frac{\alpha_{оп}}{\ell_2} \nu t \right) - \sin \alpha_{оп} \right] = \frac{\ell_2}{\alpha_o} \left\{ \sin \left[\alpha_o \left(1 + \frac{\nu t}{\ell_2} \right) \right] - \sin \alpha_o \right\}; \\
y &= \frac{\ell_2}{\alpha_{оп}} \left[\cos \alpha_{оп} - \cos \left(\alpha_{оп} + \frac{\alpha_{оп}}{\ell_2} \nu t \right) \right] = \frac{\ell_2}{\alpha_o} \left\{ \cos \alpha_o - \cos \left[\alpha_o \left(1 + \frac{\nu t}{\ell_2} \right) \right] \right\}.
\end{aligned}$$

Це коло радіусом $R_c = \frac{CD}{\sin \alpha_o} = \frac{\alpha_1 \ell_2 + \alpha_2 \ell_1}{(\alpha_1 - \alpha_2) \sin \alpha_o}$ з координатами центра

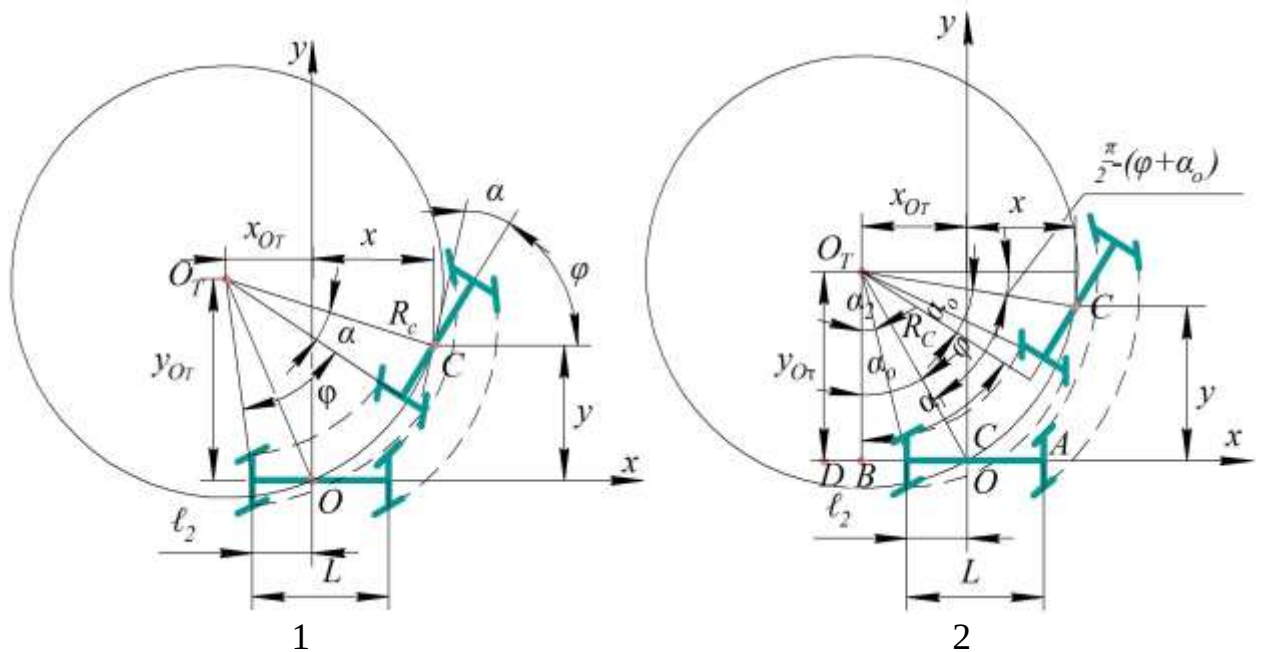
кола;

$$x_{от} = -\frac{\alpha_1 \ell_2 + \alpha_2 \ell_1}{\alpha_1 - \alpha_2},$$

$$y_{OT} = \frac{\alpha_1 \ell_2 + \alpha_2 \ell_1}{(\alpha_1 - \alpha_2) \operatorname{tg} \alpha_o}.$$

Ці формули можна отримати й безпосередньо з рисунку 2.2:

$$\begin{aligned} x &= R_c \cos \left[\frac{\pi}{2} - (\alpha_o + \varphi) \right] - x_{OT} = \frac{\alpha_1 \ell_2 + \alpha_2 \ell_1}{(\alpha_1 - \alpha_2) \sin \alpha_o} [\sin(\alpha_o + \varphi) - \sin \alpha_o] = \\ &= \frac{\ell_1 \ell_2}{\ell_1 \alpha_{оп} - \ell_2 \alpha_{о3}} \left[\sin \left(\alpha_o + \frac{\ell_1 \alpha_{оп} - \ell_2 \alpha_{о3}}{\ell_1 \ell_2} \nu t \right) - \sin \alpha_{оп} \right]; \\ y &= R_c \cos \alpha_o - R_c \sin \left[\frac{\pi}{2} - (\alpha_o + \varphi) \right] = \frac{\alpha_1 \ell_2 + \alpha_2 \ell_1}{(\alpha_1 - \alpha_2) \sin \alpha_o} [\cos \alpha_o - \cos(\alpha_o + \varphi)] = \\ &= \frac{\ell_1 \ell_2}{\ell_1 \alpha_{оп} - \ell_2 \alpha_{о3}} \left[\cos \alpha_o - \cos \left(\alpha_o + \frac{\ell_1 \alpha_{оп} - \ell_2 \alpha_{о3}}{\ell_1 \ell_2} \nu t \right) \right]. \end{aligned}$$



1 – при $k = 0$; 2 – при $\varphi = 0$.

Рисунок 2.2 – До обґрунтування рівнянь колового руху енергетичного засобу з усіма керованими колесами

Якщо в рівняннях (2.18) підставити $\alpha_{о3} = 0$ і прийняти $\alpha_o = \alpha_{оп}$, отримаємо рівняння (2.17) для чотирьохколісного енергетичного засобу з

передніми керованими колесами, які описують коло з радіусом $R_c = \ell_2 / \sin \alpha_0$ з координатами центра кола ($x = -\ell_2$; $y = \ell_2 / \operatorname{tg} \alpha_0$).

Якщо ж у рівняннях (2.18) прийняти $\alpha_{оп} = 0$ і $\alpha_o = \alpha_{оз}$, то отримаємо рівняння колового руху за рахунок повороту тільки задніх коліс:

$$x = \frac{\ell_1}{\alpha_o} \left\{ \sin \alpha_o - \sin \left[\alpha_o \left(1 - \frac{vt}{\ell_1} \right) \right] \right\};$$

$$y = \frac{\ell_1}{\alpha_o} \left\{ \cos \left[\alpha_o \left(1 - \frac{vt}{\ell_1} \right) \right] - \cos \alpha_o \right\}.$$

Коловий рух колісного трактора з усіма керованими колесами може здійснюватися при незалежному фіксованому положенні передніх, задніх, або всіх коліс.

Загальний початковий курсовий кут у цих рівняннях, як було прийнято вище, відповідно буде: $\alpha_0 = \alpha_{по}$; $\alpha_0 = \alpha_{зо}$; $\alpha_0 = \alpha_{по} + \alpha_{зо}$. Знаки складових початкового кута α_0 повинні бути узгодженими з напрямком повороту керованих коліс.

Можливий ще один вид колового руху, і це крабовидний поворот, коли колеса обох осей синхронно повертаються на зростаючі у часі кути. У цьому випадку $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_{1o} + k_1 t = \alpha_{2o} + k_2 t$, де $k_1 = k_2 = k_{12}$. Маємо також фіксоване положення остова машини ($\varphi = 0$). Траєкторія будь-якої точки корпусу має кривизну, оскільки курсовий кут змінюється у часі:

$$\alpha = \frac{\frac{\alpha_1}{\ell_2} + \frac{\alpha_2}{\ell_1}}{L} = \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_{12}.$$

Виходячи з цих початкових параметрів, згідно інтегральних рівнянь (2.3) отримаємо:

$$\begin{cases} x = \frac{\nu}{k} [\sin(\alpha_0 + kt) - \sin \alpha_0]; \\ y = \frac{\nu}{k} [\cos \alpha_0 - \cos(\alpha_0 + kt)]. \end{cases} \quad (2.19)$$

Це також коло радіусом $R = \nu/k$ і з координатами центра кола:

$$\begin{aligned} x &= -\left(\frac{\nu}{k}\right) \sin \alpha_0, \\ y &= \left(\frac{\nu}{k}\right) \cos \alpha_0. \end{aligned}$$

$$\text{Тут } \frac{\nu}{k} = \frac{\nu}{k_{12}} = \frac{\nu t}{\alpha} = \frac{\ell_2}{\alpha_0},$$

де $k_{12} = \frac{\alpha}{t} = \frac{\nu}{R} = \frac{\nu \alpha_0}{\ell_2}$, а з рисунку 2.2 маємо:

$$\begin{aligned} x &= R \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) - \ell_2 = \frac{\ell_2}{\sin \alpha_0} (\sin \alpha - \sin \alpha_0) = \frac{\ell_2}{\alpha_0} [\sin(\alpha_0 + k_{12}t) - \sin \alpha_0] = \\ &= \frac{\ell_2}{\alpha_0} \left\{ \sin \left[\alpha_0 \left(1 + \frac{\nu}{\ell_2} t \right) \right] - \sin \alpha_0 \right\}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y &= R \cos \alpha_0 - R \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) = \frac{\ell_2}{\sin \alpha_0} (\cos \alpha_0 - \cos \alpha) = \\ &= \frac{\ell_2}{\alpha_0} \left\{ \cos \alpha_0 - \cos \left[\alpha_0 \left(1 + \frac{\nu}{\ell_2} t \right) \right] \right\}. \end{aligned}$$

Таким чином, в обох розглянутих випадках колові траєкторії описуються однаковими рівняннями. Але у разі крабовидного руху по коловій траєкторії дуга реального кола обмежена можливістю повороту керованих коліс у горизонтальній площині і відповідним значенням курсового кута.

2.5 Приклади моделювання маневрів за допомогою отриманих універсальних рівнянь криволінійного руху

Далі розглянемо моделювання маневрів за допомогою отриманих рівнянь траєкторії руху чотирьохколісного енергетичного засобу з усіма керованими колесами на прикладі модернізованого трактора тягового класу 2 моделі ХТЗ 120/160 з колісною схемою 4х4. Розрахунок вхідних параметрів для окремих ділянок траєкторії маневрів виконуємо за формулами: (2.1), (2.4...2.6) і (2.9).

2.5.1 Лівий поворот

Моделювання лівого повороту з передніми колесами керування на вході.

Визначимо траєкторію входу в лівий поворот на прикладі трактора тягового класу 2 моделі ХТЗ 120/160 з колісною схемою 4х4. Загальні для всіх видів повороту дані: $\ell_1 = 1,72 \text{ м}$; $\ell_2 = 1,14 \text{ м}$; $L = 2,86 \text{ м}$; $v = 1,2 \text{ м/с}$.

Мінімальний радіус повороту $R_{min} = 6,55 \text{ м}$.

Максимальні значення кута повороту керованих коліс α_{1K} (в кінці входу в поворот) і курсового кута α :

$$\alpha_{1K} = \frac{L}{R_{min}} = \frac{2,86}{6,55} = 0,437 \text{ рад} = 25,05^\circ;$$

$$\alpha = \alpha_K = \alpha_{ПК} = \frac{\alpha_{1K} \ell_2}{L} = \frac{0,437 \cdot 1,14}{2,86} = 0,1738 \text{ рад} = 9,96^\circ.$$

Приймаємо $\alpha_0 = \alpha_{П0} = 0,035 \text{ рад} = 2^\circ$.

Тепер можна прийняти час входу в поворот t або кінцевий кут повороту корпусу φ_K – в залежності від умов експерименту.

Нехай $t = 4 \text{ с}$, тоді коефіцієнт інтенсивності зміни курсового кута:

$$k = k_{\pi} = \frac{\alpha_{\kappa} - \alpha_{\pi}}{t}; \quad k = k_{\pi} = \frac{0,1738 - 0,035}{4} = 0,0347 \text{ c}^{-1}.$$

Згідно (2.9) кут повороту:

$$\varphi_{\kappa} = 1,2 \frac{0,035 \cdot 4 + 0,5 \cdot 0,0347 \cdot 4^2}{1,14} = 0,4343 \text{ рад} = 24,86^{\circ}$$

і коефіцієнти:

$$m = \frac{\alpha_0}{\ell_2} = \frac{0,035}{1,14} = 0,0307 \text{ м}^{-1}; \quad n = \frac{k_{\pi}}{\ell_2} = \frac{0,034}{1,14} = 0,0298 \text{ м}^{-1} \text{ c}^{-1}.$$

Схема моделювання лівого повороту з передніми колесами керування на вході з розрахунковими параметрами зображена на рисунку 2.3.

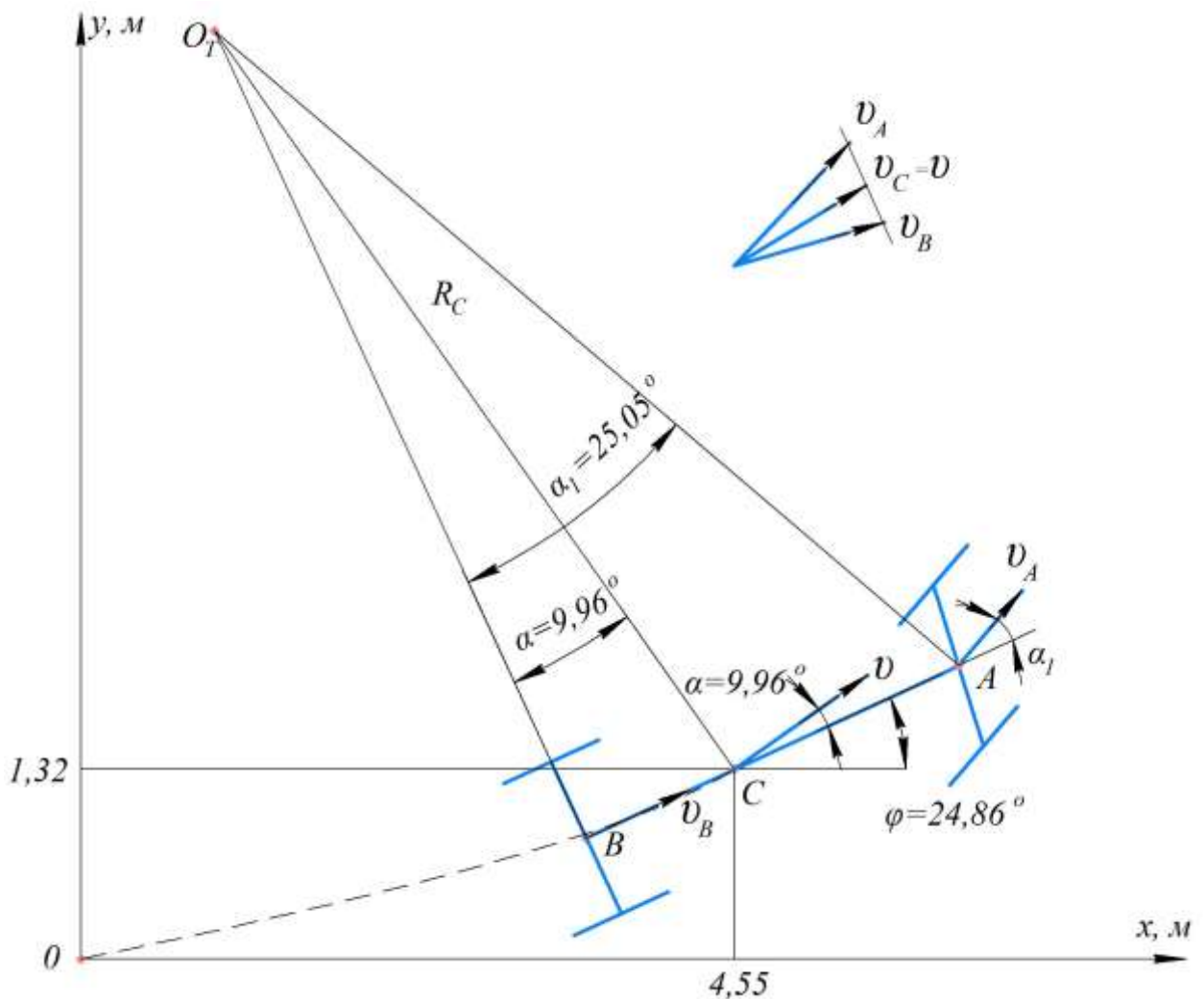


Рисунок 2.3 – Вхід в лівий поворот, керовані колеса передні

Далі розрахуємо координати траєкторії входу в лівий поворот в системі координат x_1y_1 згідно рівнянь (2.13).

Результати розрахунків у таблиці 2.1, траєкторія – на рисунку 2.6.

Таблиця 2.1 – Параметри лівого повороту з передніми колесами керування на вході

№ з/п	t , с	x_i , м	y_i , м	$\alpha_{п}$, $\frac{рад}{град}$	α , $\frac{рад}{град}$	φ , $\frac{рад}{град}$	S , м	R , м	x , м	y , м
1	0	0	0	0,03489	0,03489	0	0	32,68	0	0
				2,00	2,00	0				
2	0,44	0,53	0,03	0,05032	0,05032	0,01993	0,53	22,65	0,53	0,03
				2,88	2,88	1,14				
3	0,89	1,06	0,08	0,06575	0,06575	0,04708	1,07	17,34	1,06	0,08
				3,77	3,77	2,70				
4	1,33	1,59	0,15	0,08119	0,08119	0,08146	1,60	14,04	1,59	0,15
				4,65	4,65	4,67				
5	1,78	2,12	0,25	0,09662	0,09662	0,12305	2,13	11,80	2,12	0,25
				5,54	5,54	7,05				
6	2,22	2,63	0,38	0,11205	0,11205	0,17186	2,67	10,17	2,63	0,38
				6,42	6,42	9,85				
7	2,67	3,14	0,56	0,12748	0,12748	0,22789	3,20	8,94	3,14	0,56
				7,31	7,31	13,06				
8	3,11	3,63	0,77	0,14292	0,14292	0,29114	3,73	7,98	3,63	0,77
				8,19	8,19	16,69				
9	3,56	4,10	1,02	0,15835	0,15835	0,36161	4,27	7,20	4,10	1,02
				9,08	9,08	20,73				
10	4,0	4,55	1,32	0,17378	0,17378	0,4343	4,80	6,56	4,55	1,32
				9,96	9,96	24,86				

Моделювання лівого повороту з передніми колесами керування на виході.

Приймаємо: $\alpha_3 = 0$; $\alpha_0 = \alpha_{п0} = 0,1738 \text{ рад} = 9,96^\circ$;

$$\alpha = \alpha_K = \alpha_{пк} = 0;$$

$$\alpha_{10} = 0,437 \text{ рад} = 25,05^\circ;$$

$$\alpha_{1K} = 0; k_3 = 0; t = 4 \text{ с.}$$

Знаходимо коефіцієнти:

$$k = k_{II} = \frac{0 - 0,174}{4} = -0,0435 \text{ с}^{-1};$$

$$m = -\frac{0,174}{1,14} = -0,153 \text{ м}^{-1};$$

$$n = -\frac{0,0435}{1,14} = -0,038 \text{ м}^{-1} \text{ с}^{-1}.$$

Кут повороту остова трактора:

$$\varphi_K = 1,2(0,153 \cdot 4 + 0,5 \cdot 0,038 \cdot 4^2) = 0,3658 \text{ рад} = 20,97^\circ.$$

Після визначення координат траєкторії виходу з лівого повороту в системі координат $x_2 y_2$ за допомогою рівнянь (2.20) з метою спряження її з траєкторією входу в лівий поворот необхідно перерахувати отримані координати в загальну систему координат $x y$ за формулами:

$$\begin{aligned} x &= x_{0i} + x_i \cos \theta_i - y_i \sin \theta_i; \\ y &= y_{0i} + y_i \cos \theta_i + x_i \sin \theta_i. \end{aligned} \quad (2.20)$$

У даному випадку $i = 2$, $\theta_i = \theta_2 = 0,434 \text{ рад}$ – кінцевому куту повороту корпусу трактора на ділянці входу в лівий поворот; x_{0i} і y_{0i} – кінцеві координати траєкторії входу в поворот.

Результати розрахунків наведені у таблиці 2.2, траєкторія – на рисунку 2.6.

Таблиця 2.2 – Параметри лівого повороту на виході з передніми колесами керування

№ з/п	t , с	x_i , м	y_i , м	α_{II} , $\frac{рад}{град}$	α , $\frac{рад}{град}$	φ , $\frac{рад}{град}$	S , м	R , м	x , м	y , м
1	0	0	0	0,17378	0,17378	0	0	6,56	4,55	1,32
				9,96	9,96	0				
2	0,44	0,52	0,11	0,15447	0,15447	0,07678	0,53	7,38	4,98	1,64
				8,86	8,86	4,40				
3	0,89	1,04	0,25	0,13516	0,13516	0,14453	1,07	8,43	5,38	1,98
				7,75	7,75	8,29				
4	1,33	1,54	0,41	0,11585	0,11585	0,20325	1,60	9,84	5,77	2,34
				6,64	6,64	11,65				
5	1,78	2,03	0,58	0,09654	0,09654	0,25294	2,13	11,81	6,14	2,71
				5,53	5,53	14,50				
6	2,22	2,51	0,78	0,07724	0,07724	0,29359	2,67	14,76	6,50	3,09
				4,43	4,43	16,83				
7	2,67	2,98	0,98	0,05793	0,05793	0,3252	3,20	19,68	6,84	3,48
				3,32	3,32	18,64				
8	3,11	3,44	1,18	0,03862	0,03862	0,34779	3,73	29,52	7,16	3,86
				2,21	2,21	19,94				
9	3,56	3,89	1,39	0,01931	0,01931	0,36134	4,27	59,04	7,48	4,23
				1,11	1,11	20,71				
10	4,0	4,32	1,59	0	0	0,36585	4,80	0	7,79	4,60
				0	0	20,97				

Моделювання лівого повороту з задніми колесами керування на вході.

Максимальні значення кута повороту керованих коліс (в кінці входу в поворот) і курсового кута на початку входу в поворот α_0 :

$$\alpha_2 = \alpha_{2K} = -0,437 \text{ рад} = -25,05^\circ; \quad \alpha_0 = \alpha_{30} = -0,035 \text{ рад} = -2^\circ; \quad t = 4 \text{ с.}$$

Решту вихідних параметрів розраховуємо:

$$\alpha = \alpha_K = \alpha_{3K} = \frac{-0,437 \cdot 1,72}{2,86} = -0,2628 \text{ рад} = -15,03^\circ; \quad k_{II} = 0;$$

$$k = k_3 = \frac{-0,2628 - (-0,035)}{4} = -0,057 \text{ с}^{-1}; \quad R_{\min} = \frac{2,86}{-0,437} = 6,54 \text{ м.}$$

$$\text{Коефіцієнти: } m = \frac{-0,035}{1,72} = 0,0203 \text{ м}^{-1}; \quad n = \frac{-0,057}{1,72} = 0,0331 \text{ м}^{-1} \text{ с}^{-1}.$$

Кут повороту остова трактора:

$$\varphi_K = v(mt + 0,5nt^2);$$

$$\varphi_K = 1,2(0,0203 \cdot 4 + 0,5 \cdot 0,331 \cdot 4^2) = 0,4145 \text{ рад} = 23,76^\circ.$$

Схема моделювання лівого повороту з задніми колесами керування на вході з розрахунковими параметрами зображена на рисунку 2.4.

Результати розрахунків наведені у таблиці 2.3, траєкторія – на рисунку 2.6.

Таблиця 2.3 – Параметри лівого повороту задніми колесами керування на вході

№ з/п	t , с	x_i , м	y_i , м	α_3 , $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	α , $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	φ , $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	S , м	R , м	x , м	y , м
1	0	0	0	-0,0349	-0,0349	0	0	49,30	0	0
				-2,00	-2,00	0				
2	0,44	0,53	-0,02	-0,0602	-0,0602	0,01473	0,53	28,60	0,53	-0,02
				-3,45	-3,45	0,84				
3	0,89	1,06	-0,05	-0,0854	-0,0854	0,0373	1,07	20,14	1,07	-0,05
				-4,90	-4,90	2,14				
4	1,33	1,60	-0,07	-0,1107	-0,1107	0,0677	1,60	15,54	1,60	-0,07
				-6,34	-6,34	3,88				
5	1,78	2,13	-0,09	-0,1359	-0,1359	0,10592	2,13	12,66	2,13	-0,09
				-7,79	-7,79	6,07				
6	2,22	2,66	-0,10	-0,1612	-0,1612	0,15198	2,67	10,67	2,66	-0,10
				-9,24	-9,24	8,71				
7	2,67	3,19	-0,09	-0,1864	-0,1864	0,20587	3,20	9,23	3,20	-0,10
				-10,69	-10,69	11,80				
8	3,11	3,73	-0,08	-0,2117	-0,2117	0,2676	3,73	8,13	3,73	-0,08
				-12,13	-12,13	15,34				
9	3,56	4,26	-0,04	-0,2369	-0,2369	0,33715	4,27	7,26	4,26	-0,04
				-13,58	-13,58	19,33				
10	4,00	4,79	0,03	-0,2622	-0,2622	0,41454	4,80	6,56	4,79	0,03
				-15,03	-15,03	23,76				

Кут повороту остова трактора

$$\varphi_K = 1,2(0,152 \cdot 4 - 0,5 \cdot 0,038 \cdot 4^2) = 0,3658 \text{ рад} = 20,97^\circ.$$

Результати розрахунків наведені у таблиці 2.4, траєкторія – на рисунку 2.6.

Таблиця 2.4 – Параметри лівого повороту на виході з задніми колесами керування

№ з/П	t , с	x_i , м	y_i , м	α_z , $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	α , $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	φ , $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	S , м	R , м	x , м	y , м
1	0	0	0	-0,2622	-0,2622	0	0	6,56	4,79	0,03
				-15,03	-15,03	0				
2	0,44	0,52	-0,11	-0,2331	-0,2330	0,0768	0,53	7,38	5,31	0,14
				-13,36	-13,36	4,40				
3	0,89	1,05	-0,17	-0,2039	-0,2039	0,1445	1,07	8,43	5,82	0,30
				-11,69	-11,69	8,29				
4	1,33	1,58	-0,18	-0,1748	-0,1748	0,2033	1,60	9,84	6,31	0,51
				-10,02	-10,02	11,65				
5	1,78	2,12	-0,14	-0,1457	-0,1457	0,2529	2,13	11,81	6,79	0,75
				-8,35	-8,35	14,50				
6	2,22	2,64	-0,06	-0,1165	-0,1165	0,2936	2,67	14,76	7,24	1,04
				-6,68	-6,68	16,83				
7	2,67	3,17	0,05	-0,0874	-0,0874	0,3252	3,20	19,68	7,67	1,35
				-5,01	-5,01	18,64				
8	3,11	3,68	0,19	-0,0583	-0,0583	0,3478	3,73	29,52	8,08	1,68
				-3,34	-3,34	19,94				
9	3,56	4,19	0,35	-0,0291	-0,0291	0,3613	4,27	59,04	8,48	2,04
				-1,67	-1,67	20,71				
10	4,0	4,69	0,54	0	0	0,3658	4,80	0	8,87	2,41
				0	0	20,97				

Моделювання лівого повороту зі всіма колесами керування на вході.

Приймаємо: $\alpha_{\pi 0} = 2^\circ = 0,035 \text{ рад}$; $\alpha_{30} = -2^\circ = -0,035 \text{ рад}$;

$$\alpha_0 = \alpha_{\pi 0} + \alpha_{30} = 0;$$

$$\alpha_{IK} = 0,1738 \text{ рад} = 9,96^0;$$

$$\alpha_{3K} = -0,262 \text{ рад} = -15,03^0; t = 4\text{с};$$

$$\alpha_{1K} = 0,437 \text{ рад} = 25,05^0;$$

$$\alpha_{2K} = -0,437 \text{ рад} = -25,05^0.$$

Розраховуємо: $k_{II} = 0,0347 \text{ с}^{-1}$; $k_3 = -0,057 \text{ с}^{-1}$;

$$k = k_{II} + k_3 = 0,034 + (-0,057) = -0,023 \text{ с}^{-1};$$

$$R_{min} = \frac{2,86}{0,437 - (-0,437)} = 3,28 \text{ м};$$

$$n = \frac{0,034}{1,14} - \frac{-0,057}{1,72} = 0,0331 + 0,03 = 0,0631 \text{ м}^{-1} \text{ с}^{-1}.$$

$$m = \frac{0,035}{1,14} - \frac{-0,035}{1,72} = 0,0307 + 0,0203 = 0,051 \text{ м}^{-1}.$$

Кут повороту остова трактора:

$$\varphi_K = 1,2(0,051 \cdot 4 + 0,5 \cdot 0,0631 \cdot 4^2) = 0,8538 \text{ рад} = 48,75^0.$$

Кінцеве значення курсового кута:

$$\alpha = \alpha_K = \alpha_0 + kt;$$

$$\alpha = \alpha_K = 0 + (-0,023) \cdot 4 = -0,092 \text{ рад} = -5,27^0.$$

Схема моделювання лівого повороту зі всіма колесами керування на вході з розрахунковими параметрами зображена на рисунку 2.5.

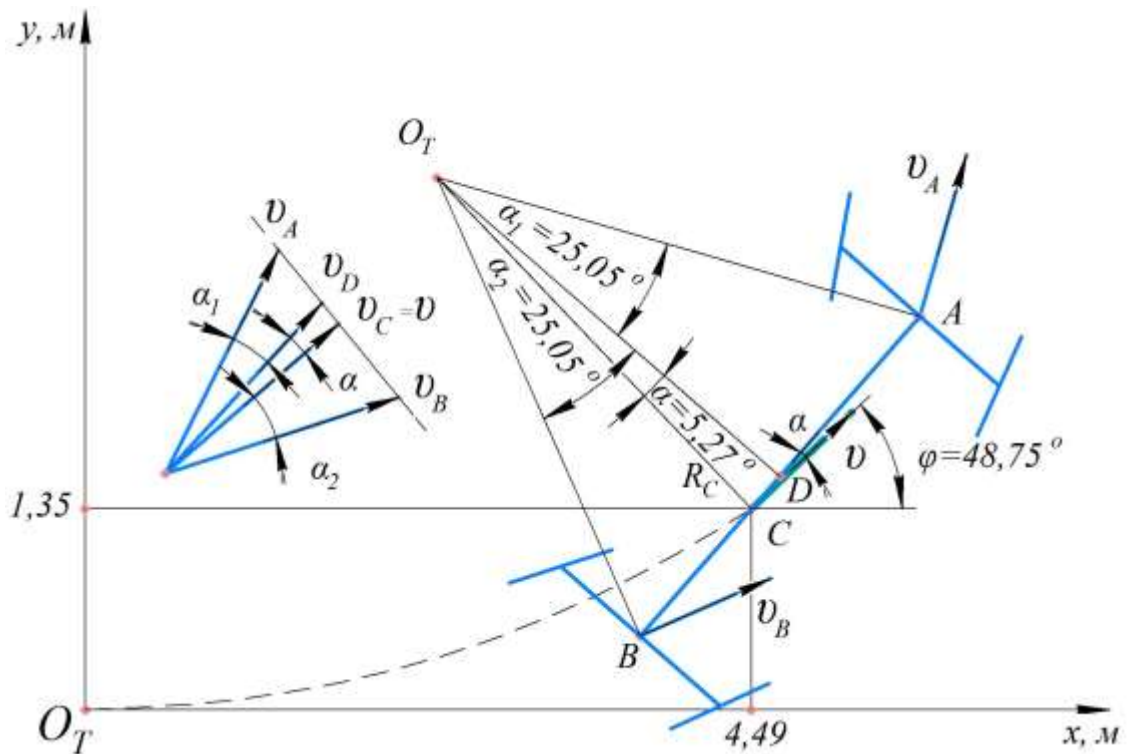


Рисунок 2.5 – Вхід в лівий поворот, керовані колеса всі

Результати розрахунків наведені у таблиці 2.5, траєкторія – на рисунку 2.6.

Таблиця 2.5 – Параметри лівого повороту на вході зі всіма колесами керування

№ з/П	t , с	x_i , м	y_i , м	α_{Π} , $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	α_3 , $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	α , $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	φ , $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	S , м	R , м	x , м	y , м
1	0	0	0	0,0349	-0,034	0	0	0	19,65	0	0,00
				2	-2	0	0				
2	0,44	0,53	0,01	0,0503	-0,060	-0,009	0,0347	0,53	12,64	0,53	0,01
				2,88	-3,45	-0,56	1,99				
3	0,89	1,07	0,03	0,0657	-0,085	-0,019	0,0844	1,07	9,32	1,07	0,03
				3,77	-4,90	-1,13	4,84				
4	1,33	1,60	0,08	0,0812	-0,110	-0,029	0,1492	1,60	7,38	1,60	0,08
				4,65	-6,34	-1,96	8,55				
5	1,78	2,12	0,16	0,0966	-0,135	-0,039	0,2290	2,13	6,11	2,12	0,16
				5,54	-7,79	-2,25	13,13				
6	2,22	2,64	0,28	0,1121	-0,161	-0,049	0,3238	2,67	5,21	2,64	0,28
				6,42	-9,24	-2,82	18,56				

7	2,67	3,15	0,46	0,1275	-0,186	-0,058	0,4338	3,20	4,54	3,15	0,46
				7,31	-10,69	-3,38	24,87				
8	3,11	3,63	0,69	0,1429	-0,211	-0,068	0,5587	3,73	4,03	3,63	0,69
				8,19	-12,13	-3,94	32,03				
9	3,56	4,08	0,98	0,1584	-0,236	-0,078	0,6988	4,27	3,61	4,08	0,98
				9,08	-13,58	-4,51	40,06				
10	4,0	4,49	1,35	0,1738	-0,262	-0,092	0,8538	4,80	3,28	4,49	1,35
				9,96	-15,03	-5,27	48,75				

Моделювання лівого повороту зі всіма колесами керування на виході.

Приймаємо: $\alpha_0 = \alpha_{\pi 0} = 0,1738 \text{ рад} = 9,96^\circ$;

$$\alpha_{\pi K} = \alpha_{3K} = 0; t = 4 \text{ с};$$

$$\alpha_{1K} = \alpha_{2K} = 0;$$

$$\alpha_{30} = -15,035^\circ = -0,262 \text{ рад};$$

$$\alpha_{10} = 0,437 \text{ рад} = 25,05^\circ;$$

$$\alpha_{20} = -0,437 \text{ рад} = -25,05^\circ.$$

$$\alpha_0 = 0,1738 - 0,2622 = -0,0884 \text{ рад} = -5,06^\circ;$$

Визначаємо: $R_{\min} = \frac{2,86}{0,437 - (-0,437)} = 3,28 \text{ м};$

$$k_{\pi} = \frac{0 - 0,174}{4} = -0,0435 \text{ с}^{-1};$$

$$k_3 = \frac{0 - (-0,262)}{4} = 0,0655 \text{ с}^{-1};$$

$$k = k_{\pi} + k_3 = -0,0435 + 0,0655 = 0,022;$$

$$m = \frac{0,174}{1,14} - \frac{-0,262}{1,72} = 0,305 \text{ м}^{-1};$$

$$n = \frac{-0,0435}{1,14} - \frac{0,0655}{1,72} = -0,0762 \text{ м}^{-1}\text{с}^{-1}.$$

Кут повороту остова трактора:

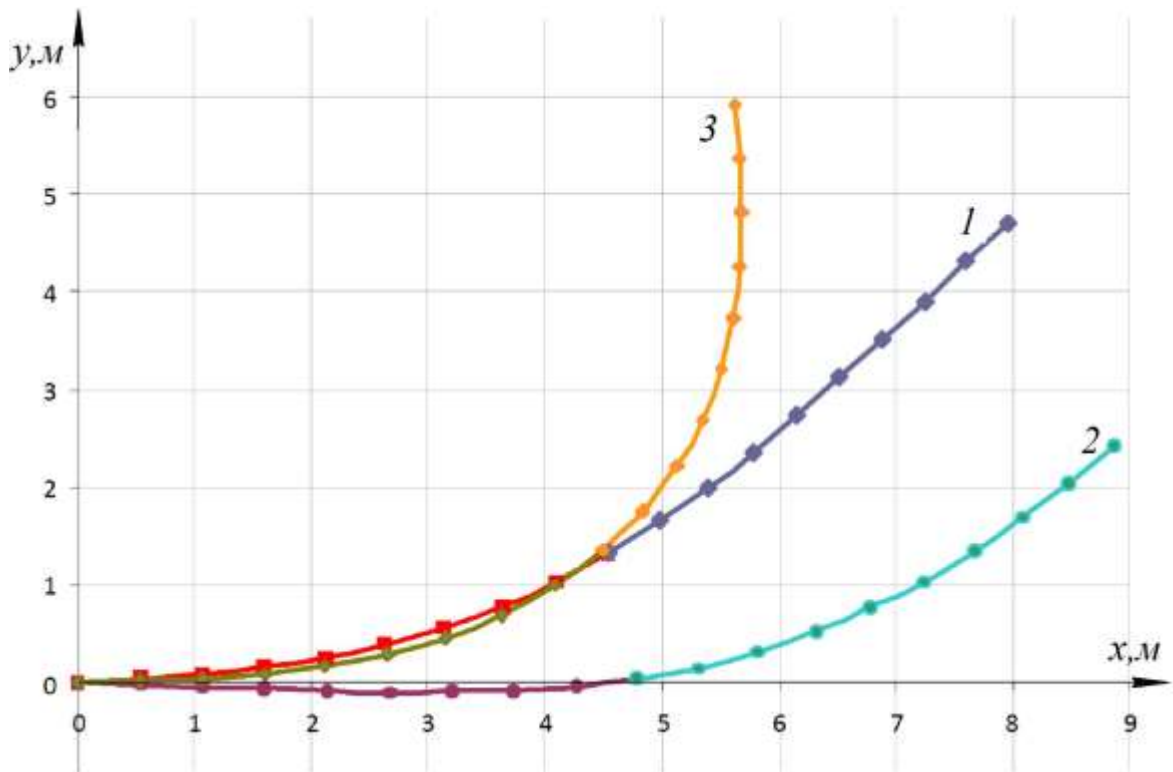
$$\varphi_K = 1,2(0,305 \cdot 4 - 0,5 \cdot 0,0762 \cdot 4^2) = 0,7317 \text{ рад} = 41,95^\circ.$$

Результати розрахунків наведені у таблиці 2.6, траєкторія – на рисунку

2.6.

Таблиця 2.6 – Параметри лівого повороту на виході зі всіма колесами керування

№ з/п	t , с	x_i , м	y_i , м	α_{II} , $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	α_3 , $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	α , $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	φ , $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	S , м	R , м	x , м	y , м
1	0	0	0	0,1738	-0,2622	-0,0884	0	0	3,28	4,49	1,35
				9,96	-15,03	-5,06	0				
2	0,44	0,53	0	0,1545	-0,2331	-0,0786	0,1536	0,53	3,69	4,84	1,75
				8,86	-13,36	-4,51	8,80				
3	0,89	1,06	0,08	0,1352	-0,2039	-0,0688	0,2891	1,07	4,22	5,13	2,20
				7,75	-11,69	-3,94	16,57				
4	1,33	1,57	0,23	0,1159	-0,1748	-0,0589	0,4065	1,60	4,92	5,35	2,68
				6,64	-10,02	-3,38	23,30				
5	1,78	2,06	0,44	0,0965	-0,1457	-0,0491	0,5059	2,13	5,90	5,51	3,19
				5,53	-8,35	-2,82	29,00				
6	2,22	2,53	0,71	0,0772	-0,1165	-0,0393	0,5872	2,67	7,38	5,61	3,72
				4,43	-6,68	-2,25	33,66				
7	2,67	2,97	1,03	0,0579	-0,0874	-0,0295	0,6504	3,20	9,84	5,67	4,26
				3,32	-5,01	-1,69	37,28				
8	3,11	3,39	1,37	0,0386	-0,0583	-0,0196	0,6956	3,73	14,76	5,68	4,81
				2,21	-3,34	-1,13	39,87				
9	3,56	3,79	1,74	0,0193	-0,0291	-0,0098	0,7227	4,27	29,52	5,67	5,35
				1,11	-1,67	-0,56	41,43				
10	4,0	4,19	2,13	0	0	0	0,7317	4,80	0	5,63	5,90
				0	0	0	41,95				



Керовані колеса: 1– передні, 2 – задні, 3 – всі.

Рисунок 2.6 – Траєкторії входу в лівий поворот і виходу з повороту

2.5.2 Правий поворот

Моделювання правого повороту з передніми колесами керування на вході. Постановка задачі: забезпечити поворот корпусу трактора на кут $\varphi_K = -20^\circ = -0,349 \text{ рад}$ при $v = 1,2 \text{ м/с}$. У даному випадку кривизна траєкторії і, відповідно, радіус кривизни від’ємні.

Якщо тепер задати час входу в поворот, то цим визначиться коефіцієнт інтенсивності зміни курсового кута і сам кут φ_K . Але маємо зворотню задачу, тому, щоб скористатися формулою (2.9), треба коефіцієнтом інтенсивності зміни курсового кута задатися.

Приймаємо $\alpha_{\Pi 0} = 0$; $\alpha_{зк} = 0$; $k = k_{\Pi} = -0,035 \text{ с}^{-1}$, тоді $m = 0$;

$$n = \frac{-0,035}{1,14} = -0,0307 \text{ м}^{-1} \text{ с}^{-1}.$$

Час входу в поворот з формули (2.9): $t = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,349}{1,2 \cdot 0,0307}} = 4,35 \text{ с.}$

Тоді курсовий кут в кінці маневру $\alpha_K = \alpha_{ПК} = kt = -0,035 \cdot 4,35 = -0,152 \text{ рад} = -8,73^\circ$, кут повороту керованих коліс $\alpha_{1K} = -0,152 \cdot \frac{2,86}{1,14} = -0,381 \text{ рад} = -21,86^\circ$, $\alpha_{2K} = 0$ і мінімальний радіус кривизни траєкторії $R_{\min} = -\frac{2,86}{0,381} = 7,5 \text{ м.}$

Схема моделювання правого повороту з передніми колесами керування на вході з розрахунковими параметрами зображена на рисунку 2.7.

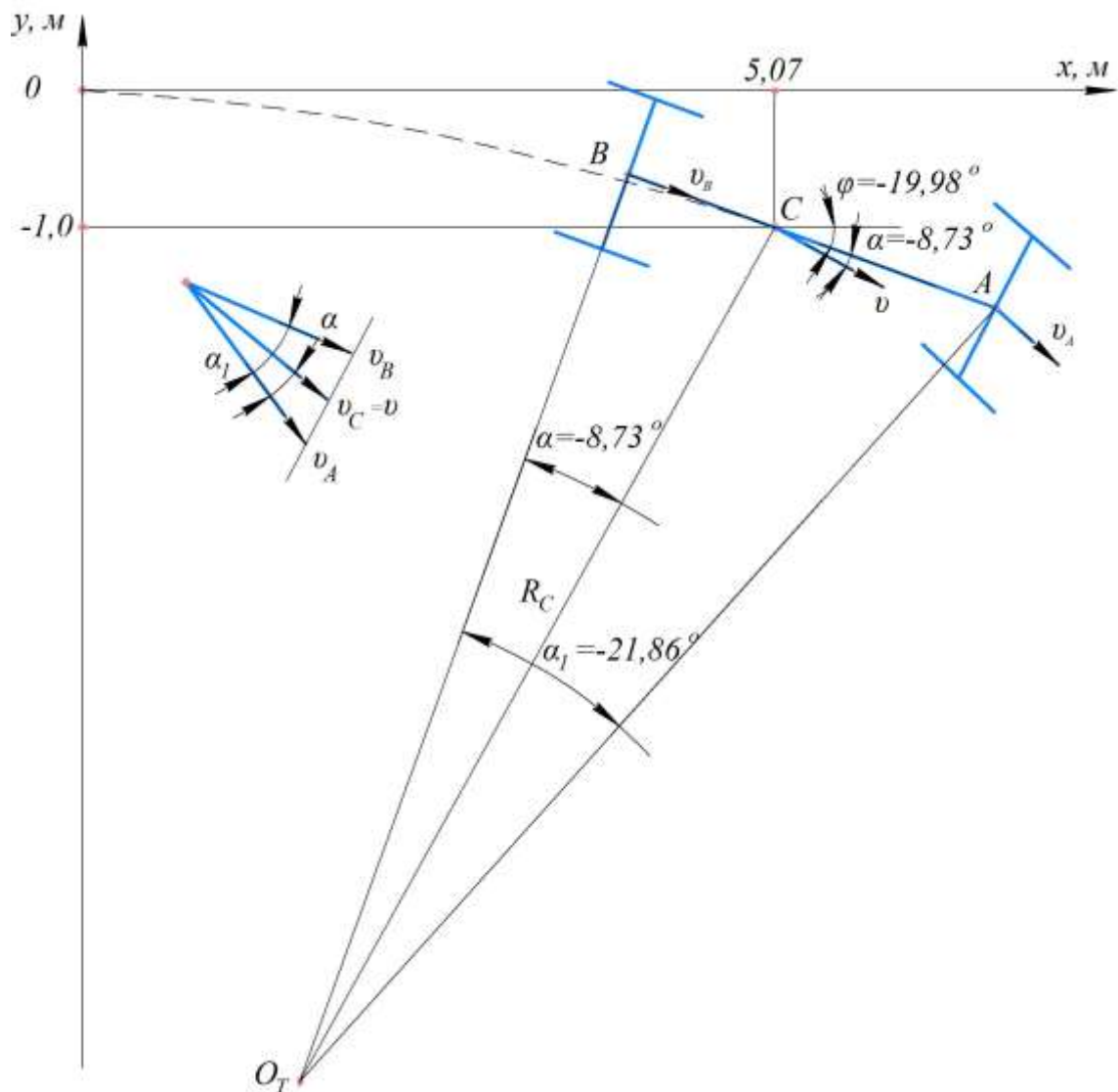


Рисунок 2.7 – Вхід в правий поворот, керовані колеса передні

Далі розраховуємо координати траєкторії (табл. 2.7, рис. 2.10).

Таблиця 2.7 – Параметри правого повороту на виході з передніми колесами керування

№ з/П	t , с	x_i , м	y_i , м	α_{Π} , $\frac{рад}{град}$	α , $\frac{рад}{град}$	φ , $\frac{рад}{град}$	S , м	R , м	x , м	y , м
1	0	0	0	0	0	0	0	∞	0	0
				0	0	0				
2	0,48	0,58	-0,01	-0,0169	-0,0169	-0,0043	0,58	-67,39	0,58	-0,01
				-0,97	-0,97	-0,25				
3	0,97	1,16	-0,03	-0,0338	-0,0338	-0,0172	1,16	-33,69	1,16	-0,03
				-1,94	-1,94	-0,99				
4	1,45	1,74	-0,07	-0,0508	-0,0508	-0,0387	1,74	-22,46	1,74	-0,07
				-2,91	-2,91	-2,22				
5	1,93	2,31	-0,13	-0,0677	-0,0677	-0,0689	2,32	-16,85	2,31	-0,13
				-3,88	-3,88	-3,95				
6	2,42	2,89	-0,23	-0,0846	-0,0846	-0,1076	2,90	-13,48	2,89	-0,23
				-4,85	-4,85	-6,17				
7	2,90	3,45	-0,36	-0,1015	-0,1015	-0,1549	3,48	-11,23	3,45	-0,36
				-5,82	-5,82	-8,88				
8	3,38	4,01	-0,53	-0,1184	-0,1184	-0,2109	4,06	-9,63	4,01	-0,53
				-6,79	-6,79	-12,09				
9	3,87	4,55	-0,74	-0,1353	-0,1353	-0,2754	4,64	-8,42	4,55	-0,74
				-7,76	-7,76	-15,79				
10	4,35	5,07	-1,0	-0,1523	-0,1523	-0,3486	5,22	-7,49	5,07	-1,00
				-8,73	-8,73	-19,98				

Моделювання правого повороту з передніми колесами керування на виході. Приймаємо: $\alpha_0 = \alpha_{\Pi 0} = -0,1523 \text{ рад} = -8,73^0$; $\alpha_3 = 0$; $R_{\min} = -7,5 \text{ м}$;

$\alpha_{1K} = 0$; $\alpha_{10} = -0,381 \text{ рад} = -21,86^0$; $\alpha_{2K} = 0$; $\alpha_K = \alpha_{\Pi K} = 0$; $k_3 = 0$; $t = 4 \text{ с}$; $v = 1,2 \text{ м/с}$.
Знаходимо:

$$k = k_{\Pi} = \frac{0 - (-0,152)}{4} = 0,038 \text{ с}^{-1};$$

$$m = -\frac{0,152}{1,14} = -0,133 \text{ м}^{-1}; \quad n = \frac{0,038}{1,14} = 0,033 \text{ м}^{-1} \text{ с}^{-1}.$$

Кут повороту остова трактора

$$\varphi_K = 1,2 \cdot (-0,133 \cdot 4 + 0,5 \cdot 0,033 \cdot 4^2) = -0,3205 \text{ рад} = -18,37^\circ.$$

Решта розрахунків наведені у таблиці 2.8, траєкторія на рисунку 2.10.

Таблиця 2.8 – Параметри правого повороту на виході з передніми колесами керування

№ з/П	t , с	x_i , м	y_i , м	α_{II} , $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	α , $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	φ , $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	S , м	R , м	x , м	y , м
1	0	0	0	-0,1523	-0,1523	0	0	-7,49	5,07	-1,00
				-8,73	-8,73	0				
2	0,44	0,52	-0,09	-0,1353	-0,1353	-0,0673	0,53	-8,42	5,53	-1,27
				-7,76	-7,76	-3,86				
3	0,89	1,04	-0,21	-0,1184	-0,1184	-0,1266	1,07	-9,63	5,97	-1,56
				-6,79	-6,79	-7,26				
4	1,33	1,55	-0,35	-0,1015	-0,1015	-0,1781	1,60	-11,23	6,41	-1,87
				-5,82	-5,82	-10,21				
5	1,78	2,06	-0,51	-0,0846	-0,0846	-0,2216	2,13	-13,48	6,82	-2,19
				-4,85	-4,85	-12,70				
6	2,22	2,55	-0,68	-0,0677	-0,0677	-0,2572	2,67	-16,85	7,23	-2,51
				-3,88	-3,88	-14,74				
7	2,67	3,03	-0,86	-0,0508	-0,0508	-0,2849	3,20	-22,46	7,63	-2,85
				-2,91	-2,91	-16,33				
8	3,11	3,51	-1,04	-0,0338	-0,0338	-0,3047	3,73	-33,69	8,01	-3,18
				-1,94	-1,94	-17,47				
9	3,56	3,98	-1,22	-0,0169	-0,0169	-0,3166	4,27	-67,39	8,39	-3,51
				-0,97	-0,97	-18,15				
10	4,0	4,44	-1,39	0	0	-0,3205	4,80	∞	8,76	-3,83
				0	0	-18,37				

Моделювання правого повороту з задніми колесами керування на виході. За умов попередньої задачі ($\varphi_K = -20^\circ = -0,349 \text{ рад}$) приймаємо:

$$\alpha_{1K} = 0; \nu = 1,2 \text{ м/с}; k = k_3 = -0,035 \text{ с}^{-1}; k_{II} = 0; \alpha_{IK} = 0.$$

Прийнявши $\alpha_0 = \alpha_{30} = 0; k = k_3 = 0,035 \text{ с}^{-1}$, знаходимо $m = 0$;

$$n = -\frac{0,035}{1,72} = -0,0203 \text{ м}^{-1} \text{ с}^{-1} \text{ і } t = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,349}{1,2 \cdot 0,0203}} = 5,35 \text{ с}.$$

$$\alpha_K = \alpha_{3K} = 0,035 \cdot 5,35 = 0,187 \text{ рад} = 10,73^\circ;$$

$$\alpha_{2K} = 0,187 \cdot \frac{2,86}{1,72} = 0,311 \text{ рад} = 17,82^\circ;$$

$$R_{\min} = -\frac{2,86}{0,311} = -9,2 \text{ м.}$$

Схема моделювання правого повороту з задніми колесами керування на вході з розрахунковими параметрами зображена на рисунку 2.8.

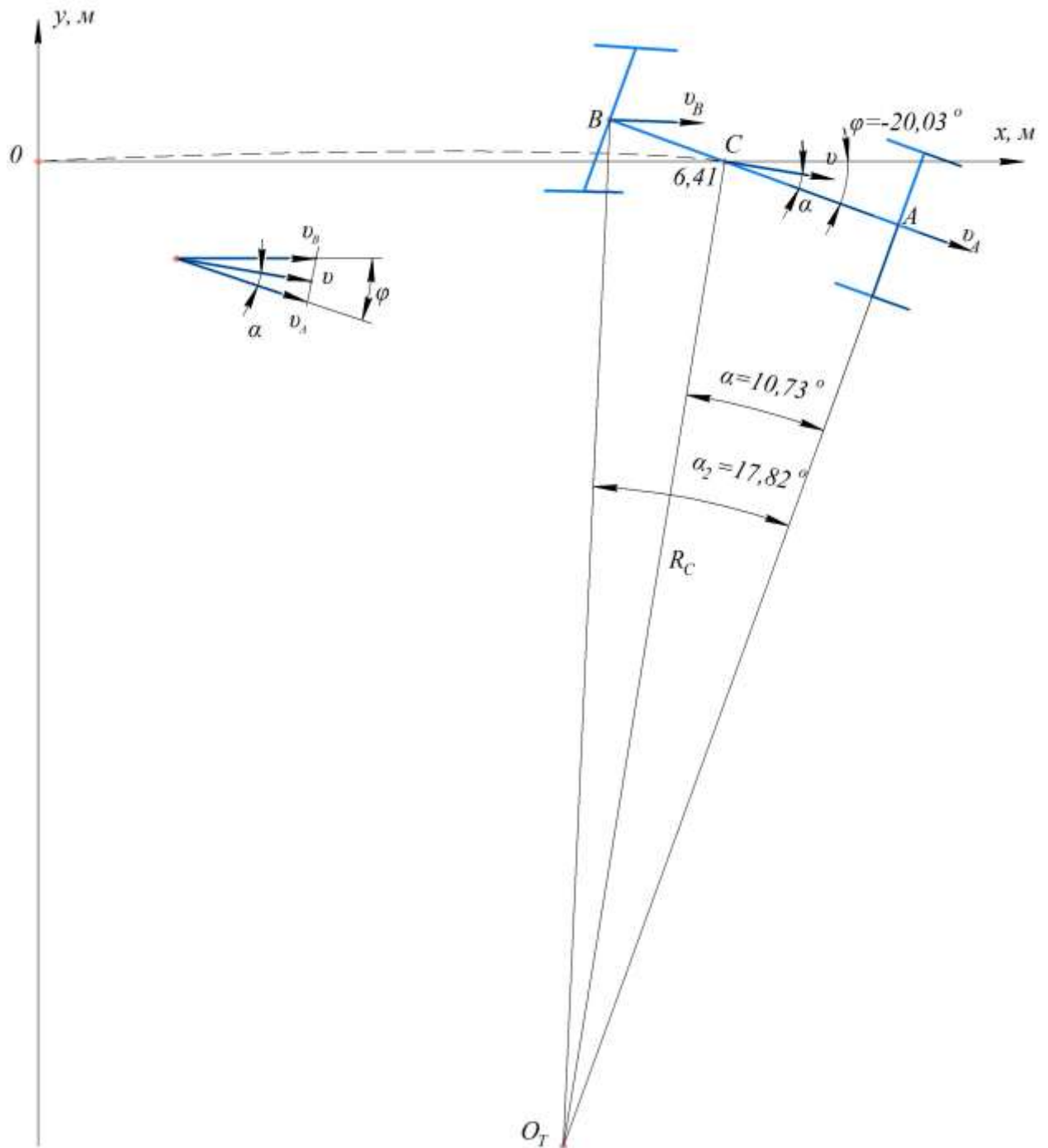


Рисунок 2.8 – Вхід в правий поворот, керовані колеса задні

Розрахунки координат траєкторії – в таблиці 2.9, траєкторія на рисунку 2.10.

Таблиця 2.9 – Параметри правого повороту на вході з задніми колесами керування

№ з/п	t, c	$x_i, м$	$y_i, м$	$\alpha_3, \frac{рад}{град}$	$\alpha, \frac{рад}{град}$	$\varphi, \frac{рад}{град}$	$S, м$	$R, м$	$x, м$	$y, м$
1	0	0	0	0	0	0	0	∞	0	0
				0	0	0				
2	0,59	0,71	0,01	0,0208	0,0208	-0,0043	0,71	-82,67	0,71	0,01
				1,19	1,19	-0,25				
3	1,19	1,43	0,02	0,0416	0,0416	-0,0173	1,43	-41,34	1,43	0,02
				2,39	2,39	-0,99				
4	1,78	2,14	0,04	0,0624	0,0624	-0,0388	2,14	-27,56	2,14	0,04
				3,58	3,58	-2,23				
5	2,38	2,85	0,05	0,0832	0,0832	-0,069	2,85	-20,67	2,85	0,05
				4,77	4,77	-3,96				
6	2,97	3,57	0,06	0,1040	0,1040	-0,1079	3,57	-16,53	3,57	0,06
				5,96	5,96	-6,18				
7	3,57	4,28	0,05	0,1248	0,1248	-0,1553	4,28	-13,78	4,28	0,05
				7,16	7,16	-8,90				
8	4,16	4,99	0,01	0,1456	0,1456	-0,2114	4,99	-11,81	4,99	0,01
				8,35	8,35	-12,12				
9	4,76	5,70	-0,05	0,1664	0,1664	-0,2761	5,71	-10,33	5,70	-0,05
				9,54	9,54	-15,83				
10	5,35	6,41	-0,15	0,1873	0,1873	-0,3495	6,42	-9,19	6,41	-0,15
				10,73	10,73	-20,03				

Моделювання правого повороту з задніми колесами керування на виході.

Приймаємо:

$$\alpha_{1K} = 0; \alpha_0 = \alpha_{30} = 10,73^0 = 0,1873 \text{ рад}; R_{\min} = -9,2 \text{ м}; \alpha_{3K} = \alpha_{2K} = 0; t = 4 \text{ с}.$$

$$\text{Знаходимо: } \alpha_{20} = 0,311 \text{ рад} = 17,82^0;$$

$$k = k_3 = \frac{0 - 0,187}{4} = -0,0468 \text{ с}^{-1}; k_{II} = 0;$$

$$m = -\frac{0,187}{1,72} = -0,109 \text{ м}^{-1}; \quad n = \frac{0,0468}{1,72} = 0,027 \text{ м}^{-1} \text{ с}^{-1}.$$

Кут повороту остова трактора

$$\varphi_K = 1,2(-0,109 \cdot 4 + 0,5 \cdot 0,027 \cdot 4^2) = -0,2613 \text{ рад} = -14,98^\circ.$$

Результати розрахунків наведені у таблиці 2.10, траєкторія на рисунку 2.10.

Таблиця 2.10 – Параметри правого повороту на виході з задніми колесами керування

№ з/п	t, с	x _i , м	y _i , м	α_3 , $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	α , $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	φ , $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	S, м	R, м	x, м	y, м
1	0	0	0	0,1873	0,1873	0	0	-9,19	6,41	-0,15
				10,73	10,73	0				
2	0,44	0,53	0,08	0,1664	0,1664	-0,0548	0,53	-10,33	6,93	-0,25
				9,54	9,54	-3,14				
3	0,89	1,06	0,12	0,1456	0,1456	-0,1032	1,07	-11,81	7,45	-0,40
				8,35	8,35	-5,92				
4	1,33	1,59	0,13	0,1248	0,1248	-0,1452	1,60	-13,78	7,95	-0,57
				7,16	7,16	-8,32				
5	1,78	2,12	0,10	0,1040	0,1040	-0,1806	2,13	-16,53	8,44	-0,78
				5,96	5,96	-10,36				
6	2,22	2,66	0,05	0,0832	0,0832	-0,2097	2,67	-20,67	8,92	-1,01
				4,77	4,77	-12,02				
7	2,67	3,18	-0,03	0,0624	0,0624	-0,2322	3,20	-27,56	9,39	-1,27
				3,58	3,58	-13,31				
8	3,11	3,71	-0,13	0,0416	0,0416	-0,2484	3,73	-41,34	9,85	-1,54
				2,39	2,39	-14,24				
9	3,56	4,23	-0,25	0,0208	0,0208	-0,2581	4,27	-82,67	10,29	-1,83
				1,19	1,19	-14,79				
10	4,0	4,74	-0,39	0	0	-0,2613	4,80	∞	10,73	-2,13
				0	0	-14,98				

Моделювання правого повороту з всіма керованими колесами на вході .

Приймаємо: $\alpha_0 = \alpha_{п0} = \alpha_{30} = 0$; $t = 4 \text{ с}$; $\alpha_{1K} = -24,1^\circ = -0,421 \text{ рад}$;

$$\alpha_{2K} = 24,1^\circ = 0,421 \text{ рад}.$$

Тоді: $\alpha_{пк} = -\frac{1,14}{2,86} \cdot 0,421 = -0,1678 \text{ рад} = -9,62^\circ$;

$$\alpha_{зк} = \frac{1,72}{2,86} \cdot 0,421 = 0,2532 \text{ рад} = 14,51^\circ; \quad k_{п} = \frac{0 - 0,168}{4} = -0,042 \text{ с}^{-1};$$

$$k_3 = \frac{0 - (-0,253)}{4} = 0,063 \text{ с}^{-1}; \quad m = 0; \quad k = k_{п} + k_3 = -0,042 + 0,063 = 0,021;$$

$$R_{\min} = \frac{L}{\alpha_{1к} - \alpha_{2к}} = \frac{2,86}{-0,421 - 0,421} = -3,4 \text{ м};$$

$$n = \frac{-0,042}{1,14} - \frac{0,063}{1,72} = -0,0736 \text{ м}^{-1} \text{ с}^{-1}.$$

Кут повороту остова трактора:

$$\varphi_k = 1,2 \cdot (-0,5 \cdot 0,0736 \cdot 4^2) = -0,7066 \text{ рад} = -40,5^\circ.$$

Схема моделювання правого повороту з задніми та передніми колесами керування на вході з розрахунковими параметрами зображена на рисунку 2.9.

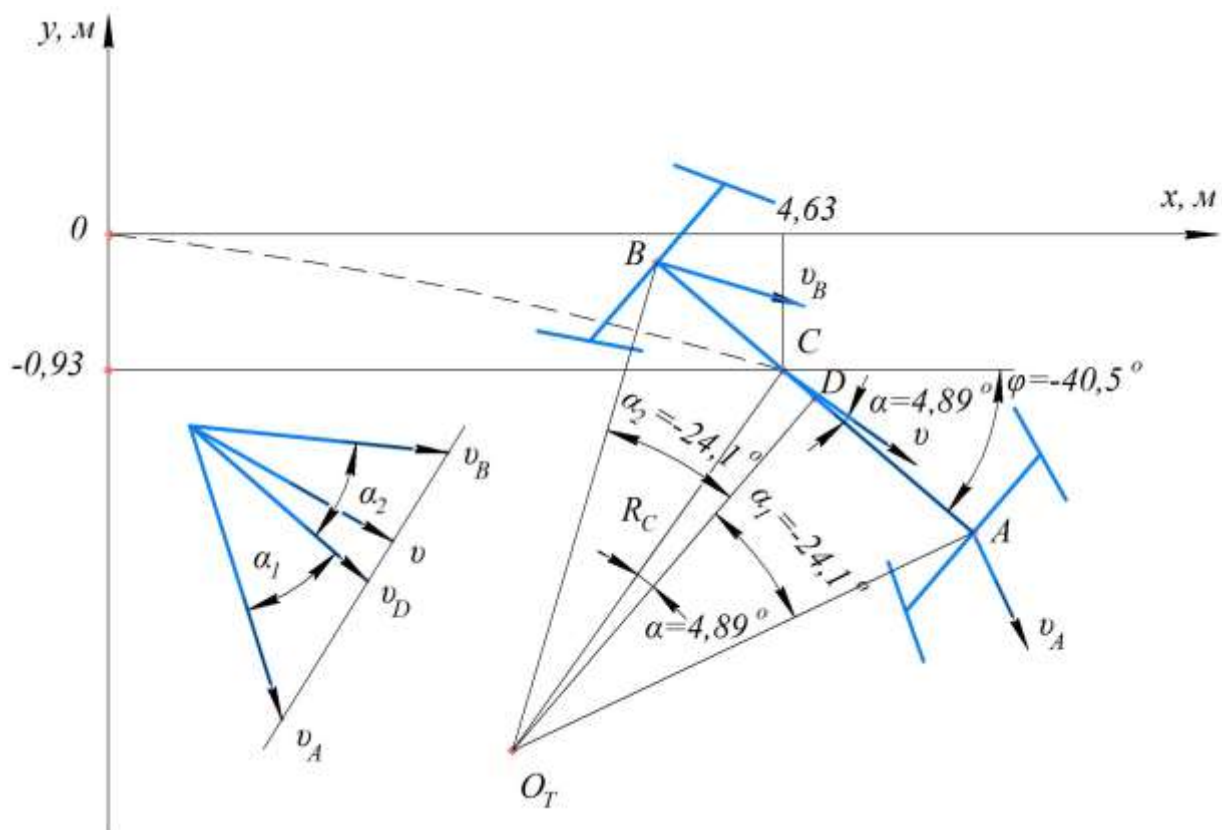


Рисунок 2.9 – Вхід в правий поворот, керовані колеса всі

Результати розрахунків наведені у таблиці 2.11, траєкторія на рисунку 2.10.

Таблиця 2.11 – Моделювання правого повороту на вході з всіма колесами керування

№ з/п	t , с	x_i , м	y_i , м	α_{Π} , $\frac{рад}{град}$	α_3 , $\frac{рад}{град}$	α , $\frac{рад}{град}$	φ , $\frac{рад}{град}$	S , м	R , м	x , м	y , м
1	0	0	0	0	0	0	0	0	∞	0	0
				0	0	0	0				
2	0,44	0,53	0	-0,0186	0,0281	0,0095	-0,0087	0,53	-30,57	0,53	0
				-1,07	1,61	0,54	-0,50				
3	0,89	1,07	0	-0,0373	0,0563	0,0190	-0,0349	1,07	-15,29	1,07	0
				-2,14	3,23	1,09	-2,00				
4	1,33	1,60	-0,02	-0,0559	0,0844	0,0285	-0,0785	1,60	-10,19	1,60	-0,02
				-3,21	4,84	1,63	-4,50				
5	1,78	2,13	-0,06	-0,0746	0,1125	0,0379	-0,1396	2,13	-7,64	2,13	-0,06
				-4,28	6,45	2,18	-8,00				
6	2,22	2,66	-0,13	-0,0932	0,1407	0,0474	-0,2181	2,67	-6,11	2,66	-0,13
				-5,34	8,06	2,72	-12,50				
7	2,67	3,18	-0,24	-0,1119	0,1688	0,0569	-0,314	3,20	-5,10	3,18	-0,24
				-6,41	9,68	3,26	-18,00				
8	3,11	3,69	-0,41	-0,1305	0,1969	0,0664	-0,4274	3,73	-4,37	3,69	-0,41
				-7,48	11,29	3,81	-24,50				
9	3,56	4,17	-0,63	-0,1492	0,2251	0,0759	-0,5583	4,27	-3,82	4,17	-0,63
				-8,55	12,90	4,35	-32,00				
10	4,0	4,63	-0,93	-0,1678	0,2532	0,0854	-0,7066	4,80	-3,40	4,63	-0,93
				-9,62	14,51	4,89	-40,50				

Моделювання правого повороту з всіма колесами керування на виході.

Приймаємо:

$$\alpha_{10} = -24,1^0 = -0,421 \text{ рад}; \alpha_{20} = 24,1^0 = 0,421 \text{ рад}; \alpha_{1K} = \alpha_{2K} = 0;$$

$$\alpha_{\Pi 0} = -0,1678 \text{ рад} = -9,62^0; \alpha_{30} = 14,51^0 = 0,2532 \text{ рад}; \alpha_{\Pi K} = \alpha_{3K} = 0; t = 4 \text{ с.}$$

Визначаємо:

$$R_{\min} = \frac{2,86}{-0,421 - 0,421} = -3,4 \text{ м};$$

$$k_{\pi} = \frac{0 - (-0,168)}{4} = 0,042 c^{-1}; \quad k_3 = \frac{0 - 0,253}{4} = -0,063 c^{-1};$$

$$k = k_{\pi} + k_3 = 0,042 + (-0,063) = -0,021;$$

$$m = \frac{-0,168}{1,14} - \frac{-0,253}{1,72} = -0,294 m^{-1}; \quad n = \frac{0,042}{1,14} - \frac{-0,063}{1,72} = 0,0735 m^{-1} c^{-1}.$$

Кут повороту остова трактора:

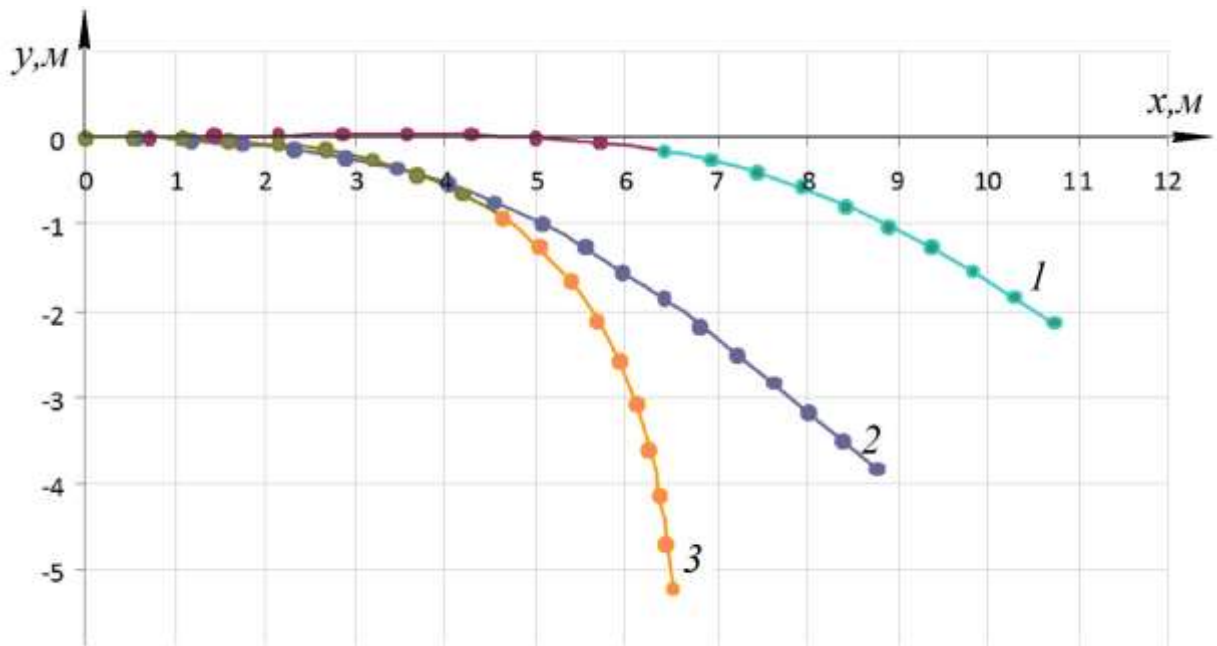
$$\varphi_K = 1,2(-0,294 \cdot 4 + 0,5 \cdot 0,0735 \cdot 4^2) = -0,7066 \text{ рад} = -40,5^\circ.$$

Результати розрахунків наведені у таблиці 2.12, траєкторія на рисунку 2.10.

Таблиця 2.12 – Параметри правого повороту на вході з всіма колесами керування

№ з/п	t, с	x _i , м	y _i , м	α_{π} , $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	α_3 , $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	α , $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	φ , $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	S, м	R, м	x, м	y, м
1	0	0	0	-0,1678	0,2532	0,0854	0	0	-3,40	4,63	-0,93
				-9,62	14,51	4,89	0				
2	0,44	0,53	0	-0,1492	0,2251	0,0759	-0,1483	0,53	-3,82	5,03	-1,27
				-8,55	12,90	4,35	-8,5				
3	0,89	1,06	-0,07	-0,1305	0,1969	0,0664	-0,2791	1,07	-4,37	5,39	-1,67
				-7,48	11,29	3,81	-16,0				
4	1,33	1,57	-0,22	-0,1119	0,1688	0,0569	-0,3925	1,60	-5,10	5,68	-2,11
				-6,41	9,68	3,26	-22,5				
5	1,78	2,07	-0,43	-0,0932	0,1407	0,0474	-0,4885	2,13	-6,11	5,92	-2,59
				-5,34	8,06	2,72	-28,0				
6	2,22	2,54	-0,69	-0,0746	0,1125	0,0379	-0,567	2,67	-7,64	6,11	-3,10
				-4,28	6,45	2,18	-32,5				
7	2,67	2,98	-0,99	-0,0559	0,0844	0,0285	-0,6281	3,20	-10,19	6,25	-3,62
				-3,21	4,84	1,63	-36,0				
8	3,11	3,41	-1,32	-0,0373	0,0563	0,0190	-0,6717	3,73	-15,29	6,36	-4,15
				-2,14	3,23	1,09	-38,5				
9	3,56	3,82	-1,68	-0,0186	0,0281	0,0095	-0,6979	4,27	-30,57	6,44	-4,69
				-1,07	1,61	0,54	-40,0				
10	4,0	4,23	-2,06	0	0	0	-0,7066	4,80	∞	6,51	-5,23
				0	0	0	-40,5				

Ділянки траєкторій входу в правий поворот і виходу з правого повороту - на рисунку 2.10.



Керовані колеса: 1 – задні; 2 – передні; 3 – всі.

Рисунок 2.10 – Траєкторія входу в правий поворот і виходу з повороту

На рисунках 2.6 – 2.10 наведені положення остова трактора і основні параметри траєкторій в кінці кожного входу в поворот.

2.5.3 Крабовидний маневр

Моделювання лівого крабовидного повороту (ділянки 1 і 6, рис. 2.11).

Приймаємо:

$$R = 8 \text{ м}; \quad v = 1,2 \text{ м/с}; \quad \alpha_0 = 0; \quad \alpha = \alpha_K = \alpha_{ПК} = \alpha_{ЗК} = 25^\circ = 0,4361 \text{ рад};$$

$$\alpha_0 = \alpha_{П0} = \alpha_{30} = 0 \text{ (ділянка 1).}$$

$$\alpha_0 = \alpha_{П0} = \alpha_{30} = -25^\circ = -0,4361 \text{ рад},$$

$$\alpha = \alpha_K = \alpha_{ПК} = \alpha_{ЗК} = 0$$

$$\alpha_{1К} = \alpha_{2К} = \alpha \text{ (ділянка 6).}$$

Тоді:

$$k = \frac{v}{R} = \frac{1,2}{8} = 0,15 \text{ c}^{-1};$$

$$t = \frac{\alpha}{k} = \frac{0,4361}{0,15} = 2,91 \text{ c (ділянка 1);}$$

$$k = \frac{1,2}{-8} = -0,15 \text{ c}^{-1};$$

$$t = \frac{-0,4361}{-0,15} = 2,91 \text{ c}.$$

Згідно (2.18) розрахуємо координати траєкторії (таблиця 2.13 і 2.14).

Таблиця 2.13 – Параметри лівого крабовидного повороту (рис. 2.11, ділянка 1)

№ з/П	t , с	x_i , м	y_i , м	α_{II} , $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	α_3 , $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	α , $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	S , м	x , м	y , м
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
				0	0	0			
2	0,32	0,39	0,01	0,0485	0,0485	0,0485	0,39	0,39	0,01
				2,78	2,78	2,78			
3	0,65	0,78	0,04	0,0969	0,0969	0,0969	0,78	0,77	0,04
				5,56	5,56	5,56			
4	0,97	1,16	0,08	0,1454	0,1454	0,1454	1,16	1,16	0,08
				8,33	8,33	8,33			
5	1,29	1,54	0,15	0,1938	0,1938	0,1938	1,55	1,54	0,15
				11,11	11,11	11,11			
6	1,62	1,92	0,23	0,2423	0,2423	0,2423	1,94	1,92	0,23
				13,89	13,89	13,89			
7	1,94	2,29	0,34	0,2907	0,2907	0,2907	2,33	2,29	0,34
				16,67	16,67	16,67			
8	2,26	2,66	0,46	0,3392	0,3392	0,3392	2,71	2,66	0,46
				19,44	19,44	19,44			
9	2,58	3,02	0,59	0,3877	0,3877	0,3877	3,10	3,02	0,59
				22,22	22,22	22,22			
10	2,91	3,38	0,75	0,4361	0,4361	0,4361	3,49	3,38	0,75
				25,00	25,00	25,00			

Таблиця 2.14 – Лівий крабовидний поворот (рис. 2.11, ділянка б)

№ з/п	t , с	x_i , м	y_i , м	α_{II} , $\frac{рад}{град}$	α_3 , $\frac{рад}{град}$	α , $\frac{рад}{град}$	S , м	x , м	y , м
1	0	0	0	-0,4361 -25	-0,4361 -25	-0,4361 -25	0	16,45	0,75
2	0,32	0,36	-0,16	-0,3876 -22,22	-0,3877 -22,22	-0,3877 -22,22	0,39	16,81	0,59
3	0,65	0,72	-0,29	-0,3392 -19,44	-0,3392 -19,44	-0,3392 -19,44	0,78	17,17	0,46
4	0,97	1,09	-0,41	-0,2907 -16,67	-0,2907 -16,67	-0,2907 -16,67	1,16	17,54	0,34
5	1,29	1,46	-0,52	-0,2423 -13,89	-0,2423 -13,89	-0,2423 -13,89	1,55	17,91	0,23
6	1,62	1,84	-0,60	-0,1938 -11,11	-0,1938 -11,11	-0,1938 -11,11	1,94	18,29	0,15
7	1,94	2,22	-0,66	-0,1454 -8,33	-0,1454 -8,33	-0,1454 -8,33	2,33	18,67	0,08
8	2,26	2,61	-0,71	-0,0969 -5,56	-0,0969 -5,56	-0,0969 -5,56	2,71	19,06	0,04
9	2,58	2,99	-0,74	-0,0485 -2,78	-0,0485 -2,78	-0,0485 -2,78	3,10	19,44	0,01
10	2,91	3,38	-0,75	0 0	0 0	0 0	3,49	19,83	0

Моделювання правого крабовидного повороту (ділянка 3 і 4, рис. 2.11).

Приймаємо: $R = 8 \text{ м}$; $v = 1,2 \text{ м/с}$;

$\alpha = \alpha_{II} = \alpha_3 = 0$; $\alpha_0 = \alpha_{II0} = \alpha_{30} = 25^\circ = 0,4361 \text{ рад}$, $\alpha_K = 0$ (ділянка 3);

$\alpha_0 = \alpha_{II0} = \alpha_{30} = 0$; $\alpha_K = \alpha_{IIK} = \alpha_{3K} = -25^\circ = -0,4361 \text{ рад}$ (ділянка 4).

Відповідно:

$$k = \frac{1,2}{-8} = -0,15 \text{ с}^{-1}; t = \frac{\alpha}{k} = \frac{-0,4361}{-0,15} = 2,91 \text{ с (ділянка 3);}$$

$$k = \frac{1,2}{-8} = -0,15 \text{ с}^{-1}; t = \frac{-0,4361}{-0,15} = 2,91 \text{ с (ділянка 4).}$$

Координати траєкторії у таблицях 2.15 і 2.16.

Таблиця 2.15 - Параметри правого крабовидного поворот (рис. 2.11, ділянка 3)

№ з/п	t , с	x_i , м	y_i , м	α_{II} , $\frac{рад}{град}$	α_3 , $\frac{рад}{град}$	α , $\frac{рад}{град}$	S , м	x , м	y , м
1	0	0	0	-0,4361	-0,4361	-0,4361	0	6,54	2,27
				-25	-25	-25			
2	0,32	0,36	0,16	-0,3877	-0,3877	-0,3877	0,39	6,89	2,43
				-22,22	-22,22	-22,22			
3	0,65	0,72	0,29	-0,3392	-0,3392	-0,3392	0,78	7,25	2,56
				-19,44	-19,44	-19,44			
4	0,97	1,09	0,41	-0,2907	-0,2907	-0,2907	1,16	7,62	2,68
				-16,67	-16,67	-16,67			
5	1,29	1,46	0,52	-0,2423	-0,2423	-0,2423	1,55	8,0	2,79
				-13,89	-13,89	-13,89			
6	1,62	1,84	0,60	-0,1938	-0,1938	-0,1938	1,94	8,37	2,87
				-11,11	-11,11	-11,11			
7	1,94	2,22	0,66	-0,1454	-0,1454	-0,1454	2,33	8,76	2,93
				-8,33	-8,33	-8,33			
8	2,26	2,61	0,71	-0,0969	-0,0969	-0,0969	2,71	9,14	2,98
				-5,56	-5,56	-5,56			
9	2,58	2,99	0,74	-0,0485	-0,0485	-0,0485	3,10	9,53	3,01
				-2,78	-2,78	-2,78			
10	2,91	3,38	0,75	0	0	0	3,49	9,92	3,02
				0	0	0			

Таблиця 2.16 – Параметри правого крабовидного повороту (рис. 2.11, ділянка 4)

№ з/п	t , с	x_i , м	y_i , м	α_{II} , $\frac{рад}{град}$	α_3 , $\frac{рад}{град}$	α , $\frac{рад}{град}$	S , м	x , м	y , м
1	0	0	0	0	0	0	0	9,92	3,02
				0	0	0			
2	0,32	0,39	-0,01	-0,0485	-0,0485	-0,0485	0,39	10,30	3,01
				-2,78	-2,78	-2,78			
3	0,65	0,77	-0,04	-0,0969	-0,0969	-0,0969	0,78	10,69	2,98
				-5,56	-5,56	-5,56			
4	0,97	1,16	-0,08	-0,1454	-0,1454	-0,1454	1,16	11,07	2,93
				-8,33	-8,33	-8,33			
5	1,29	1,54	-0,15	-0,1938	-0,1938	-0,1938	1,55	11,46	2,87
				-11,11	-11,11	-11,11			

6	1,62	1,92	-0,23	-0,2423	-0,2423	-0,2423	1,94	11,84	2,79
				-13,89	-13,89	-13,89			
7	1,94	2,29	-0,34	-0,2907	-0,2907	-0,2907	2,33	12,21	2,68
				-16,67	-16,67	-16,67			
8	2,26	2,66	-0,46	-0,3392	-0,3392	-0,3392	2,71	12,58	2,56
				-19,44	-19,44	-19,44			
9	2,58	3,02	-0,59	-0,3877	-0,3876	-0,3876	3,10	12,94	2,43
				-22,22	-22,22	-22,22			
10	2,91	3,38	-0,75	-0,4361	-0,4361	-0,4361	3,49	13,30	2,27
				-25,00	-25,00	-25,00			

Моделювання крабовидного прямолінійного ходу (ділянки 2 і 5, рис. 2.11).

Вихідні дані:

$$v = 1,2 \text{ м/с}; \quad \alpha = \alpha_{\Pi} = \alpha_3 = \alpha_0 = \alpha_{\Pi 0} = \alpha_{30} = 25^\circ = 0,4361 \text{ рад (ділянка 2);}$$

$$\alpha = \alpha_{\Pi} = \alpha_3 = \alpha_0 = \alpha_{\Pi 0} = \alpha_{30} = -25^\circ = -0,4361 \text{ рад (ділянка 5).}$$

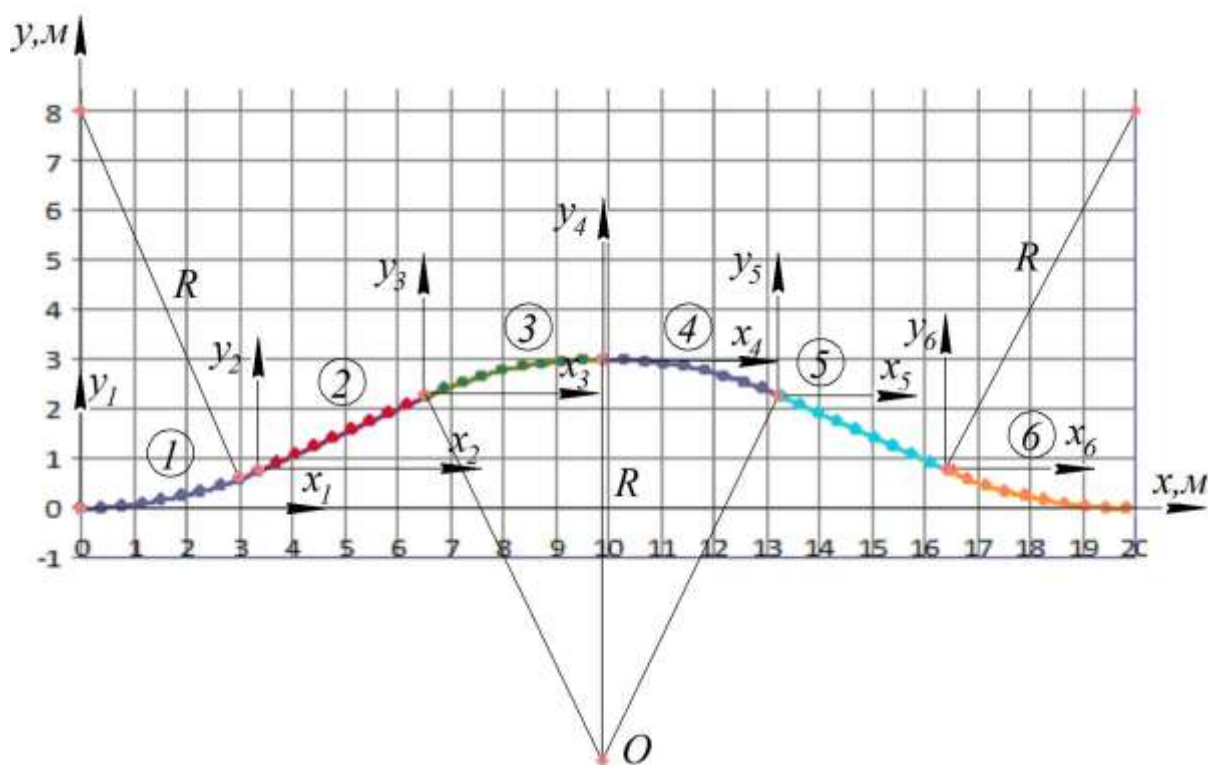
Час руху не обмежений, приймаємо для обох ділянок $t = 2,79 \text{ с}$.
Координати точок траєкторії розраховуємо за формулою (2.15), результати розрахунків – у таблицях 2.17 і 2.18.

Таблиця 2.17 – Крабовидний прямолінійний хід (рис. 2.11, ділянка 2)

№ з/п	$t, \text{ с}$	$x_i, \text{ м}$	$y_i, \text{ м}$	$\alpha_{\Pi}, \frac{\text{рад}}{\text{град}}$	$\alpha_3, \frac{\text{рад}}{\text{град}}$	$\alpha, \frac{\text{рад}}{\text{град}}$	$S, \text{ м}$	$x, \text{ м}$	$y, \text{ м}$
1	0	0	0	0,4361 25	0,4361 25	0,4361 25	0	3,38	0,75
2	0,32	0,35	0,17				0,39	3,73	0,92
3	0,65	0,70	0,34				0,78	4,08	1,09
4	0,97	1,05	0,51				1,16	4,43	1,26
5	1,29	1,40	0,68				1,55	4,78	1,43
6	1,62	1,75	0,84				1,94	5,13	1,59
7	1,94	2,10	1,01				2,33	5,48	1,76
8	2,26	2,46	1,18				2,71	5,83	1,93
9	2,58	2,81	1,35				3,10	6,19	2,10
10	2,91	3,16	1,52				3,49	6,54	2,27

Таблиця 2.18 – Крабовидний прямолінійний хід (рис. 2.11, ділянка 5)

№ з/П	t , с	x_i , м	y_i , м	α_p , $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	α_3 , $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	α , $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	S , м	x , м	y , м
1	0	0	0	$-\frac{0,4361}{-25}$	$-\frac{0,4361}{-25}$	$-\frac{0,4361}{-25}$	0	13,30	2,27
2	0,32	0,35	-0,17				0,39	13,65	2,10
3	0,65	0,70	-0,34				0,78	14,00	1,93
4	0,97	1,05	-0,51				1,16	14,35	1,76
5	1,29	1,40	-0,68				1,55	14,70	1,59
6	1,62	1,75	-0,84				1,94	15,05	1,43
7	1,94	2,10	-1,01				2,33	15,40	1,26
8	2,26	2,46	-1,18				2,71	15,75	1,09
9	2,58	2,81	-1,35				3,10	16,10	0,92
10	2,91	3,16	-1,52				3,49	16,45	0,75



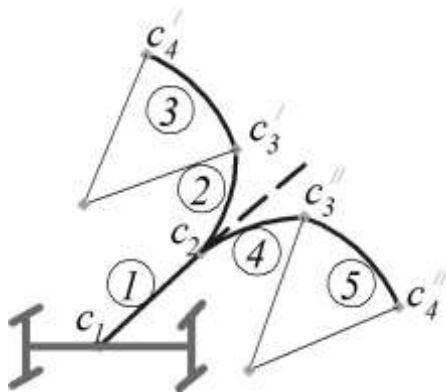
1 – лівий поворот; 2 – прямий хід; 3, 4 – правий поворот; 5 – прямий хід; 6 – лівий поворот.

Рисунок 2.11 – Маневри крабовидного руху енергетичного засобу

Крабовидний прямолінійний рух при однакових середніх кутах повороту передніх і задніх коліс – це проміжний або граничний вид руху, по обидва боки якого має місце протилежна кривизна траєкторії.

Якщо, починаючи з деякої точки C_2 ділянки (рис. 2.12), рівномірно обертати, наприклад, задні колеса за годинниковою стрілкою, то курсовий кут буде зростати і енергетичний засіб здійснить вхід в лівий поворот (ділянка $C_2C'_3$). Далі можна здійснювати рух з фіксованими кутами повороту коліс ($\alpha_1 > \alpha_2$) – отримаємо колову траєкторію $C'_3C'_4$ з позитивним радіусом кривизни. Якщо ж обертати задні колеса проти годинникової стрілки, отримаємо вхід в правий поворот ($C_2C''_3$) і, відповідно, колову ділянку $C''_3C''_4$ з від'ємною кривизною.

Подібні маніпуляції з передніми колесами при фіксованому положенні задніх коліс викликають аналогічний ефект тільки з приближеними змінами курсового кута.



1 – прямолінійний рух; 2 – вхід в лівий поворот; 3 – коловий лівий поворот; 4 – вхід в правий поворот; 5 – коловий правий поворот.

Рисунок 2.12 – Крабовидні маневри енергетичного засобу

2.6 Висновки по розділу 2

Із наукової літератури відома низка варіантів описання криволінійного руху енергетичного засобу аналітичними рівняннями. Але після складання інтегральних рівнянь, як правило, у вигляді проекцій на осі координат,

вирішення цих рівнянь, подібні запропонованому в даній роботі, у відомій нам літературі не зустрічаються. Але ця задача лишається актуальною. Її актуальність обумовлена необхідністю спрощення маневрових операцій при використанні машин і розворотів агрегатів під час польових робіт; аналізу можливих варіантів руху за допомогою отриманих рівнянь на стадії планування робіт з метою зменшення витрат палива і негативного впливу на довкілля та покращення безпеки руху. Нарешті створення і відтворення траєкторій – це важлива задача також при розробці способів автоматичного керування рухом польовим агрегатом.

В роботі отримано параметричну форму рівнянь для криволінійної траєкторії польового агрегату на базі енергетичного засобу. Вони зв'язують поточні координати точок траєкторії в декартовій системі координат і є універсальними, тому що придатні для всіх видів несталого і сталого руху енергетичного засобу, незалежно від того, які колеса керовані: передні, задні чи всі. Рівняння придатні для ділянок входу в поворот і виходу з повороту, а також всіх можливих випадків крабового руху. Запропоновані рівняння дозволяють будувати траєкторії з урахуванням інтенсивності повороту керованих коліс. Рішення знайдено, виходячи з проекцій швидкості центра мас машини на інерційні осі координат, при цьому підінтегральні функції виражено через єдину змінну – кут повороту остова енергетичного засобу або час.

Узагальнюючи результати виконаної роботи, зроблено підсумки:

- Створена теорія криволінійного руху польового агрегату на базі енергетичного засобу зі всіма керованими колесами. Метод і рівняння універсальні, ними можна описати і аналізувати криволінійний рух будь-якого чотирьохколісного енергетичного засобу.

- Розроблено аналітичний спосіб отримання рівнянь в параметричній формі чотирьохколісних енергетичних засобів. Завдяки запропонованому методу, що передбачає зведення незалежних змінних у підінтегральних

функціях до одного аргументу, шляхом введення підстановки з лінійною залежністю курсового кута від обраного аргументу і вираження через цей аргумент кута повороту корпусу енергетичного засобу.

- Розроблено спосіб рішення інтегральних рівнянь для координат траєкторії, який полягає в розкладанні підінтегральних функцій в ряди Маклорена, дозволяє отримувати значення координат точок траєкторії з будь-якою точністю в залежності від прийнятої кількості членів ряду. Розроблено також метод вирішення інтегралів у канонічній формі [6].

- Обґрунтована відповідність отриманих рівнянь для всіх можливих ділянок несталого руху чотирьохколісного енергетичного засобу: вхід в лівий і правий повороти і вихід з поворотів обох видів. Установлені межі придатності отриманих рівнянь, які цілком відповідають реальним кутам повороту керованих коліс і відповідному значенню курсового кута.

- Отримані також рівняння в аналітичній формі для колового руху центра мас енергетичного засобу зі всіма керованими колесами в параметричній формі в єдиній системі координат будь-якої послідовності можливих маневрів.

- Доведена придатність отриманих математичних формул траєкторії криволінійного руху для енергетичного засобу з передніми керованими колесами.

- Для створення складних траєкторій використана програма Microsoft Excel, яка дозволяє розраховувати та моделювати будь-якої складності маневри криволінійного руху центра ваги енергетичного засобу у параметричній формі.

- На прикладі енергетичного засобу другого тягового класу моделі ХТЗ-120/160 з колісною формулою 4x4, розглянуті практично всі можливі найпростіші маневри польового агрегату на базі енергетичного засобу і побудовані схеми складних траєкторій маневрів з використанням передньої, задньої та всіх вісей з сумісним зображенням лівого та правого поворотів.

Всі рішення отримані вперше. У відомій літературі вивчення цього питання обмежується постановкою задачі та записом відповідних інтегральних або диференціальних рівнянь. Для їх рішення пропонують чисельні методи.

Виконані дослідження на базі отриманих рівнянь криволінійного руху енергетичного засобу показують, що вони дозволяють виконувати аналіз розворотів машин і МТА під час обробки поля і вибрати оптимальні варіанти, скорочувати непродуктивні витрати потужності на розворотах, зменшувати додаткові витрати на приведення у належний стан ділянок землі, на яких виконують повороти і розвороти, точно дотримуватися агротехнічних строків при виконанні операцій і, нарешті, створювати програми повної автоматизації управління рухом машин і МТА по криволінійним траєкторіям без участі водія.

Розроблена математична модель криволінійного центра ваги енергетичного засобу зі всіма керованими колесами дає можливість моделювати будь-які складні маневри, які необхідно розглянути на прикладі, будь-якого енергетичного засобу зі всіма керованими колесами та оцінити параметри, які формують траєкторію маневру за допомогою табличного процесора Microsoft Excel.

Список використаних джерел до розділу 2

1. Трактори та автомобілі. 4.8. Практикум. Основи теорії та розрахунку тракторів і автомобілів: навч. Посібник / В.М. Антощенко, Р.В. Антощенко, М.П. Артьомов, А.Т. Лебедєв // За ред. проф. А.Т. Лебедєва. Х.: Факт, 2013. 260 с.

2. Dovzhik M., Kalnaguz A., Sirenko Yu. Curvilinear movement of a four-wheel machine using a satellite navigation system. Scientific Horizons. 2020, (07),

pp.126-136. ISSN 2663-2144. <https://doi.org/10.33249/2663-2144-2020-92-7-126-135>

3. Графічний спосіб вивчення траєкторії криволінійного руху чотирьохколісного трактора з передніми керованими колесами // М.Я. Довжик, Б.Я. Татяненко, О.О. Соларьов // Інженерія природокористування. – Харків: ХНТУСГ, 2016. - №1(5). – С. 6-9.

4. Аналітичний спосіб визначення траєкторії криволінійного руху чотирьохколісної машини з передніми керованими колесами // М.Я. Довжик, Б.Я. Татяненко, О.О. Соларьов, Ю.В. Сіренко // Інженерія природокористування. – Харків: ХНТУСГ, 2017. - №1(7). – С. 64-73.

5. Універсальні рівняння траєкторії криволінійного руху чотирьохколісної машини // Довжик М.Я., Татяненко Б.Я., Соларьов О.О., Сіренко Ю.В. // Вісник Житомирського національного агроекологічного університету. ЖНАЕУ. – 2017. – № 1(58), т. 1 – с. 202-211.

6. Канонічні рівняння для рішення інтегралів руху / Б.Я. Татяненко, // Збірник тез доповідей міжнародної конференції «Технології 21 століття». – Одеса, 2016. – № 22. – С. 12 - 12.

7. Рівняння швидкості криволінійного руху колісного трактора // Мельник В.І., Довжик М.Я., Татяненко Б.Я., Соларьов О.О., Сіренко Ю.В. // Вісник СНАУ, серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів», ВИПУСК 10/2 (30), 2016, с. 7-15.

8. Спосіб урахування впливу відведення коліс при визначенні траєкторії криволінійного руху машини / М.Я. Довжик, Б.Я. Татяненко, О.О. Соларьов, Ю.В. Сіренко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – ВНТУ, 2017.– Вип. 3(132)– С. 92-97.

9. Мельник В.І. Аналітичний спосіб дослідження криволінійного руху чотирьохколісної машини (Analytical method of examining the curvilinear motion of a four-wheeled vehicle). В.І. Мельник, М.Я. Довжик, Б.Я.

Татьянченко, О.О. Соларьов, Ю.В. Сіренко // Східно-Європейський журнал передових технологій. Прикладна механіка. Вип. 3, № 7 (87), (2017). С. 59-65.

10. Zavrazhnov, A. I., Miheev, N. V. & Beljaev A. N. (2019). Povyshaem ustojchivost' dvizhenija kolesnogo traktora [We increase the driving stability of a wheeled tractor] Vserossijskij fermer. Internet-zhurnal. – URL: http://vfermer.ru/rubrics/tehnika/tehnika_1850.html

11. Островерх О.О. Керованість та стійкість руху тракторів / О.О. Островерх, В.М. Краснокутський, Т.О. Крюкова. – Харків: Друкарня Мадрид., 2021. – 156 с.

РОЗДІЛ 3

ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ТРАЄКТОРІЇ РУХУ МОДЕЛЬНОГО ЕНЕРГЕТИЧНОГО ЗАСОБУ

Експериментальної частина та методика проведення їх в дисертаційній роботі складається з наступних етапів проведення досліджень [1-8]:

1. Проведення моделювання розворотів і поворотів в лабораторних умовах для перевірки придатності теоретично отриманих математичних рівнянь, за допомогою табличного процесора Microsoft Excel;

2. Проведення польових маневрів на базі модельного енергетичного засобу зі всіма керованими колесами з використанням GPS навігації на сільськогосподарських угіддях СТОВ «Вікторія».

Мета досліджень: пошук та реалізація раціональних за видом розвороту кінематичних режимів руху і параметрів розворотів, визначення найменшого шляху маневру і, таким чином, збільшення продуктивності агрегату за рахунок зменшення довжини холостого ходу, збільшення коефіцієнту робочих ходів та зменшення витрати пального на розворотах.

Програмою досліджень передбачається проведення аналізу деяких факторів-параметрів криволінійної руху чотирьохколісного модельного енергетичного засобу: довжина шляху маневру, кут повороту корпусу чотирьохколісного модельного енергетичного засобу, час входу повороту та весь час маневру на розворотній полосі, радіус кривизни та інші.

3.1 Методика проведення моделювання грушоподібного розвороту з використанням передньої вісі в лабораторних умовах

Мета лабораторних досліджень: математичне використання виведених рівнянь для моделювання руху маневрів на прикладі модельного енергетичного засобу, за допомогою табличного процесора Microsoft Excel.

Для моделювання та проведення досліджень в лабораторних умовах необхідно обрати вид маневру-розвороту, який складається з декілька ділянок-поворотів та обрати вихідні дані для кожної ділянки розвороту окремо. Для прикладу був обраний грушоподібний розворот модельного енергетичного засобу.

Розворот складається з ділянок повороту [16] (рис. 3.1): входу та виходу лівого або правого поворотів, та колового руху (правий або лівий поворот).

За приклад був обраний грушоподібний розворот модельного енергетичного засобу з мінімальним радіусом повороту $R_{\min} = 3,685$ м.

Швидкість руху по криволінійній траєкторії складала $v = 5 \dots 10$ км/год $\approx 1,3 \dots 2,6$ м/с. Це один з видів розворотів, де використовується тільки передній керований міст.

Визначаємо початкові значення параметрів для всіх ділянок-поворотів розвороту: $v = 1,7$ м/с; $\ell = 1,365$ м; $R_{\min} = 3,685$ м; шлях $S = vt$.

Наступним етапом розраховуємо значення для кожної траєкторії ділянки-повороту на початку. Приймаємо: значення повного курсового кута на початку $\alpha_0 = \alpha_{\Pi 0} + \alpha_{30}$, час повороту t , с (задається). Максимальне значення кута повороту керованих коліс (в кінці повороту)

$$\alpha = \alpha_{1K} + \alpha_{2K} = \alpha_{\Pi} + \alpha_3 = \frac{L}{R_{\min}} + \frac{L}{R_{\min}}.$$

Значення повного курсового кута

наприкінці повороту визначаємо за формулою

$$\alpha_K = \alpha_{\Pi K} + \alpha_{3K} = \frac{\alpha_1 \ell_2}{L} + \frac{\alpha_2 \ell_1}{L}, \text{ рад.}$$

Повне значення коефіцієнта інтенсивності

зміни курсового кута: $k = k_{II} + k_3 = \frac{\alpha_{пкінц} - \alpha_{по}}{t} + \frac{\alpha_{зкінц} - \alpha_{зо}}{t}, c^{-1}$.

Коефіцієнти: $m = \frac{\alpha_{по}}{\ell_2} - \frac{\alpha_{зо}}{\ell_1}$, $n = \frac{k_n}{\ell_2} - \frac{k_3}{\ell_1}$.

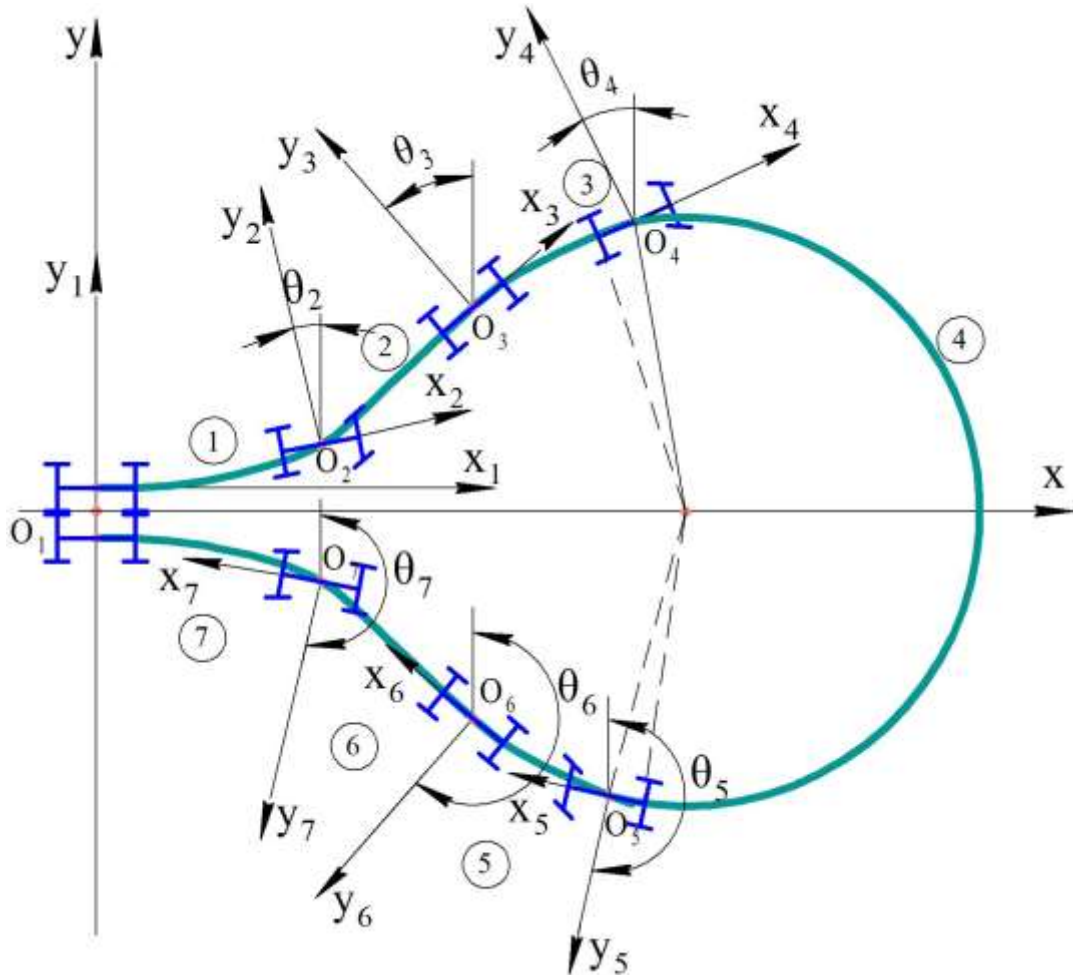


Рисунок 3.1 – Складові грушоподібного розвороту модельного енергетичного засобу

Значення повороту корпусу модельного енергетичного засобу в кінці ділянки-повороту розраховуємо за формулою:

$$\varphi_{\max} = \nu \left(\frac{\alpha_{по}t + 0,5k_n t^2}{\ell_2} - \frac{\alpha_{зо}t + 0,5k_3 t^2}{\ell_1} \right).$$

Далі задаємось кількістю точок від 5-10 та поділяємо на інтервали часу t для моделювання траєкторії повороту ділянки, рахуємо за формулами

(2.18) і для кожного значення t отримуємо значення координати траєкторії повороту x_i і y_i в системі координат x_1y_1 . Для кожного значення t також отримуємо значення повного курсового кута α та кута повороту модельного енергетичного засобу φ за формулами (2.9).

В результаті розрахунків отримуємо сім змодельованих складових розвороту з початковими значеннями, в процесі спряження яких утворюється весь грушоподібний розворот модельного енергетичного засобу.

Перший маневр петлевидний розворот з передніми керованими колесами.

Ділянка 1. Вхід в лівий поворот з використанням передньої вісі:
 $\alpha_0 = \alpha_{\Pi 0} = 2^\circ = 0,0349 \text{ рад}$; $\alpha_{30} = 0$; $t = 1,4 \text{ с}$; $\varphi_{1\kappa} = 0,353 \text{ рад} = 20,256^\circ$;
 $\alpha_\kappa = \alpha_{\Pi\kappa} = (0,7626 \cdot 1,365) / 2,81 = 0,3704 \text{ рад} = 21,23^\circ$; $\alpha_{3\kappa} = 0$; $\theta_1 = 0$; $k_3 = 0$;
 $k = k_{\Pi} = (0,3704 - 0,0349) / 1,4 = 0,22368 \text{ с}^{-1}$; коефіцієнти $m = 0,02556$;
 $n = 0,1756$.

Ділянка 2. Вихід з лівого повороту з використанням передньої вісі:
 $\alpha_0 = \alpha_{\Pi 0} = 0,37042 \text{ рад} = 21,234^\circ$ – початкове значення повного курсового кута дорівнює кінцевому значенню курсового кута попередньої ділянки, $\alpha_{30} = 0$;
 $t = 1,5 \text{ с}$; $\varphi_{2\kappa} = 0,346 \text{ рад} = 19,834^\circ$; $\alpha_\kappa = \alpha_{\Pi\kappa} = 0$; $\alpha_{3\kappa} = 0$;
 $k = k_{\Pi} = (0 - 0,37042) / 1,5 = -0,2469 \text{ с}^{-1}$; $k_3 = 0$; $\theta_2 = \varphi_{1\kappa} = 20,25^\circ$; коефіцієнти
 $m = 0,2737$; $n = -0,1809$.

Ділянка 3. Вхід в правий поворот з використанням передньої вісі:
 $\alpha_0 = \alpha_{\Pi 0} = 0$; $\alpha_{30} = 0$; $t = 1,5 \text{ с}$; $\varphi_{3\kappa} = -0,346 \text{ рад} = -19,834^\circ$; $k_3 = 0$;
 $\alpha_\kappa = \alpha_{\Pi\kappa} = -(0,7626 \cdot 1,365) / 2,81 = -0,3704 \text{ рад} = -21,2343^\circ$; $\alpha_{3\kappa} = 0$;
 $k = k_{\Pi} = (0,3704 - 0) / 1,5 = 0,2469 \text{ с}^{-1}$; коефіцієнти $m = 0$; $n = -0,1809$;
 $\theta_3 = \theta_2 + \varphi_2 = 20,25 + 19,834 = 40,09^\circ$. Для визначення радіусу колової траєкторії та вірного його розташування необхідно визначити координати

цента з перерахуванням їх до загальної системи спряження координат $x_y = 6,63 \text{ м}$; $y_y = 0,008 \text{ м}$.

Ділянка 4. Правий поворот (рух по колу) з використанням передньої вісі: $\alpha_k = \alpha_o = -0,3704 \text{ рад} = -21,234^\circ$ – дорівнює значенню курсового кута відповідному початку руху по колу; $k = 0$; $t = 7,8 \text{ с}$; $\varphi_{4k} = -206,28^\circ$; $\theta_4 = \theta_3 + \varphi_3 = 40,09 - 19,834 = 20,255^\circ$.

Ділянка 5. Вихід з правого повороту з використанням передньої вісі:;
 $\alpha_o = \alpha_{\Pi o} = -0,37042 \text{ рад} = -21,234^\circ$, $\alpha_{3o} = 0$; $t = 1,3 \text{ с}$;
 $\varphi_{5k} = -0,300 \text{ рад} = -17,19^\circ$; $\alpha_k = \alpha_{\Pi k} = 0$; $\alpha_{3k} = 0$;
 $k = k_{\Pi} = (0 - 0,37042) / 1,3 = 0,2849 \text{ с}^{-1}$; $k_3 = 0$; коефіцієнти $m = -0,2714$;
 $n = 0,2087$; $\theta_5 = \theta_4 + \varphi_4 = -206,28 + 20,25 = -186,021^\circ$.

Ділянка 6. Вхід в лівий поворот з використанням передньої вісі:
 $\alpha_o = \alpha_{\Pi o} = 0$; $\alpha_{3o} = 0$; $t = 0,6 \text{ с}$; $\varphi_{6k} = 0,138 \text{ рад} = 7,9337^\circ$; $\alpha_{3k} = 0$;
 $\alpha_k = \alpha_{\Pi k} = (0,7626 \cdot 1,365) / 2,81 = 0,3704 \text{ рад} = 21,23^\circ$; $k_3 = 0$;
 $k = k_{\Pi} = (0,3704 - 0) / 0,6 = 0,6174 \text{ с}^{-1}$; коефіцієнти $m = 0$; $n = 0,4523$,
 $\theta_6 = \theta_5 + \varphi_5 = -186,021 - 17,19 = -203,21^\circ$.

Ділянка 7. Вихід з лівого повороту з використанням передньої вісі:
 $\alpha_o = \alpha_{\Pi o} = 0,3704 \text{ рад} = 21,234^\circ$, $\alpha_{3o} = 0$; $t = 0,6 \text{ с}$; $\varphi_{7k} = 0,138 \text{ рад} = 7,9337^\circ$;
 $\alpha_k = \alpha_{\Pi k} = 0$, $\alpha_{3k} = 0$; $k = k_{\Pi} = (0 - 0,3704) / 0,6 = -0,6174 \text{ с}^{-1}$, $k_3 = 0$;
коефіцієнти $m = 0,2714$; $n = -0,4523$; $\theta_7 = \theta_6 + \varphi_6 = -203,21 + 7,93 = -195,27^\circ$.

Після моделювання всіх поворотів-ділянок в табличному процесорі Microsoft Excel отримаємо повний грушоподібний розворот модельного енергетичного засобу, побудований з використанням отриманих нами рівнянь математичної моделі для енергетичного засобу зі всіма керованими

колесами. В результаті моделювання визначаємо повну довжину розвороту S , м та повний час, витрачений на розворот t , с.

Другий маневр петлевидний розворот з передніми керованими колесами та всі керовані колеса по колу.

До 1, 2 ділянки (рис. 3.1) попереднього маневру моделюємо 4 маневри зі всіма керованими колесами.

Ділянка 3. Вхід в правий поворот з використанням передньої та задньої осей: Приймаємо початкове значення курсового кута передніх коліс: $\alpha_{\Pi 0} = -2^\circ = -0,0349 \text{ рад}$; задніх коліс: $\alpha_{30} = 2^\circ = 0,0349 \text{ рад}$; загальний початковий кут: $\alpha = \alpha_{\Pi 0} + \alpha_{30} = -2^\circ + 2^\circ = 0$. Час входу $t = 1,0$ с. Тоді коефіцієнт інтенсивності зміни α : $k_{\Pi} = (-0,3704 + 0,035)/1,0 = -0,3355 \text{ с}^{-1}$; задніх коліс: $k_3 = (0,39213 - 0,035)/1,0 = 0,3572 \text{ с}^{-1}$, Загальний коефіцієнт інтенсивності: $k = k_{\Pi} + k_3 = -0,3355 + 0,3572 = 0,0217 \text{ рад}$. Курсовий кут: $\alpha_{\Pi k} = -(0,7626 \cdot 1,365)/2,81 = -0,3704 \text{ рад} = -21,234^\circ$; $\alpha_{3k} = (0,7626 \cdot 1,445)/2,81 = 0,392 \text{ рад} = 22,48^\circ$. Загальний курсовий кут: $\alpha_k = \alpha_o + kt = 0 + 0,0217 \cdot 1,0 = 0,0217 \text{ рад} = 1,244^\circ$. Кут повороту рами модельного енергетичного засобу: $\varphi_{3k} = -0,504 \text{ рад} = -28,868^\circ$; коефіцієнти: $n = -0,4930$; $m = -0,0497$. Загальний кут повороту модельного енергетичного засобу відносно центральної вісі: $\theta_3 = \theta_2 + \varphi_2 = 20,25 + 19,834 = 40,09^\circ$.

Ділянка 4. Правий поворот (рух по колу) з використанням всіх осей: кут курсовий на початку ділянки $\alpha_{\Pi 0} = \alpha_{\Pi k \text{ попереділ}} = -0,3704 \text{ рад}$, $\alpha_{30} = \alpha_{3k} = 0,392 \text{ рад}$, $\alpha_k = \alpha_o = -0,0217 \text{ рад} = -1,244^\circ$ дорівнює початку руху по колу; $k = k_{\Pi} = k_3 = 0$; $t = 3,33$ с; $\varphi_{4k} = -176,13^\circ$. Коефіцієнти: $n = 0$; $m = -0,5427$. Загальний кут повороту $\theta_4 = \theta_3 + \varphi_3 = 40,09 - 28,868 = 11,22^\circ$.

Ділянка 5. Вихід з правого повороту з використанням всіх осей:

$$\alpha_{\Pi o} = \alpha_{\Pi k_{\text{порділ}}} = -0,3704 \text{ рад} = -21,234^\circ, \quad \alpha_{3o} = \alpha_{3k} = 0,392 \text{ рад} = 22,48^\circ,$$

$$\alpha_o = \alpha_{\Pi o} + \alpha_{3o} = -21,234^\circ + 22,48^\circ = 1,244^\circ = 0,0217 \text{ рад загальний початковий}$$

кут: $\alpha = \alpha_{\Pi o} + \alpha_{3o} = -2^\circ + 2^\circ = 0$. Час входу $t = 1,33 \text{ с}$. Тоді коефіцієнт

інтенсивності зміни α : $k_{\Pi} = (0 - (-0,3704)) / 1,33 = 0,2785 \text{ с}^{-1}$; задніх коліс:

$$k_3 = (0 - 0,39213) / 1,33 = -0,2948 \text{ с}^{-1}, \text{ Загальний коефіцієнт інтенсивності:}$$

$$k = k_{\Pi} + k_3 = 0,2785 + (-0,2948) = 0,01632 \text{ рад}. \quad \text{Курсовий кут:}$$

$$\alpha_k = \alpha_{\Pi k} = \alpha_{3k} = 0. \text{ Кут повороту рами модельного енергетичного засобу:}$$

$$\varphi_{5k} = -0,614 \text{ рад} = -35,197^\circ; \text{ коефіцієнти: } n = 0,4081; m = -0,5427. \text{ Загальний}$$

кут повороту модельного енергетичного засобу відносно центральної вісі:

$$\theta_5 = \theta_4 + \varphi_4 = 11,22 + (-176,13) = -164,906^\circ.$$

Ділянка 6. Вхід в лівий поворот з використанням передньої вісі:

$$\alpha_o = \alpha_{\Pi o} = 0; \quad \alpha_{3o} = 0; \quad t = 1,5 \text{ с}; \quad \varphi_{6k} = 0,338 \text{ рад} = 19,35^\circ; \quad \alpha_{3k} = 0;$$

$$\alpha_k = \alpha_{\Pi k} = (0,7626 - 1,365) / 2,81 = 0,3704 \text{ рад} = 21,23^\circ; \quad k_3 = 0;$$

$$k = k_{\Pi} = (0,3704 - 0) / 1,5 = 0,2469 \text{ с}^{-1}; \quad \text{коефіцієнти } m = 0; \quad n = 0,1809,$$

$$\theta_6 = \theta_5 + \varphi_5 = -164,91 - 36,17 = -200,08^\circ.$$

Ділянка 7. Вихід з лівого повороту з використанням передньої вісі:

$$\alpha_o = \alpha_{\Pi o} = 0,3704 \text{ рад} = 21,234^\circ, \alpha_{3o} = 0; \quad t = 1,0 \text{ с}; \quad \varphi_{7k} = 0,231 \text{ рад} = 13,22^\circ;$$

$$\alpha_k = \alpha_{\Pi k} = 0, \quad \alpha_{3k} = 0; \quad k = k_{\Pi} = (0 - 0,3704) / 1,0 = -0,3704 \text{ с}^{-1}, \quad k_3 = 0;$$

$$\theta_7 = \theta_6 + \varphi_6 = -200,08 + 19,35 = -180,244^\circ; \quad \text{коефіцієнти } m = 0,2714;$$

$$n = -0,2714.$$

Третій маневр – крабовий рух.

Крабовий маневр складається з лівих та правих поворотів та лінійного руху крабовим способом.

Лівий крабовий поворот (вхід в лівий поворот зі всіма повернутими колесами в кінці ділянки): ділянка 1 та ділянка 6 (рис. 2.11). Мінімальний радіус повороту навантажувача $R_{\min} = 5,0$ м. Максимальне значення кута повороту керованих коліс (в кінці входу в поворот):

$$\alpha_{1\max} = \alpha_{2\max} = \frac{L}{R_{\min}} = \frac{2,81}{5,0} = 0,562 \text{ рад} = 32,22^\circ. \quad \text{Приймаємо початкове}$$

значення повного кута (курсowego) α на початку входу в поворот: $\alpha_o = 0$.

Курсовий кут: $\alpha_k = \alpha_1 = \alpha_2$. Коефіцієнт інтенсивності зміни курсового кута

$$k = \frac{v}{R} = \frac{1,0}{5} = 0,2 \text{ с}^{-1}. \text{ Час руху задається. Згідно (2.16) розрахуємо координати}$$

ділянки.

Крабовий прямолінійний хід (ділянка 2 та ділянка 5, рис. 2.11). Максимальне значення кута повороту керованих коліс (в кінці входу в

$$\text{поворот): } \alpha_{1\max} = \alpha_{2\max} = \frac{L}{R_{\min}} = \frac{2,81}{5,0} = 0,562 \text{ рад} = 32,22^\circ. \quad \text{Приймаємо}$$

початкове значення курсового кута на початку ділянки: $\alpha_o = \alpha_{\text{кноп.діл.}}$. Час руху задається. Згідно (2.15) розрахуємо координати траєкторії.

Правий крабовий поворот (ділянка 3 та ділянка 4, рис. 2.11). Мінімальний радіус повороту навантажувача $R_{\min} = -5,0$ м. Максимальне значення кута повороту керованих коліс (в кінці входу в поворот):

$$\alpha_{1\max} = \alpha_{2\max} = \frac{L}{R_{\min}} = \frac{2,81}{-5,0} = -0,562 \text{ рад} = -32,22^\circ. \quad \text{Приймаємо початкове}$$

значення повного кута (курсowego) α на початку входу в поворот:

$\alpha_o = \alpha_{\text{кноп.діл.}}$ та в кінці ділянки $\alpha_k = 0$. Курсовий кут: $\alpha_k = \alpha_1 = \alpha_2$. Коефіцієнт

$$\text{інтенсивності зміни курсового кута } k = \frac{v}{R} = \frac{1,0}{-5} = -0,2 \text{ с}^{-1}. \text{ Час руху задається.}$$

Згідно (2.16) розрахуємо координати ділянки.

Після моделювання всіх поворотів-ділянок в табличному процесорі Microsoft Excel отримаємо повний грушоподібний розворот модельного

енергетичного засобу, побудований з використанням отриманих нами рівнянь математичної моделі для польового агрегату на базі енергетичного засобу зі всіма керованими колесами. В результаті моделювання визначаємо повну довжину розвороту S , м та повний час, витрачений на розворот t , с

Після отримання всіх семи змодельованих траєкторій ділянок-поворотів в лабораторних умовах за допомогою табличного процесора Microsoft Excel необхідно отримати експериментальну траєкторію заданого розвороту модельного енергетичного засобу з використанням глобальної супутникової навігаційної системи та провести статистичну обробку даних маневру.

3.2 Методика використання GPS навігації для отримання траєкторії петлеподібного розвороту модельного енергетичного засобу зі всіма керованими колесами в польових умовах

В якості енергетичного засобу, на прикладі якого будуть проведені досліді для відтворення змодельованих в лабораторних умовах теоретичних траєкторій, передбачено модельний енергетичний засіб MANITOU MLT-X 735-120 LSU зі всіма керованими колесами, технічні характеристики (рис 3.2, додаток А).

Для виконання запланованого етапу досліджень були використані відповідні методики наукового дослідження [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8], які передбачають кількість дослідів під час проведення експерименту.

На полі обираємо рівну горизонтальну ділянку достатніх розмірів, яка забезпечить відтворення траєкторії заданої петлі необхідної форми. Обрана ділянка повинна мати кут нахилу площини не більше 2° . На дану ділянку нанести координатні вісі з початком координат. Потім визначити довжину прямолінійної ділянки для забезпечення розгону та стабілізації сталої необхідної швидкості до кінця запланованого розвороту та точкою -

початком першої ділянки-повороту. Визначаємо розташування центра ваги модельного енергетичного засобу за розрахунковими формулами та технічними характеристиками.

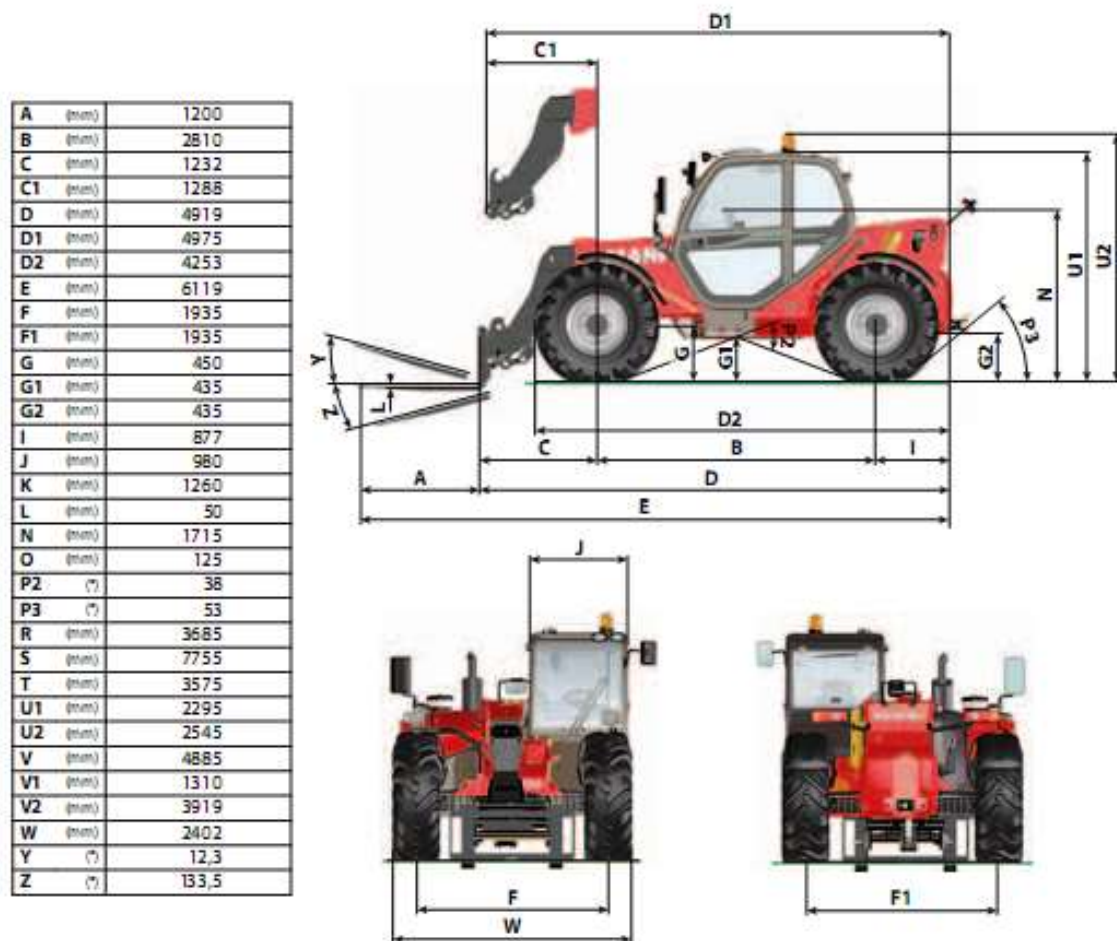


Рисунок 3.2 – Схема та габаритні розміри модельного енергетичного засобу
MANITOU MLT-X 735-120 LSU Serie 6-E3

Для нанесення координатних осей на дослідній ділянці встановлюється теодоліт Т30 [9] і на відстані від нього фішка, де запланована точка початку координат. За допомогою теодоліта під прямим кутом до осі Oy встановлюється ще одна фішка, яка визначає і ось Ox .

Перед дослідом розраховуємо початкові дані розвороту: швидкість v , час повороту входу і виходу t , кут повороту рами модельного енергетичного

засобу φ_k в кінці ділянки і коефіцієнт інтенсивності зміни повного курсового кута α .

Перед початком руху в салоні водія необхідно закріпити нерухомо прилад-планшет, який забезпечує GPS-навігацію, на місці розташування центра ваги модельного енергетичного засобу. Тракторист включає необхідну передачу та набирає задану швидкість на прямолінійній ділянці до кінця криволінійного руху. Під час маневру поворот керма обертається рівномірно з забезпеченням запланованої інтенсивності відповідно до заданого курсового кута і з необхідною швидкістю.

Встановлений додаток на планшет A-GPS Tracker, записує траєкторію (трек) петлеподібного розвороту та дані про розташування модельного енергетичного засобу від супутникових інтернет-сигналів: швидкість, час руху, проміжний час, довжина треку, широта та довгота кожної точки траєкторії. За допомогою секундоміру записувався час входу та виходу з повороту. Після закінчення проходження маневру збирається повна інформація по швидкості криволінійного руху, радіусу повороту, кутах повороту передніх і задніх коліс.

3.3 Методика проведення статистичної оцінки на відповідність координат змодельованих траєкторій маневрів модельного енергетичного засобу зі всіма керованими колесами до координат спряжених траєкторій, отриманих в польових умовах з використанням GPS навігації

Для статистичної обробки відповідності координат траєкторій використовуємо лінійний коефіцієнт кореляції та критерій узгодженості Пірсона.

Лінійний коефіцієнт кореляції Пірсона.

Одним із основних показників взаємозалежності двох випадкових величин є парний коефіцієнт кореляції. Його вперше розглянули Пірсон,

Еджворт і Велтон. Парний коефіцієнт кореляції характеризує тісноту і напрямок зв'язку між двома корелюючими ознаками у випадку наявності між ними лінійної залежності. Ці дві ознаки повинні вести себе як двовимірна нормальна випадкова величина [10].

Відзначимо властивості парного коефіцієнта кореляції [10].

1. Значення коефіцієнта кореляції належить відрізку $[-1; 1]$.

Якщо $\hat{r} > 0$ то зв'язок між ознаками x і y прямий (обидві зростають або обидві зменшуються одночасно); якщо ж $\hat{r} < 0$ то зв'язок обернений (якщо одна ознака зростає, то друга спадає і навпаки).

2. Якщо випадкові величини x і y статистично незалежні, то $\hat{r} = 0$.

3. Із того, що $|\hat{r}| = 1$, випливає лінійна незалежність випадкових величин.

4. Якщо $|\hat{r}| = 1$, то це означає, що між змінними x і y існує функціональний лінійний зв'язок і навпаки: якщо між x і y існує функціональна лінійна залежність, то $|\hat{r}| = 1$.

5. Коефіцієнт кореляції є симетричною функцією змінних x і y :

$$\hat{r}_{xy} = \hat{r}_{yx}.$$

Визначений співвідношенням (1) вибіркового коефіцієнта кореляції може бути розрахований для довільної двовимірної системи спостережень. Він є вимірником ступеня тісноти лінійного статистичного зв'язку між ознаками. Однак тільки у випадку спільного нормального розподілу випадкових величин коефіцієнт кореляції r має чітке значення як характеристика ступеня тісноти зв'язку між ними [10].

Крім того, коефіцієнт кореляції разом з середніми і дисперсіями випадкових величин складає ті п'ять параметрів, які дають вичерпні відомості про стохастичну залежність величин, тому що однозначно визначають їх двовимірний закон розподілу [10].

У всіх інших випадках (розподіли x і y відхиляються від нормального, одна з величин не є випадковою і т. д.) коефіцієнт кореляції можна використовувати лише як одну з можливих характеристик ступеня тісноти зв'язку. При цьому, не дивлячись на те, що в загальному випадку поки що не запропоновано характеристики лінійного зв'язку, яка мала б очевидні переваги в порівнянні з r , його інтерпретація досить часто є ненадійною. Якщо апріорі допускається можливість відхилення від лінійного вигляду залежності, то можна побудувати приклади, коли при $\hat{r} = 0$ існує чисто функціональна залежність між ознаками. Тому про величини, для яких $\hat{r} = 0$, кажуть, що вони некорельовані, і тільки після професійного аналізу можна сказати, чи є вони незалежними. І навпаки, з високого ступеня корельованості величин при великих відхиленнях їх розподілів від нормального ще не виходить їх досить тісна залежність [10].

Після оцінки лінійного коефіцієнта кореляції виникає питання: яку величину вибіркового коефіцієнта кореляції можна вважати достатньою для статистично обґрунтованого висновку про наявність кореляційного зв'язку між змінними? Надійність статистичних характеристик, в тому числі і $\hat{r}$, зменшується зі зменшенням об'єму відповідної вибірки, а тому можливі випадки, коли відхилення від нуля отриманої величини вибіркового коефіцієнта кореляції $\hat{r}$ є статистично незначущим, тобто цілком обумовленим випадковими коливаннями вибірки, за якою він розрахований. Відповісти на це питання допомагає знання закону імовірнісного розподілу $\hat{r}$. У випадку спільної нормальної розподіленості змінних і при достатньо великому об'ємові вибірки n розподіл $\hat{r}$ можна вважати наближено нормальним з середнім, що дорівнює своєму теоретичному значенню r . Однак необхідно враховувати, що при малих n і значеннях r , близьких до $1 \pm$, це наближення є досить грубим. Крім того, при малих n слід брати до уваги, що величина $\hat{r}$ є зміщеною оцінкою свого теоретичного значення r . [10].

Щільність стохастичного лінійного зв'язку між випадковими величинами x і y характеризується коефіцієнтом кореляції.

Властивості коефіцієнта кореляції [11]:

- модуль $|r| \leq 1$;
- якщо $r = 0$, то x і y – незалежні випадкові величини;
- якщо $|r| = 1$, то між x і y відбувається функціональний зв'язок;
- якщо $0 < |r| < 1$ то між x і y відбувається стохастичний зв'язок.

Для статистичного визначення коефіцієнта кореляції між x і y у проводять ряди незалежних випробувань, результатом кожного з яких є пара величин (x_i, y_i) – реалізації відповідно x і y . На кореляційному полі, тобто на координатній площині у вигляді точок, координатами яких є значення величин x_i і y_i , будується діаграма розсіювання, за аналізом якої будується припущення відносно виду залежності (лінійна чи нелінійна) між x і y . У випадку припущення про лінійність розраховують статистичну оцінку коефіцієнта кореляції [11]:

$$\hat{r} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (3.1)$$

$$\text{де } \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i.$$

За малого обсягу вибірки n оцінка $\hat{r}$ є зміщеною відносно генерального параметру r . Для усунення цього недоліку на малих вибірках використовують відкориговану оцінку:

$$\hat{r}^* = \hat{r} \left[1 + \frac{1 - r^2}{2(n - 3)} \right]. \quad (3.2)$$

Значення оцінок коефіцієнта кореляції є відмінним від нуля. Тому виникає задача перевірки значущості коефіцієнта кореляції. Гіпотеза H_o про випадковість відхилень від нуля вибіркового коефіцієнта кореляції у випадку генеральної сукупності з параметром $r = 0$, перевіряється за t-розподілом з $(n-2)$ степенями вільності та заданим рівнем значущості α .

$$\hat{t} = \frac{\hat{r}\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-\hat{r}^2}}. \quad (3.3)$$

Якщо $|\hat{t}| \geq t_{n-2, \alpha}$, - гіпотеза $H_o: r = 0$ не приймається і коефіцієнт кореляції визначається значущим [11].

Значення коефіцієнта кореляції може змінюватися від -1 до $+1$. Значення -1 та $+1$ відповідають чіткій лінійній функціональній залежності, яка в першому випадку є спадною, а у другому – зростаючою. Для функціональної залежності $y = \text{const}$ коефіцієнт кореляції, як видно з наведеної формули, є невизначеним, оскільки в цьому випадку знаменник дорівнює нулю. Що ближчим є значення коефіцієнта кореляції до -1 або $+1$, то більш обґрунтованим є припущення про наявність лінійного зв'язку. Наближення його значення до нуля свідчить про відсутність лінійного зв'язку, але не є доказом відсутності статистичного зв'язку взагалі [12].

Критерій узгодженості Пірсона (χ^2).

Критерій узгодження Пірсона (критерій хі-квадрат) – це статистичний непараметричний критерій, що має розподіл χ^2 і використовується для перевірки нульової гіпотези H_o про підпорядкованість емпіричного закону розподілу вибірки теоретично передбачуваному закону розподілу генеральної сукупності $F(x)$ при великих обсягах вибірки. Цей критерій пов'язаний з розрахунком теоретичної частоти, є універсальним і одним із найбільш потужних, оскільки застосовується для довільних теоретичних

функцій $F(x)$, включаючи навіть ті, що мають невідомі значення параметрів [13].

За допомогою розподілу χ^2 перевіряються гіпотези щодо значень дисперсій, перевіряється узгодження експериментальних даних з теоретичними законами розподілу. Також він широко застосовується в непараметричній статистиці, будучи граничним для багатьох вибірових статистик. Розподіл χ^2 відіграє важливу роль при оцінці дисперсії нормальної вибірки, а також при перевірці залежностей в таблицях спряженості і критеріях згоди [14].

Випадкова величина X , що має розподіл χ^2 , визначається як сума квадратів n незалежних стандартних нормальних величин вибірки, математичне сподівання кожної з яких дорівнює нулю, а сума квадратів величин – одиниці. Тоді сума квадратів цих величин $\chi^2 = \sum_{i=1}^n X_i^2$ і розподілена за законом χ^2 з $\nu = n$ ступенями вільності; якщо ж ці величини зв'язані одним лінійним співвідношенням, наприклад $X_i = nM(x)$, то число ступенів вільності дорівнює $\nu = n - 1$ [14].

У окремому випадку, коли $\nu = 1$ випадкова величина χ^2 -квадрат дорівнює квадрату стандартної нормальної величини. Отже, цей розподіл має тільки один параметр – число ступенів вільності ν і не залежить від інших параметрів, та цілі позитивні числа. Розподіл χ^2 повністю визначається лише числом ступенів вільності і не залежить від інших параметрів. Для малого числа ступенів вільності ν , при $\nu = 1$ і $\nu = 2$ функція монотонна, а при $\nu > 2$ — унімодальна (має одну моду) і несиметрична. Розподіл є асимптотично нормальним, тобто зі збільшенням ν асиметрія зменшується – зменшується і зміщується вправо пік щільності розподілу і він начебто розпливається по додатній напівосі і повільно наближається до нормального, яким стає при $\nu \rightarrow \infty$ [14].

Методика визначення критерію узгодженості Пірсона.

1. Формування нульової гіпотези: H_0 . Для перевірки правильності гіпотези використовуємо критерій узгодженості Пірсона, який ґрунтується на визначенні відхилення емпіричних характеристик від гіпотетичних характеристик.

$$K = \chi_{emn}^2 = \sum_{i=1}^m \frac{(n_i - \bar{n}_i)^2}{\bar{n}_i} = n \sum_{i=1}^m \frac{(w_i - p_i)^2}{p_i}, \quad (3.4)$$

де n_i – емпіричні частоти; $\bar{n}_i$ – теоретичні частоти.

2. Визначаємо обсяг вибірки.

3. Статистичні дані (результати вибірки) записують у вигляді інтервального розподілу статистичних імовірностей.

4. Обчислюємо теоретичні та емпіричні ймовірності потрапляння p_{ie} , p_{it} випадкової величини Y в інтервал за формулою:

$$p_{ie} = \frac{S_{ie}}{\sum_{i=1}^m S_{ie}}, \quad p_{it} = \frac{S_{it}}{\sum_{i=1}^m S_{it}}, \quad (3.5)$$

де S_{ie} , S_{it} – міра множини точок інтервального розподілу, які займають поверхню всієї вибірки.

5. Обчислюємо теоретичні $\bar{n}_i$ та емпіричні частоти n_i об'єму вибірки:

$$\bar{n}_i = np_{it}, \quad (3.6)$$

$$n_i = np_{ie}. \quad (3.7)$$

6. Обчислюємо емпіричне значення критерію узгодження Пірсона за формулою 3.4 та результат обчислень зводимо до таблиці.

7. За даним рівнем значущості α і кількістю ступенів вільності знаходимо критичну точку $k_{kp} = \chi_{kp}^2(\alpha, r)$ за таблицею критичних значень розподілу χ^2 .

8. Висновок про узгодженість емпіричного розподілу з нормальним законом розподілу випадкової величини, зіставляють значення $\chi_{емп}^2$ і $\chi_{кр}^2$:

- якщо $\chi_{емп}^2 = 0$, то емпіричний розподіл відповідає нормальному розподілу;

- якщо $\chi_{емп}^2 \leq \chi_{кр}^2$, то гіпотеза про нормальність розподілу не відхиляється, тобто емпіричні і теоретичні частоти різняться незначуще;

- якщо $\chi_{емп}^2 > \chi_{кр}^2$, то гіпотеза про нормальність розподілу відхиляється, тобто емпіричні і теоретичні частоти різняться значуще.

9. Перевірка нульової гіпотези.

Відомо два способи перевірки гіпотези про середнє значення генеральної сукупності у випадку відомого стандартного відхилення генеральної сукупності [15]:

1) з використанням методу побудови області відхилення;

2) з використанням р-значення (метод p-value approach).

Р-значення є найменшим значенням рівня значущості, при якому нульова гіпотеза може бути відхилена для даної вибірки, або найменший рівень значущості, на якому нульова гіпотеза може бути помилково відхилена на користь альтернативної [15]. Оскільки р-значення є ймовірністю, це значення буде між 0 і 1:

$$P(|D| > |d|), \quad (3.8)$$

де D – є випадковою величиною, яка йде за певним розподілом;

d – значення статистичної проби.

Статистичну оцінку координат траєкторій трьох маневрів модельного енергетичного засобу провести за лінійним коефіцієнтом кореляції та критерієм Пірсона та провести перевірку нульової гіпотези за допомогою методу дослідження p-value.

3.4 Висновки до розділу 3

Відповідно до математичної моделі криволінійного руху, основними параметрами, які формують траєкторію маневрів польових агрегатів є швидкість руху, коефіцієнт зміни кута курсового, мінімальний радіус повороту та відстані від центру ваги до осей передньої та задньої підвісок.

Розроблені методи моделювання трьох маневрів модельного енергетичного засобу зі всіма керованими колесами з використання супутникової навігації за допомогою табличного процесора Microsoft Excel.

Для кожної траєкторії маневру центра ваги модельного енергетичного засобу були визначені вихідні параметри для кожної ділянки.

Перший маневр з передніми керованими колесами, вихідні параметри та характеристики для кожної з 7 ділянок:

- ділянка 1. Вхід в лівий поворот з використанням передньої вісі:
 $\alpha_o = \alpha_{Io} = 2^\circ = 0,0349 \text{ рад}$; $\alpha_{3o} = 0$; $t = 1,4 \text{ с}$; $\varphi_{1к} = 0,353 \text{ рад} = 20,256^\circ$;
 $\alpha_k = \alpha_{Ik} = 0,3704 \text{ рад} = 21,23^\circ$; $\alpha_{3к} = 0$; $\theta_1 = 0$; $k_3 = 0$; $k = k_{II} = 0,22368 \text{ с}^{-1}$;
 $m = 0,02556$; $n = 0,1756$;

- ділянка 2. Вихід з лівого повороту: $\alpha_o = \alpha_{Io} = 0,37042 \text{ рад} = 21,234^\circ$,
 $\alpha_{3o} = 0$; $t = 1,5 \text{ с}$; $\varphi_{2к} = 0,346 \text{ рад} = 19,834^\circ$; $\alpha_k = \alpha_{Ik} = 0$; $\alpha_{3к} = 0$;
 $k = k_{II} = -0,2469 \text{ с}^{-1}$; $k_3 = 0$; $\theta_2 = \varphi_{1к} = 20,25^\circ$; $m = 0,2737$; $n = -0,1809$;

- ділянка 3. Вхід в правий поворот: $\alpha_o = \alpha_{Io} = 0$; $\alpha_{3o} = 0$; $t = 1,5 \text{ с}$;
 $\varphi_{3к} = -0,346 \text{ рад} = -19,834^\circ$; $k_3 = 0$; $\alpha_k = \alpha_{Ik} = -0,3704 \text{ рад} = -21,2343^\circ$;
 $\alpha_{3к} = 0$; $k = k_{II} = 0,2469 \text{ с}^{-1}$; $m = 0$; $n = -0,1809$;

- ділянка 4. Правий поворот (рух по колу):
 $\alpha_k = \alpha_o = -0,3704 \text{ рад} = -21,234^\circ$; $k = 0$; $t = 7,8 \text{ с}$; $\varphi_{4к} = -206,28^\circ$;

- ділянка 5. Вихід з правого повороту:
 $\alpha_o = \alpha_{Io} = -0,37042 \text{ рад} = -21,234^\circ$, $\alpha_{3o} = 0$; $t = 1,3 \text{ с}$;

$\varphi_{5\kappa} = -0,300 \text{ рад} = -17,19^\circ$; $\alpha_\kappa = \alpha_{\Pi\kappa} = 0$; $\alpha_{3\kappa} = 0$; $k = k_{\Pi} = 0,2849 \text{ с}^{-1}$; $k_3 = 0$;
 $m = -0,2714$; $n = 0,2087$;

- ділянка 6. Вхід в лівий поворот: $\alpha_o = \alpha_{\Pi o} = 0$; $\alpha_{3o} = 0$; $t = 0,6 \text{ с}$;
 $\varphi_{6\kappa} = 0,138 \text{ рад} = 7,9337^\circ$; $\alpha_{3\kappa} = 0$; $\alpha_\kappa = \alpha_{\Pi\kappa} = 0,3704 \text{ рад} = 21,23^\circ$; $k_3 = 0$;
 $k = k_{\Pi} = 0,6174 \text{ с}^{-1}$; $m = 0$; $n = 0,4523$;

- ділянка 7. Вихід з лівого повороту:
 $\alpha_o = \alpha_{\Pi o} = 0,3704 \text{ рад} = 21,234^\circ$, $\alpha_{3o} = 0$; $t = 0,6 \text{ с}$; $\varphi_{7\kappa} = 0,138 \text{ рад} = 7,9337^\circ$;
 $\alpha_\kappa = \alpha_{\Pi\kappa} = 0$, $\alpha_{3\kappa} = 0$; $k = k_{\Pi} = -0,6174 \text{ с}^{-1}$, $k_3 = 0$; $m = 0,2714$; $n = -0,4523$.

Другий маневр — петлевидний розворот з передніми керованими колесами та рух по колу зі всіма керованими колесами.

Вихідні параметри та характеристики для кожної з 7 ділянок:

- 1, 2 ділянка вихідні параметри попереднього маневру;

- ділянка 3. Вхід в правий поворот $\alpha_{\Pi o} = -2^\circ = -0,0349 \text{ рад}$; задніх коліс: $\alpha_{3o} = 2^\circ = 0,0349 \text{ рад}$; $\alpha = 0$. Час входу $t = 1,0 \text{ с}$. α : $k_{\Pi} = -0,3355 \text{ с}^{-1}$;
 $k_3 = 0,3572 \text{ с}^{-1}$, $k = 0,0217 \text{ рад}$; $\alpha_{\Pi\kappa} = -0,3704 \text{ рад} = -21,234^\circ$;
 $\alpha_{3\kappa} = 0,392 \text{ рад} = 22,48^\circ$, $m = -0,0497$, $\alpha_\kappa = 0,0217 \text{ рад} = 1,244^\circ$,
 $\varphi_{3\kappa} = -0,504 \text{ рад} = -28,868^\circ$, $n = -0,4930$;

- ділянка 4. Правий поворот (рух по колу) з використанням всіх осей:
 $\alpha_{\Pi o} = \alpha_{\Pi\kappa \text{порділ}} = -0,3704 \text{ рад}$, $\alpha_{3o} = \alpha_{3\kappa} = 0,392 \text{ рад}$,
 $\alpha_\kappa = \alpha_o = -0,0217 \text{ рад} = -1,244^\circ$, $k = k_{\Pi} = k_3 = 0$; $t = 3,33 \text{ с}$; $\varphi_{4\kappa} = -176,13^\circ$.
 $n = 0$; $m = -0,5427$;

- ділянка 5. Вихід з правого повороту з використанням всіх осей:
 $\alpha_{\Pi o} = \alpha_{\Pi\kappa \text{порділ}} = -0,3704 \text{ рад} = -21,234^\circ$, $\alpha_{3o} = \alpha_{3\kappa} = 0,392 \text{ рад} = 22,48^\circ$,
 $\alpha_o = 1,244^\circ = 0,0217 \text{ рад}$, $\alpha = 0$, $t = 1,33 \text{ с}$, $k_{\Pi} = 0,2785 \text{ с}^{-1}$; $k_3 = -0,2948 \text{ с}^{-1}$,

$$k = 0,01632 \text{ рад}, \quad \alpha_k = \alpha_{\Pi k} = \alpha_{3k} = 0, \quad n = 0,4081; \quad m = -0,5427, \\ \varphi_{5k} = -0,614 \text{ рад} = -35,197^\circ;$$

- ділянка 6. Вхід в лівий поворот з використанням передньої вісі:

$$\alpha_o = \alpha_{\Pi o} = 0; \quad \alpha_{3o} = 0; \quad t = 1,5 \text{ с}; \quad \varphi_{6k} = 0,338 \text{ рад} = 19,35^\circ; \quad \alpha_{3k} = 0; \\ \alpha_k = \alpha_{\Pi k} = 0,3704 \text{ рад} = 21,23^\circ; \quad k_3 = 0; \quad k = k_{\Pi} = 0,2469 \text{ с}^{-1}; \quad m = 0; \quad n = 0,1809;$$

- ділянка 7. Вихід з лівого повороту з використанням передньої вісі:

$$\alpha_o = \alpha_{\Pi o} = 0,3704 \text{ рад} = 21,234^\circ, \alpha_{3o} = 0; \quad t = 1,0 \text{ с}; \quad \varphi_{7k} = 0,231 \text{ рад} = 13,22^\circ; \\ \alpha_k = \alpha_{\Pi k} = 0, \alpha_{3k} = 0; \quad k = k_{\Pi} = -0,3704 \text{ с}^{-1}, \quad k_3 = 0; \quad m = 0,2714; \quad n = -0,2714.$$

Третій маневр – крабовий рух. Крабовий маневр складається з 6 ділянок з лівих та правих поворотів та лінійного руху крабовим способом.

Вихідні параметри та характеристики для кожної з 6 ділянок:

- лівий крабовий поворот (ділянка 1 та ділянка 6) $R_{\min} = 5,0 \text{ м}$,

$\alpha_{1\max} = \alpha_{2\max} = 0,562 \text{ рад} = 32,22^\circ$, $\alpha_o = 0$, $\alpha_k = \alpha_1 = \alpha_2$. $k = 0,2 \text{ с}^{-1}$, час руху задається;

- крабовий прямолінійний хід (ділянка 2 та ділянка 5):

$\alpha_{1\max} = \alpha_{2\max} = 0,562 \text{ рад} = 32,22^\circ$, $\alpha_o = \alpha_{\text{кноп.діл.}}$, час руху задається;

- правий крабовий поворот (ділянка 3 та ділянка 4): $R_{\min} = -5,0 \text{ м}$,

$\alpha_{1\max} = \alpha_{2\max} = -0,562 \text{ рад} = -32,22^\circ$, $\alpha_o = \alpha_{\text{кноп.діл.}}$, $\alpha_k = 0$, $\alpha_k = \alpha_1 = \alpha_2$. $k = -0,2 \text{ с}^{-1}$.

Запропонована методика передбачає статистичну обробку даних за допомогою коефіцієнту варіації Пірсона, критерію узгодженості Пірсона та значення p-value.

Розроблені методика і програма досліджень дає можливість дослідити на відповідність координат змодельованих маневрів для енергетичного засобу зі всіма керованими колесами на прикладі модельного енергетичного засобу та провести статистичну оцінку рівня значущості нульової гіпотези за

допомогою коефіцієнта кореляції Пірсона, значення критерію узгодженості Пірсона та рівня значущості p -value, які необхідно виконати та дослідити.

Список використаних джерел до розділу 3

1. Важинський С.Е., Щербак Т.І. Методика та організація наукових досліджень: Навч. посіб. / С. Е. Важинський, Т.І. Щербак. – Суми: СумДПУ імені А. С. Макаренка, 2016. – 260 с.
2. Гуторов О.І. Методологія та організація наукових досліджень: навч. посібник / О.І. Гуторов; Харк. нац. аграр. ун-т ім. В.В. Докучаєва – Х.: ХНАУ, 2017. – 272 с.
3. Краус Н.М. Методологія та організація наукових досліджень: навчально - методичний посібник. – Полтава: Оріяна, 2012. – 183 с.
4. Мєлков Ю.О. Методичні рекомендації щодо забезпечення самостійної роботи студентів з дисципліни «Методика та організація наукових досліджень». – К.: МАУП, 2016. – 31 с.
5. Зацерковний В.І. Методологія наукових досліджень: навч. посіб. / В. І. Зацерковний, І. В. Тішаєв, В. К. Демидов. – Ніжин: НДУ ім. М. Гоголя, 2017 – 236 с.
6. Основи методології та організації наукових досліджень: Навч. посіб. для студентів, курсантів, аспірантів і ад'юнтів / за ред. А. Є. Конверського. - К.: Центр учбової літератури, 2010. - 352 с.
7. Юринець В.Є. Методологія наукових досліджень: навч. посібник / В. Є. Юринець. – Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2011. – 178 с.
8. Теоретичні засади науково-дослідницької діяльності суб'єктів освітнього процесу університетів: практичний посібник / Авторський колектив: В. Майборода, О. Ярошенко, Я. Скиба; за ред. О. Ярошенко. – Київ: Інститут вищої освіти НАПН України, 2015. – 174 с.

9. Геодезичні прилади. Методичні вказівки до проведення лабораторних робіт для бакалаврів спеціальності 193 «Геодезія та землеустрій» /Укл. Крячок С.Д., Мамонтова Л.С. – Чернігів: ННІТ ЧНТУ, 2017 - 41 с.

10. Яровий А.Т., Страхов Є.М.. Багатовимірний статистичний аналіз: начальнo-методичний посібник для студентів математичних та економічних фахів. – Одеса: Астропринт, 2015. – 132 с.

11. Статистичний аналіз даних вимірювань: навч. посіб. / Єременко В.С., Куц Ю.В., Мокийчук В.М., Самойліченко О.В. – К.: НАУ, 2013.– 320 с.

12. Пашко А.О. (2019). Статистичний аналіз даних: Електронне видання, КНУ ім. Т.Г. Шевченка, 55. URL: https://csc.knu.ua/media/filer_public/19/d5/19d56780-269a-4eef-bb3b-48ec8da23859/intelektualnaobrobkadanikh.pdf (дата звернення 27.09.2025).

13. Моцний Ф.В. Аналіз непараметричних і параметричних критеріїв перевірки статистичних гіпотез. Частина I. Критерії узгодження Пірсона і Колмогорова / Ф. В. Моцний // Статистика України. - 2018. - № 4. - С. 14-24. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/su_2018_4_4

14. Статистична обробка і оформлення результатів експериментальних досліджень (із досвіду написання дисертаційних робіт): Навчальний посібник / О.В. Кисельов, І.Б. Комарова, Д.О. Мілько, Р.О. Бакарджієв, за заг. ред. Д. О. Мілька; Інститут механізації тваринництва НААН. – Електронний аналог друкованого видання (електронна книга). – Запоріжжя: СТАТУС, 2017. – 1181 с., 482 табл., 379 іл., додатк. 9 (147 табл., 9 іл.) <http://elar.tsatu.edu.ua/bitstream/123456789/4382/1/%d0%9c%d1%96%d0%bb%d1%8c%d0%ba%d0%be%20%d0%bf%d0%be%d1%81%d1%96%d0%b1%d0%bd%d0%b8%d0%ba.pdf> .

15. Зінкевич Т.О. Застосування величини Р–значення P–value при перевірці статистичних гіпотез / Т.О. Зінкевич, В.П. Лісовська, В.Д. Стасюк. // Журнал Ринок цінних паперів України. – 2012. – С. 89–94.

16. Сіренко Ю.В. Дослідження та обґрунтування ефективних прийомів використання польових агрегатів : дис. ... д-ра філософії у галузі 20 Аграр. науки та продовольство: 133 Галузеве машинобудування / Сумський національний аграрний університет. Суми, 2021. 198 с. URL: https://drive.google.com/file/d/1iwvQ81FZafecKG8BSI6WlaCKWx-1p_8j/view (дата звернення: 12.01.2025).

РОЗДІЛ 4

ПЕРЕВІРКА АДЕКВАТНОСТІ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ КРИВОЛІНІЙНОГО РУХУ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ЗАСОБУ ЗІ ВСІМА КЕРОВАНИМИ КОЛЕСАМИ

Метою експерименту є перевірка адекватності отриманих математичних рівнянь нелінійного руху колісного трактора зі всіма керованими колесами: моделювання маневрів різних видів модельного енергетичного засобу в лабораторних умовах за заданими вхідними параметрами; порівняння відтвореної та змодельованих траєкторій розвороту з визначенням кінематичних параметрів та статистичною оцінкою отриманих даних; визначення раціонального виду маневру для збільшення продуктивності польового агрегату за рахунок визначення мінімального часу розвороту та ширини поворотної смуги на прикладі модельного енергетичного засобу зі всіма керованими колесами.

4.1 Петлевидний розворот модельного енергетичного засобу - маневр 1

Маневр 1. Петлевидний розворот модельного енергетичного засобу зі всіма керованими колесами по колу та з використанням тільки передніх коліс для ділянок входу і виходу з лівого і правого поворотів в лабораторних умовах

4.1.1 Ділянки-повороти розвороту маневру 1

Приймемо загальні для всіх ділянок вихідні дані: $v = 1,7 \text{ м/с}$;
 $\ell = 1,365 \text{ м}$; $R_{\min} = 3,685 \text{ м}$; шлях $S = vt$.

Вхід та вихід з лівого повороту.

Виходячи з мінімального радіуса повороту, знаходимо максимальне кінцеве значення повороту керованих коліс (в кінці входу в поворот)

$$\alpha_{II} = \alpha_{1K} = L / R_{\min} = 2,81 / 3,685 = 0,7626 \text{ рад} = 43,69^\circ.$$

Значення курсового кута тоді буде: $\alpha_K = \alpha_{IK} = \frac{\alpha_{1K} \ell_2}{L} = \frac{0,7626 \cdot 1,365}{2,81} = 0,3704 \text{ рад} = 21,22^\circ.$

Приймаємо початкове значення повного курсового кута на початку входу в поворот: $\alpha_{IIo} = 2^\circ = 0,0349 \text{ рад}$, $\alpha_{3o} = 0$ і час входу в поворот $t = 1,4 \text{ с}$. Тоді

коефіцієнт інтенсивності зміни повного кута α :

$$k = k_{II} = \alpha_K - \alpha_o / t = 0,3704 - 0,0349 / 1,4 = 0,2397 \text{ с}^{-1}, k_3 = 0 \text{ і максимальний}$$

кут повороту рами навантажувача

$$\varphi_1 = \nu \left(\frac{\alpha_{IIo} t + 0,5 k_n t^2}{\ell_2} - \frac{\alpha_{3o} t + 0,5 k_3 t^2}{\ell_1} \right) = 1,7 \left(\frac{0,0349 \cdot 1,4 + 0,5 \cdot 0,2237 \cdot 1,4^2}{1,365} - 0 \right) = 0,353 \text{ рад} = 20,256^\circ.$$

Далі визначаємося з кількістю точок для відтворення кривизни повороту та розбиваємо час на інтервали і розраховуємо за формулами (2.9).

Для кожного точки t отримуємо власні координати x_i і y_i зі значенням для кожної точки α і φ за формулами (2.18), а також перераховані до загальної системи координат xu з координатами x і y за формулами 2.20 [9, (2.35)].

Коефіцієнти:

$$m = \frac{\alpha_{IIo}}{\ell_2} - \frac{\alpha_{3o}}{\ell_1} = \frac{0,0349}{1,365} - 0 = 0,02557 \text{ м}^{-1},$$

$$n = \frac{k_n}{\ell_2} - \frac{k_3}{\ell_1} = \frac{0,2397}{1,365} = 0,1756 \text{ м}^{-1} \text{ с}^{-1}.$$

Кут повороту осей $x_1 y_1$ відносно осей xu $\theta_1 = 0$, так як вони паралельні. Розрахунки ділянки-повороту зведені до таблиці 4.1, а вхід в лівий поворот – на рисунку 4.2.

Таблиця 4.1 – Вхід в лівий поворот

№ з/п	t, c	x_i, m	y_i, m	$\alpha_K,$ $\frac{рад}{град}$	$\varphi,$ $\frac{рад}{град}$	R, m	S, m	x, m	y, m
1	0	0	0	0,035	0	∞	0	0	1,0
				2	0				
2	0,18	0,3	0,02	0,077	0,012	17,77	0,3	0,3	1,02
				4,40	0,698				
3	0,35	0,59	0,05	0,119	0,033	11,49	0,6	0,59	1,05
				6,81	1,920				
4	0,53	0,88	0,11	0,161	0,064	8,49	0,9	0,88	1,11
				9,21	3,666				
5	0,70	1,17	0,19	0,203	0,104	6,74	1,19	1,17	1,19
				11,62	5,936				
6	0,88	1,45	0,29	0,245	0,152	5,58	1,49	1,45	1,29
				14,02	8,730				
7	1,05	1,72	0,43	0,287	0,210	4,76	1,79	1,72	1,43
				16,43	12,048				
8	1,23	1,97	0,59	0,328	0,277	4,16	2,08	1,97	1,59
				18,83	15,890				
9	1,4	2,2	0,79	0,370	0,353	3,69	2,38	2,2	1,79
				21,23	20,256				

Максимальне кінцеве значення повороту керованих коліс (в кінці входу в поворот) $\alpha_{II} = \alpha_{IK} = 0$. Значення курсового кута: на початку $\alpha_{IIo} = 0,3704 \text{ рад} = 21,23^\circ$ та в кінці $\alpha_K = \alpha_{IK} = 0$. Час виходу з повороту $t = 1,5 \text{ с}$. Коефіцієнт інтенсивності зміни повного кута α : $k = k_{II} = \alpha_K - \alpha_o / t = 0 - 0,3704 / 1,5 = 0,2469 \text{ с}^{-1}$, $k_3 = 0$ і максимальний кут повороту рами навантажувача

$$\varphi_2 = 1,7 \left(\frac{0,3704 \cdot 1,5 + 0,5 \cdot (-0,2469) \cdot 1,5^2}{1,365} - 0 \right) = 0,346 \text{ рад} = 19,834^\circ.$$

Коефіцієнти: $m = \frac{0,3704}{1,365} - 0 = 0,27137 \text{ м}^{-1}$, $n = -\frac{0,2469}{1,365} = -0,1809 \text{ м}^{-1} \text{ с}^{-1}$. Осі

$x_2 y_2$ повернуті на кут $\theta_2 = \varphi_{\kappa 1} = 20,25^\circ$. Розрахунки ділянки-повороту зведені до таблиці 4.2, схема траєкторії – на рисунку 4.2.

Таблиця 4.2 – Вихід з лівого повороту

№ з/П	t, c	x_i, m	y_i, m	$\alpha_{\kappa},$ $\frac{рад}{град}$	$\varphi,$ $\frac{рад}{град}$	R, m	S, m	x, m	y, m
1	0	0	0	0,370	0	3,69	0	2,20	1,79
				21,23	0				
2	0,19	0,3	0,12	0,324	0,081	4,21	0,32	2,44	2,0
				18,58	4,65				
3	0,38	0,59	0,26	0,278	0,151	4,91	0,64	2,66	2,23
				15,93	8,68				
4	0,56	0,87	0,40	0,232	0,211	5,90	0,96	2,88	2,46
				13,27	12,09				
5	0,75	1,16	0,54	0,185	0,259	7,37	1,28	3,11	2,69
				10,62	14,88				
6	0,94	1,45	0,68	0,139	0,297	9,83	1,59	3,33	2,92
				7,96	17,05				
7	1,13	1,74	0,81	0,093	0,324	14,74	1,91	3,55	3,15
				5,31	18,59				
8	1,31	2,03	0,94	0,046	0,341	29,48	2,23	3,78	3,37
				2,65	19,52				
9	1,5	2,33	1,06	0	0,346	∞	2,55	4,02	3,59
				0	19,83				

Вхід в правий поворот.

Максимальне кінцеве значення повороту керованих коліс (в кінці входу в поворот) $\alpha_{\Pi} = \alpha_{1K} = L / R_{\min} = -2,81 / 3,685 = -0,7626 \text{ рад} = -43,713^\circ$.

Значення курсового кута тоді буде:

$$\alpha_K = \alpha_{\Pi K} = \frac{\alpha_{1K} \ell_2}{L} = \frac{-0,7626 \cdot 1,365}{2,81} = -0,3704 \text{ рад} = -21,22^\circ. \quad \text{Приймаємо}$$

початкове значення повного курсового кута на початку входу в поворот:

$\alpha_{\Pi 0} = 0, \alpha_{30} = 0$ і час входу в поворот $t = 1,5 \text{ с}$. Тоді коефіцієнт

інтенсивності зміни повного кута α :

$k = k_{\Pi} = \alpha_K - \alpha_o / t = -0,3704 - 0 / 1,5 = -0,2469 \text{ с}^{-1}, k_3 = 0$ і максимальний кут

повороту рами навантажувача

$$\varphi_3 = 1,7 \left(\frac{0 \cdot 1,5 + 0,5 \cdot (-0,2469) \cdot 1,5^2}{1,365} - 0 \right) = -0,346 \text{ рад} = -19,834^\circ. \text{ Коефіцієнти:}$$

$$m = \frac{0}{1,365} - 0 = 0, \quad n = -\frac{0,2469}{1,365} = -0,1809 \text{ м}^{-1}\text{с}^{-1}. \text{ Кут повороту осей}$$

$\theta_3 = \theta_2 + \varphi_2 = 20,25 + 19,834 = 40,09^\circ$. Розрахунки ділянки-повороту зведені до таблиці 4.3, а вхід в лівий поворот – на рисунку 4.2.

Таблиця 4.3 – Вхід в правий поворот

№ з/п	$t, \text{с}$	$x_i, \text{м}$	$y_i, \text{м}$	$\alpha_k, \frac{\text{рад}}{\text{град}}$	$\varphi, \frac{\text{рад}}{\text{град}}$	$R, \text{м}$	$S, \text{м}$	$x, \text{м}$	$y, \text{м}$
1	0	0	0	0	0	∞	0	4,02	3,59
				0	0				
2	0,188	0,32	-0,01	-0,046	-0,005	0,318	-29,48	4,27	3,79
				-2,65	-0,31				
3	0,375	0,64	-0,03	-0,093	-0,022	0,637	-14,74	4,53	3,97
				-5,31	-1,24				
4	0,563	0,95	-0,08	-0,139	-0,049	0,956	-9,83	4,80	4,14
				-7,96	-2,79				
5	0,750	1,26	-0,15	-0,185	-0,086	1,275	-7,37	5,08	4,28
				-10,62	-4,96				
6	0,938	1,56	-0,26	-0,232	-0,135	1,594	-5,90	5,38	4,40
				-13,27	-7,75				
7	1,125	1,85	-0,39	-0,278	-0,195	1,913	-4,91	5,69	4,48
				-15,93	-11,16				
8	1,313	2,13	-0,56	-0,324	-0,265	2,231	-4,21	6,01	4,53
				-18,58	-15,19				
9	1,5	2,38	-0,77	-0,370	-0,346	2,55	-3,69	6,33	4,53
				-21,23	-19,83				

Правий поворот (траєкторія по колу).

Початкове значення повного курсового кута на початку входу в поворот дорівнює кінцевому значенню курсового кута попередньої ділянки

$$\alpha_o = \alpha_{\text{по}} = \alpha_k = -0,3704 \text{ рад} = -21,234^\circ = \text{const}; k = 0; t = 7,8 \text{ с}; \varphi_k = -206,28^\circ.$$

Кут повороту осей $\theta_4 = \theta_3 + \varphi_3 = 40,04 - 19,834 = 20,25^\circ$ і максимальний кут

повороту

рами

навантажувача

$$\varphi_3 = 1,7 \left(\frac{-0,3704 \cdot 7,8 + 0,5 \cdot (0) \cdot 7,8^2}{1,365} - 0 \right) = -3,6 \text{ рад} = -206,28^\circ. \quad \text{Коефіцієнти:}$$

$$m = \frac{-0,3704}{1,365} - 0 = -0,2713 \text{ м}^{-1}, \quad n = -\frac{0}{1,365} = 0. \quad \text{Кут повороту керованих коліс}$$

$$\alpha_{II} = \alpha_{IK} = L / R_{\min} = -2,81 / 3,685 = -0,7626 \text{ рад} = -43,713^\circ.$$

При моделюванні повороту для симетрії траєкторії розвороту центр кола повинен бути розташований на осі Ox . Розрахунки ділянки-повороту по колу зведені до таблиці 4.4, схема руху по колу – на рисунку 4.2.

Таблиця 4.4 – Правий поворот

№ з/П	$t, \text{с}$	$x_i, \text{м}$	$y_i, \text{м}$	$\varphi, \text{рад}$	$\varphi, \text{град}$	$S, \text{м}$	$R, \text{м}$	$x, \text{м}$	$y, \text{м}$
1	0	0	0	0	0	0	-3,69	6,00	4,53
2	0,98	1,36	-0,92	-0,45	-25,78	1,66	-3,69	7,60	4,14
3	1,95	2,19	-2,34	-0,90	-51,57	3,32	-3,69	8,87	3,09
4	2,93	2,31	-3,98	-1,35	-77,35	4,97	-3,69	9,55	1,59
5	3,90	1,71	-5,51	-1,80	-103,14	6,63	-3,69	9,52	-0,05
6	4,88	0,50	-6,63	-2,25	-128,92	8,29	-3,69	8,78	-1,51
7	5,85	-1,07	-7,11	-2,7	-154,71	9,95	-3,69	7,47	-2,51
8	6,83	-2,69	-6,86	-3,15	-180,49	11,60	-3,69	5,86	-2,84
9	7,8	-4,05	-5,93	-3,6	-206,28	13,26	-3,69	4,26	-2,43

Вихід з правого повороту. Максимальне кінцеве значення повороту керованих коліс (в кінці входу в поворот) $\alpha_{II} = \alpha_{IK} = 0$. Значення курсового кута: на початку $\alpha_{Io} = 0,3704 \text{ рад} = 21,23^\circ$ та в кінці $\alpha_K = \alpha_{IK} = 0$. Час виходу з повороту $t = 1,3 \text{ с}$. Коефіцієнт інтенсивності зміни повного кута α :

$$k = k_{II} = \alpha_K - \alpha_o / t = 0,3704 - 0 / 1,3 = 0,2849 \text{ с}^{-1}, k_3 = 0 \quad \text{і} \quad \text{максимальний кут}$$

повороту

рами

навантажувача

$$\varphi_2 = 1,7 \left(\frac{-0,3704 \cdot 1,3 + 0,5 \cdot 0,2849 \cdot 1,3^2}{1,365} - 0 \right) = -0,300 \text{ рад} = -17,19^\circ.$$

Коефіцієнти: $m = \frac{-0,3704}{1,365} - 0 = -0,2714 \text{ м}^{-1}$, $n = \frac{0,2849}{1,365} = 0,2089 \text{ м}^{-1} \text{ с}^{-1}$. Осі

$x_5 y_5$ повернуті відносно осей $x y$ на кут

$\theta_5 = \theta_4 + \varphi_4 = 20,25 - 206,28 = -186,02^\circ$. Розрахунки виходу ділянки-повороту зведені до таблиці 4.2, схема траєкторії – на рисунку 4.2.

Таблиця 4.5 – Вихід з правого повороту

№ з/п	$t, \text{ с}$	$x_i, \text{ м}$	$y_i, \text{ м}$	$\alpha_K,$ $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	$\varphi,$ $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	$S, \text{ м}$	$R, \text{ м}$	$x, \text{ м}$	$y, \text{ м}$
1	0	0	0	-0,370	0	0	-3,69	4,26	-2,43
				-21,23	0				
2	0,16	0,26	-0,11	-0,324	-0,070	0,276	-4,21	4,02	-2,30
				-18,58	-4,03				
3	0,33	0,51	-0,22	-0,278	-0,131	0,553	-4,91	3,78	-2,16
				-15,93	-7,52				
4	0,49	0,76	-0,33	-0,232	-0,183	0,829	-5,90	3,54	-2,03
				-13,27	-10,47				
5	0,65	1,06	-0,45	-0,185	-0,225	1,105	-7,37	3,30	-1,89
				-10,62	-12,89				
6	0,81	1,27	-0,56	-0,139	-0,257	1,381	-9,83	3,06	-1,75
				-7,96	-14,77				
7	0,98	1,53	-0,66	-0,093	-0,281	1,658	-14,74	2,82	-1,62
				-5,31	-16,12				
8	1,14	1,78	-0,76	-0,046	-0,295	1,934	-29,48	2,57	-1,49
				-2,65	-16,92				
9	1,3	2,05	-0,85	0	-0,300	2,210	∞	2,32	-1,38
				0	-17,19				

Вхід в лівий та вихід з лівого повороту. Максимальне кінцеве значення повороту керованих коліс (в кінці входу в поворот)

$\alpha_{II} = \alpha_{1K} = L / R_{\min} = 2,81 / 3,685 = 0,7626 \text{ рад} = 43,69^\circ$. Значення курсового кута максимальне тоді буде:

$\alpha_K = \alpha_{IK} = \frac{\alpha_{1K} \ell_2}{L} = \frac{0,7626 \cdot 1,365}{2,81} = 0,3704 \text{ рад} = 21,22^\circ$. Початкове значення

повного курсового кута на початку входу в поворот: $\alpha_{II0} = 0$, $\alpha_{30} = 0$ і час

входу в поворот $t = 0,6$ с. Тоді коефіцієнт інтенсивності зміни повного кута

$$\alpha: \quad k = k_{II} = \alpha_k - \alpha_o / t = 0,3704 - 0,0349 / 0,6 = 0,6174 \text{ с}^{-1}, \quad k_3 = 0 \quad \text{і}$$

максимальний кут повороту рами навантажувача

$$\varphi_1 = 1,7 \left(\frac{0 \cdot 0,6 + 0,5 \cdot 0,6174 \cdot 0,6^2}{1,365} - 0 \right) = 0,138 \text{ рад} = 7,93^\circ.$$

$$\text{Коефіцієнти: } m = \frac{0}{1,365} - 0 = 0, \quad n = \frac{k_n}{\ell_2} - \frac{k_3}{\ell_1} = \frac{0,6174}{1,365} = 0,4523 \text{ м}^{-1} \text{ с}^{-1}.$$

$$\text{Кут повороту осей } x_6 y_6 \quad \theta_6 = \theta_5 + \varphi_5 = -186,05 - 17,19 = -203,21^\circ.$$

Розрахунки ділянки-повороту зведені до таблиці 4.6, а вхід в лівий поворот – на рисунку 4.2.

Таблиця 4.6 – Вхід в лівий поворот

$N_{з/н}$	$t, \text{ с}$	$x_i, \text{ м}$	$y_i, \text{ м}$	$\alpha, \frac{\text{рад}}{\text{град}}$	$\varphi, \frac{\text{рад}}{\text{град}}$	$R, \text{ м}$	$S, \text{ м}$	$x, \text{ м}$	$y, \text{ м}$
1	0	0	0	0	0	∞	0	2,32	-1,38
				0	0				
2	0,08	0,13	0,003	0,046	0,0022	0,13	29,48	2,2	-1,33
				2,65	0,12				
3	0,15	0,26	0,01	0,093	0,0086	0,26	14,74	2,08	-1,29
				5,31	0,50				
4	0,23	0,38	0,03	0,139	0,0195	0,38	9,83	1,96	-1,25
				7,96	1,12				
5	0,30	0,51	0,05	0,185	0,0346	0,51	7,37	1,83	-1,23
				10,62	1,98				
6	0,38	0,63	0,09	0,232	0,0541	0,64	5,90	1,71	-1,21
				13,27	3,10				
7	0,45	0,75	0,13	0,278	0,0778	0,77	4,91	1,58	-1,20
				15,93	4,46				
8	0,53	0,87	0,18	0,324	0,1060	0,89	4,21	1,45	-1,20
				18,58	6,07				
9	0,6	0,98	0,24	0,370	0,1384	1,02	3,69	1,32	-1,21
				21,23	7,93				

Максимальне кінцеве значення повороту керованих коліс (в кінці входу в поворот) $\alpha_{II} = \alpha_{IK} = 0$. Значення курсового кута: на початку

$\alpha_{\Pi 0} = 0,3704$ рад = $21,23^\circ$ та в кінці $\alpha_K = \alpha_{\Pi K} = 0$. Час виходу з повороту $t = 0,6$ с. Коефіцієнт інтенсивності зміни повного кута α :

$k = k_{\Pi} = \alpha_K - \alpha_0 / t = 0 - 0,3704 / 0,6 = -0,6174 \text{ с}^{-1}$, $k_3 = 0$ і максимальний кут повороту рами навантажувача

$$\varphi_2 = 1,7 \left(\frac{-0,3704 \cdot 0,6 + 0,5 \cdot (-0,6174) \cdot 0,6^2}{1,365} - 0 \right) = 0,138 \text{ рад} = 7,93^\circ. \text{ Коефіцієнт:}$$

$$m = \frac{0,3704}{1,365} - 0 = 0,2714 \text{ м}^{-1}, \quad n = \frac{-0,6174}{1,365} = -0,4523 \text{ м}^{-1} \text{ с}^{-1}. \text{ Оси } x_7, y_7 \text{ повернуті}$$

відносно осей x_u на кут $\theta_7 = \theta_6 + \varphi_6 = -203,21 + 7,93 = -195,27^\circ$.

Розрахунки ділянки-повороту зведені до таблиці 4.7, а вхід в лівий поворот – на рисунку 4.2.

Таблиця 4.7 – Вихід з лівого повороту

№ з/п	$t, \text{ с}$	$x_i, \text{ м}$	$y_i, \text{ м}$	$\alpha,$ $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	$\varphi,$ $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	$S, \text{ м}$	$R, \text{ м}$	$x, \text{ м}$	$y, \text{ м}$
1	0	0	0	0,370 21,23	0 0	0	3,69	1,32	-1,21
2	0,25	0,32	0,06	0,324 18,58	0,0324 1,86	0,13	4,21	1,2	-1,22
3	0,5	0,63	0,14	0,278 15,93	0,0605 3,47	0,26	4,91	1,07	-1,23
4	0,75	0,95	0,23	0,232 13,27	0,0843 4,83	0,38	5,90	0,94	-1,24
5	0,08	0,12	0,05	0,185 10,62	0,1038 5,95	0,51	7,37	0,81	-1,25
6	0,15	0,24	0,09	0,139 7,96	0,1189 6,82	0,64	9,83	0,69	-1,25
7	0,23	0,36	0,13	0,093 5,31	0,1297 7,44	0,77	14,74	0,56	-1,25
8	0,3	0,48	0,17	0,046 2,65	0,1362 7,81	0,89	29,48	0,43	-1,24
9	0,38	0,6	0,21	0 0	0,1384 7,93	1,02	∞	0,3	-1,22

4.2 Петлевидний розворот модельного енергетичного засобу - маневр 2

Маневр 2. Петлевидний розворот модельного енергетичного засобу - зі всіма керованими колесами по колу та з використанням передньої вісі для ділянок входу в лівий-правий поворот та виходу з лівого-правого повороту в лабораторних умовах.

4.2.1 Ділянки-повороти розвороту маневру 2

Вхід в правий поворот зі всіма керованими колесами.

Максимальне кінцеве значення повороту керованих коліс (в кінці входу в поворот) $\alpha_{II} = \alpha_{1K} = L / R_{\min} = -2,81 / 3,685 = -0,7626 \text{ рад} = -43,713^\circ$,

$\alpha_3 = \alpha_{2K} = L / R_{\min} = 2,81 / 3,685 = 0,7626 \text{ рад} = 43,713^\circ$. Значення курсового

кута тоді буде: $\alpha_{K1} = \alpha_{PK} = \frac{\alpha_{1K} \ell_2}{L} = \frac{-0,7626 \cdot 1,365}{2,81} = -0,3704 \text{ рад} = -21,22^\circ$,

$\alpha_{K2} = \alpha_{PK} = \frac{\alpha_{2K} \ell_1}{L} = \frac{0,7626 \cdot 1,445}{2,81} = 0,39213 \text{ рад} = 22,479^\circ$. Загальний

курсний кут: $\alpha_k = \alpha_o + kt = 0 + 0,0217 \cdot 1,0 = 0,0217 \text{ рад} = 1,244^\circ$. Приймаємо

початкове значення повного курсового кута на початку входу в поворот:

$\alpha_{IIo} = -2^\circ$, $\alpha_{3o} = 2^\circ$ і час входу в поворот $t = 1,0$ с. Тоді коефіцієнт інтенсивності зміни повного кута α :

$k_{II} = \alpha_k - \alpha_o / t = (-0,3704 - (-0,035)) / 1,0 = -0,3355 \text{ с}^{-1}$,

$k_3 = \alpha_k - \alpha_o / t = (0,3704 - 0,035) / 1,0 = 0,3572 \text{ с}^{-1}$. Загальний коефіцієнт

інтенсивності: $k = k_{II} + k_3 = -0,3355 + 0,3572 = 0,0217 \text{ с}^{-1}$. Кут повороту рами

навантажувача в кінці ділянки:

$$\varphi_3 = 1,7 \left(\frac{-0,035 \cdot 1,0 + 0,5 \cdot (-0,3355) \cdot 1,0^2}{1,365} - \frac{0,035 \cdot 1,0 + 0,5 \cdot 0,3572 \cdot 1,0^2}{1,445} \right) =$$

$= -0,504 \text{ рад} = -28,868^\circ$; коефіцієнти: $n = -0,4930$; $m = -0,0497$. Загальний

кут повороту навантажувача відносно центральної вісі:

$$\theta_3 = \theta_2 + \varphi_2 = 20,25 + 19,834 = 40,09^\circ.$$

Розрахунки ділянки-повороту зведені до таблиці 4.8, а вхід в правий поворот зі всіма керованими колесами – на рисунку 4.3.

Таблиця 4.8 – Вхід в правий поворот зі всіма керованими колесами

$N_{з/н}$	t, c	$x_i, м$	$y_i, м$	$\alpha_{II}, \frac{рад}{град}$	$\alpha_3, \frac{рад}{град}$	$\alpha_k, \frac{рад}{град}$	$\varphi, \frac{рад}{град}$	$R, м$	$S, м$	$x, м$	$y, м$
1	0	0	0	-0,035	0,0349	0	0	-39,12	0	4,02	3,59
				-2,00	2	0	0				
2	0,13	0,21	0	-0,077	0,0795	0,0027	-0,017	-17,77	0,21	4,18	3,72
				-4,40	4,56	0,16	-0,98				
3	0,25	0,42	-0,01	-0,119	0,1242	0,0054	-0,047	-11,49	0,43	4,35	3,86
				-6,81	7,12	0,31	-2,71				
4	0,38	0,64	-0,02	-0,161	0,1689	0,0081	-0,091	-8,49	0,64	4,52	3,98
				-9,21	9,68	0,47	-5,19				
5	0,50	0,85	-0,04	-0,203	0,2135	0,0109	-0,147	-6,74	0,85	4,70	4,10
				-11,62	12,24	0,62	-8,43				
6	0,63	1,06	-0,08	-0,245	0,2582	0,0136	-0,217	-5,58	1,06	4,88	4,21
				-14,02	14,80	0,78	-12,41				
7	0,75	1,26	-0,13	-0,286	0,3028	0,0163	-0,299	-4,76	1,28	5,07	4,3
				-16,43	17,36	0,93	-17,15				
8	0,88	1,46	-0,2	-0,328	0,3475	0,0190	-0,395	-4,16	1,49	5,27	4,38
				-18,83	19,92	1,09	-22,63				
9	1,0	1,66	-0,29	-0,370	0,3921	0,0217	-0,504	-3,69	1,7	5,48	4,43
				-21,23	22,48	1,24	-28,87				

Правий поворот, всі керовані колеса (траєкторія по колу).

Початкове значення повного курсового кута на початку входу в поворот дорівнює кінцевому значенню курсового кута попередньої ділянки

$$\alpha_{Po} = \alpha_{Пкпорділ} = -0,3704 \text{ рад}, \quad \alpha_{3o} = \alpha_{3к} = 0,392 \text{ рад}, \text{ дорівнює початку руху по}$$

$$\text{колу} \quad \alpha_k = \alpha_o = -0,0217 \text{ рад} = -1,244^\circ; \quad k = k_{II} = k_3 = 0; \quad t = 3,33 \text{ с};$$

$$\varphi_k = -206,28^\circ. \quad \text{Максимальний кут повороту рами навантажувача}$$

$$\varphi_3 = 1,7 \left(\frac{-0,3704 \cdot 3,33 + 0,5 \cdot 0 \cdot 3,33^2}{1,365} - \frac{0,39213 \cdot 3,33 + 0,5 \cdot 0 \cdot 3,33^2}{1,445} \right) =$$

$$= -3,072 \text{ рад} = -176,13^\circ. \text{ Коефіцієнти: } n = 0; \quad m = -0,5427. \text{ Загальний кут}$$

повороту $\theta_4 = \theta_3 + \varphi_3 = 40,09 - 28,868 = 11,22^\circ$. Розрахунки ділянки-повороту по колу зведені до таблиці 4.9, схема руху по колу – на рисунку 4.3.

Таблиця 4.9 – Правий поворот всі керовані колеса

№ з/П	t, c	x_i, m	y_i, m	$\varphi, \text{ рад}$	$\varphi, \text{ град}$	S, m	x, m	y, m
1	0	0	0	0	0	0	5,27	4,38
2	0,42	0,69	-0,12	-0,192	-11,01	0,71	5,97	4,40
3	0,83	1,29	-0,49	-0,384	-22,02	1,42	6,63	4,15
4	1,25	1,71	-1,06	-0,576	-33,02	2,12	7,15	3,67
5	1,67	1,88	-1,74	-0,768	-44,03	2,83	7,45	3,04
6	2,08	1,78	-2,44	-0,960	-55,04	3,54	7,49	2,34
7	2,50	1,44	-3,05	-1,152	-66,05	4,25	7,27	1,67
8	2,91	0,88	-3,48	-1,344	-77,06	4,95	6,81	1,13
9	3,33	0,21	-3,68	-3,072	-176,13	5,66	6,19	0,81

Вихід з правого повороту всі керовані колеса.

Максимальне кінцеве значення повороту керованих коліс (в кінці входу в поворот) $\alpha_{II} = \alpha_3 = \alpha_{1K} = \alpha_{2K} = 0$. Значення курсового кута: на початку $\alpha_{IIo} = \alpha_{II \text{порділ}} = -0,3704 \text{ рад} = -21,234^\circ$, $\alpha_{3o} = \alpha_{3к} = 0,392 \text{ рад} = 22,48^\circ$, $\alpha_o = \alpha_{IIo} + \alpha_{3o} = -21,234^\circ + 22,48^\circ = 1,244^\circ = 0,0217 \text{ рад}$ та в кінці $\alpha_K = \alpha_{IIK} = \alpha_{3K} = 0$. Час виходу з повороту $t = 1,33 \text{ с}$. Тоді коефіцієнт інтенсивності зміни α : $k_{II} = (0 - (-0,3704)) / 1,33 = 0,2785 \text{ с}^{-1}$; задніх коліс: $k_3 = (0 - 0,39213) / 1,33 = -0,2948 \text{ с}^{-1}$. Загальний коефіцієнт інтенсивності: $k = k_{II} + k_3 = 0,2785 + (-0,2948) = 0,0163 \text{ рад}$ і максимальний кут повороту рами навантажувача

$$\varphi_2 = 1,7 \left(\frac{-0,3704 \cdot 1,33 + 0,5 \cdot 0,2785 \cdot 1,33^2}{1,365} - \frac{0,3921 \cdot 1,33 + 0,5 \cdot (-0,2948) \cdot 1,33^2}{1,445} \right) =$$

$$= -0,614 \text{ рад} = -35,173^\circ. \text{ Коефіцієнти: } m = \frac{-0,3704}{1,365} - \frac{0,39213}{1,445} = -0,5427 \text{ м}^{-1},$$

$$n = \frac{0,2785}{1,365} - \frac{(-0,2948)}{1,445} = 0,4081 \text{ м}^{-1} \text{ с}^{-1}.$$

Загальний кут повороту навантажувача відносно центральної вісі:

$$\theta_5 = \theta_4 + \varphi_4 = 11,22 + (-176,13) = -164,906^\circ.$$

Розрахунки виходу ділянки-повороту зведені до таблиці 4.10, схема траєкторії – на рисунку 4.3.

Таблиця 4.10 – Вихід з правого повороту зі всіма керованими колесами

№ з/п	$t, \text{ с}$	$x_i, \text{ м}$	$y_i, \text{ м}$	$\alpha_{II},$ $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	$\alpha_3,$ $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	$\alpha_K,$ $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	$\varphi,$ $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	$R, \text{ м}$	$S, \text{ м}$	$x, \text{ м}$	$y, \text{ м}$
1	0	0	0	-0,3704	0,3921	0,0217	0	-3,69	0	6,19	0,81
				-21,23	22,48	1,24	0				
2	0,17	0,28	-0,02	-0,3241	0,3431	0,0190	-0,1438	-4,21	0,28	5,91	0,75
				-18,58	19,67	1,09	-8,24				
3	0,33	0,56	-0,07	-0,2778	0,2941	0,0163	-0,2684	-4,91	0,57	5,63	0,73
				-15,93	16,86	0,93	-15,39				
4	0,50	0,83	-0,16	-0,2315	0,2451	0,0136	-0,3739	-5,90	0,85	5,35	0,74
				-13,27	14,05	0,78	-21,43				
5	0,67	1,09	-0,27	-0,1852	0,1961	0,0109	-0,4602	-7,37	1,13	5,07	0,79
				-10,62	11,24	0,62	-26,38				
6	0,83	1,34	-0,41	-0,1389	0,1470	0,0081	-0,5273	-9,83	1,41	4,79	0,85
				-7,96	8,43	0,47	-30,23				
7	1,00	1,58	-0,56	-0,0926	0,0980	0,0054	-0,5752	-14,74	1,70	4,52	0,94
				-5,31	5,62	0,31	-32,97				
8	1,16	1,81	-0,73	-0,0463	0,0490	0,0027	-0,6040	-29,48	1,98	4,25	1,04
				-2,65	2,81	0,16	-34,62				
9	1,33	2,04	-0,90	0	0	0	-0,6136	∞	2,26	3,98	1,15
				0	0	0	-35,17				

Вхід в лівий поворот.

Вихідні дані з попереднього маневру для цієї ділянки. Час входу в поворот $t=1,5$ с. Тоді коефіцієнт інтенсивності зміни повного кута α :
 $k = k_{II} = \alpha_{\kappa} - \alpha_o / t = 0,3704 - 0 / 1,5 = 0,2469 \text{ c}^{-1}$, $k_3 = 0$ і максимальний кут повороту рами навантажувача

$$\varphi_1 = 1,7 \left(\frac{0 \cdot 1,5 + 0,5 \cdot 0,6174 \cdot 1,5^2}{1,365} - 0 \right) = 0,346 \text{ рад} = 19,834^\circ. \quad \text{Коефіцієнти:}$$

$$m = \frac{0}{1,365} - 0 = 0, \quad n = \frac{k_n}{\ell_2} - \frac{k_3}{\ell_1} = \frac{0,2469}{1,365} = 0,1809 \text{ м}^{-1} \text{ c}^{-1}. \quad \text{Загальний кут повороту}$$

$$\text{осей } x_6 y_6 \quad \theta_6 = \theta_5 + \varphi_5 = -164,91 - 35,173 = -200,08^\circ.$$

Розрахунки ділянки-повороту зведені до таблиці 4.11, а вхід в лівий поворот – на рисунку 4.3.

Таблиця 4.11 – Вхід в лівий поворот

№ з/п	$t, \text{ c}$	$x_i, \text{ м}$	$y_i, \text{ м}$	$\alpha,$ $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	$\varphi,$ $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	$R, \text{ м}$	$S, \text{ м}$	$x, \text{ м}$	$y, \text{ м}$
1	0	0	0	0 0	0 0	∞	0	3,98	1,15
2	0,19	0,32	0,01	0,0463 2,65	0,0054 0,31	29,48	0,32	3,68	1,25
3	0,38	0,64	0,03	0,0926 5,31	0,0216 1,24	14,74	0,64	3,37	1,33
4	0,56	0,95	0,08	0,1389 7,96	0,0487 2,79	9,83	0,96	3,06	1,39
5	0,75	1,26	0,15	0,1852 10,62	0,0865 4,96	7,37	1,28	2,74	1,43
6	0,94	1,56	0,26	0,2315 13,27	0,1352 7,75	5,90	1,59	2,42	1,44
7	1,13	1,85	0,39	0,2778 15,93	0,1946 11,16	4,91	1,91	2,11	1,41
8	1,31	2,13	0,56	0,3241 18,58	0,2649 15,19	4,21	2,23	1,79	1,35
9	1,5	2,38	0,77	0,3704 21,23	0,3460 19,83	3,69	2,55	1,48	1,24

Вихід з лівого повороту.

Вихідні дані з попереднього маневру для цієї ділянки. Час виходу з повороту $t=1,0$ с. Коефіцієнт інтенсивності зміни повного кута α :
 $k = k_{II} = \alpha_k - \alpha_o / t = 0 - 0,3704 / 1,0 = -0,3704 \text{ с}^{-1}$, $k_3 = 0$ і максимальний кут повороту рами навантажувача

$$\varphi_2 = 1,7 \left(\frac{-0,3704 \cdot 1,0 + 0,5 \cdot (-0,6174) \cdot 1,0^2}{1,365} - 0 \right) = 0,231 \text{ рад} = 13,223^\circ. \text{ Коефіцієнт}$$

$$: m = \frac{0,3704}{1,365} - 0 = 0,2714 \text{ м}^{-1}, \quad n = \frac{-0,3704}{1,365} = -0,2714 \text{ м}^{-1} \text{ с}^{-1}. \text{ Загальний кут}$$

повороту $\theta_7 = \theta_6 + \varphi_6 = -200,08 + 19,834 = -180,245^\circ$. Розрахунки ділянки повороту зведені до таблиці 4.12, а вхід в лівий поворот – на рисунку 4.3.

Таблиця 4.12 – Вихід з лівого повороту

№ з/п	$t, \text{ с}$	$x_i, \text{ м}$	$y_i, \text{ м}$	$\alpha,$ $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	$\varphi,$ $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	$R, \text{ м}$	$S, \text{ м}$	$x, \text{ м}$	$y, \text{ м}$
1	0	0	0	0,3704	0	3,69	0	1,48	1,24
				21,23	0				
2	0,13	0,2	0,08	0,3241	0,0541	4,21	0,21	1,29	1,16
				18,58	3,10				
3	0,25	0,39	0,16	0,2778	0,1009	4,91	0,43	1,09	1,08
				15,93	5,78				
4	0,38	0,59	0,24	0,2315	0,1406	5,90	0,64	0,89	1,0
				13,27	8,06				
5	0,5	0,79	0,32	0,1852	0,1730	7,37	0,85	0,69	0,92
				10,62	9,92				
6	0,63	0,99	0,39	0,1389	0,1982	9,83	1,06	0,49	0,85
				7,96	11,36				
7	0,75	1,19	0,46	0,0926	0,2162	14,74	1,28	0,29	0,78
				5,31	12,40				
8	0,88	1,39	0,52	0,0463	0,2271	29,48	1,49	0,09	0,72
				2,65	13,02				
9	1	1,6	0,58	0	0,2307	∞	1,7	-0,12	0,67
				0	13,22				

4.3 Крабовий маневр 3 на прикладі модельного енергетичного засобу зі всіма керованими колесами в лабораторних умовах

4.3.1 Ділянки-повороти розвороту маневру 3

Лівий крабовий поворот: ділянка 1 та ділянка 6. Мінімальний радіус повороту навантажувача $R_{\min} = 5,0$ м. Максимальне значення кута повороту

керованих коліс): $\alpha_{1\max} = \alpha_{2\max} = \frac{L}{R_{\min}} = \frac{2,81}{5,0} = 0,562 \text{ рад} = 32,22^\circ$. Приймаємо

початкове значення повного кута (курсowego) α на початку входу в поворот:

$\alpha_o = 0$. Курсовий кут: $\alpha_k = \alpha_1 = \alpha_2 = 0,562 \text{ рад} = 32,22^\circ$. Коефіцієнт

інтенсивності зміни курсового кута $k = \frac{\nu}{R} = \frac{1,0}{5} = 0,2 \text{ с}^{-1}$. Час руху приймаємо

$t_1 = t_6 = \frac{\alpha_k}{k} = \frac{0,562}{0,2} = 2,81 \text{ с}$. Розрахунки ділянки-повороту зведені до таблиці

4.13, 4.14, а лівий поворот – на рисунку 4.1.

Таблиця 4.13 – Лівий крабовий поворот (ділянка 1)

№ з/п	$t, \text{с}$	$x_i, \text{м}$	$y_i, \text{м}$	$\alpha_{\text{л}},$ $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	$\alpha_{\text{з}},$ $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	$S, \text{м}$	$x, \text{м}$	$y, \text{м}$
1	0	0	0	0	0	0	0	0
				0	0			
2	0,31	0,31	0,01	0,062	0,062	0,31	0,31	0,01
				3,58	3,58			
3	0,62	0,62	0,04	0,125	0,125	0,62	0,62	0,04
				7,16	7,16			
4	0,94	0,93	0,09	0,187	0,187	0,94	0,93	0,09
				10,74	10,74			
5	1,25	1,24	0,16	0,250	0,250	1,25	1,24	0,16
				14,32	14,32			
6	1,56	1,54	0,24	0,312	0,312	1,56	1,54	0,24
				17,90	17,90			
7	1,87	1,83	0,35	0,375	0,375	1,87	1,83	0,35
				21,48	21,48			

8	2,19	2,12	0,47	0,437	0,437	2,19	2,12	0,47
				25,06	25,06			
9	2,50	2,40	0,61	0,500	0,500	2,50	2,40	0,61
				28,64	28,64			
10	2,81	2,66	0,77	0,562	0,562	2,81	2,66	0,77
				32,22	32,22			

Таблиця 4.14 – Лівий крабовий поворот (ділянка 6)

№ з/п	t, c	x_i, m	y_i, m	$\alpha_{II},$ $\frac{рад}{град}$	$\alpha_3,$ $\frac{рад}{град}$	S, m	x, m	y, m
1	0	0	0	0	0	0	0	0
				0	0			
2	0,31	0,27	-0,16	0,062	0,062	0	9,68	0,77
				3,58	3,58			
3	0,62	0,55	-0,30	0,125	0,125	0,31	9,95	0,61
				7,16	7,16			
4	0,94	0,83	-0,42	0,187	0,187	0,62	10,23	0,47
				10,74	10,74			
5	1,25	1,13	-0,53	0,250	0,250	0,94	10,51	0,35
				14,32	14,32			
6	1,56	1,43	-0,61	0,312	0,312	1,25	10,81	0,24
				17,90	17,90			
7	1,87	1,73	-0,68	0,375	0,375	1,56	11,11	0,16
				21,48	21,48			
8	2,19	2,04	-0,73	0,437	0,437	1,87	11,41	0,09
				25,06	25,06			
9	2,50	2,35	-0,76	0,500	0,500	2,19	11,72	0,04
				28,64	28,64			
10	2,81	2,66	-0,77	0,562	0,562	2,50	12,03	0,01
				32,22	32,22			

Крабовий прямолінійний хід (ділянка 2 та ділянка 5). Максимальне значення кута повороту керованих коліс:

$$\alpha_{1\max} = \alpha_{2\max} = \frac{L}{R_{\min}} = \frac{2,81}{5,0} = 0,562 \text{ рад} = 32,22^\circ.$$

Приймаємо початкове значення курсового кута на початку ділянки:

$$\alpha_o = \alpha_{\text{кноп.діл.}} = 0,562 \text{ рад} = 32,22^\circ. \quad \alpha_k = \alpha_{II} = \alpha_3 = 0,562 \text{ рад} = 32,22^\circ. \quad \text{Час руху} \\ t_2 = t_5 = 1,0 \text{ с}.$$

Розрахунки ділянки-повороту зведені до таблиці 4.15, 4.16, а лівий поворот – на рисунку 4.1.

Таблиця 4.15 – Крабовий прямолінійний хід (ділянка 2)

№ з/п	$t, \text{ с}$	$x_i, \text{ м}$	$y_i, \text{ м}$	$S, \text{ м}$	$x, \text{ м}$	$y, \text{ м}$
1	0	0	0	0	2,66	0,77
2	0,11	0,09	0,06	0,11	2,76	0,83
3	0,22	0,19	0,12	0,22	2,85	0,89
4	0,33	0,28	0,19	0,33	2,95	0,96
5	0,44	0,37	0,25	0,44	3,04	1,02
6	0,56	0,47	0,31	0,56	3,13	1,08
7	0,67	0,56	0,37	0,67	3,23	1,14
8	0,78	0,65	0,44	0,78	3,32	1,21
9	0,89	0,75	0,50	0,89	3,41	1,27
10	1,0	0,84	0,56	1,0	3,51	1,33

Таблиця 4.16 – Крабовий прямолінійний хід (ділянка 5).

№ з/п	$t, \text{ с}$	$x_i, \text{ м}$	$y_i, \text{ м}$	$S, \text{ м}$	$x, \text{ м}$	$y, \text{ м}$
1	0	0	0	0	8,84	1,33
2	0,11	0,09	-0,06	0,11	8,93	1,27
3	0,22	0,19	-0,12	0,22	9,02	1,21
4	0,33	0,28	-0,19	0,33	9,12	1,14
5	0,44	0,37	-0,25	0,44	9,21	1,08
6	0,56	0,47	-0,31	0,56	9,30	1,02
7	0,67	0,56	-0,37	0,67	9,40	0,96
8	0,78	0,65	-0,44	0,78	9,49	0,89
9	0,89	0,75	-0,50	0,89	9,58	0,83
10	1,0	0,84	-0,56	1,00	9,68	0,77

Правий крабовий поворот (ділянка 3 та ділянка 4). Мінімальний радіус повороту навантажувача $R_{\min} = -5,0$ м. Максимальне значення кута повороту

керованих коліс: $\alpha_{1\max} = \alpha_{2\max} = \frac{L}{R_{\min}} = \frac{2,81}{-5,0} = -0,562 \text{ рад} = -32,22^\circ$.

Приймаємо початкове значення повного кута (курсowego) α на початку входу в поворот: $\alpha_o = \alpha_{\text{кноп.діл.}} = 0$ та в кінці ділянки $\alpha_k = -0,562 \text{ рад} = 32,22^\circ$.

Курсовий кут: $\alpha_k = \alpha_1 = \alpha_2$. Коефіцієнт інтенсивності зміни курсового кута

$k = \frac{v}{R} = \frac{1,0}{-5} = -0,2 \text{ с}^{-1}$. Час руху приймаємо $t_3 = t_4 = \frac{\alpha_k}{k} = \frac{0,562}{0,2} = 2,81 \text{ с}$.

Розрахунки ділянки-повороту зведені до таблиці 4.17, 4.18, а лівий поворот – на рисунку 4.1.

Таблиця 4.17 – Правий крабовий поворот (ділянка 3).

№ з/П	$t, \text{ с}$	$x_i, \text{ м}$	$y_i, \text{ м}$	$\alpha_{\Pi},$ $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	$\alpha_3,$ $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	$S, \text{ м}$	$x, \text{ м}$	$y, \text{ м}$
1	0	0	0	0,562	0,562	0	3,51	1,33
				32,22	32,22			
2	0,31	0,27	0,16	0,500	0,500	0,31	3,78	1,49
				28,64	28,64			
3	0,62	0,55	0,30	0,437	0,437	0,62	4,05	1,63
				25,06	25,06			
4	0,94	0,83	0,42	0,375	0,375	0,94	4,34	1,75
				21,48	21,48			
5	1,25	1,13	0,53	0,312	0,312	1,25	4,64	1,86
				17,90	17,90			
6	1,56	1,43	0,61	0,250	0,250	1,56	4,93	1,94
				14,32	14,32			
7	1,87	1,73	0,68	0,187	0,187	1,87	5,24	2,01
				10,74	10,74			
8	2,19	2,04	0,73	0,125	0,125	2,19	5,55	2,06
				7,16	7,16			
9	2,50	2,35	0,76	0,062	0,062	2,50	5,86	2,09
				3,58	3,58			
10	2,81	2,66	0,77	0	0	2,81	6,17	2,10
				0	0			

Таблиця 4.18 – Правий крабовий поворот (ділянка 4)

№ з/П	t, c	$x_i, м$	$y_i, м$	$\alpha_{П},$ $\frac{рад}{град}$	$\alpha_3,$ $\frac{рад}{град}$	$S, м$	$x, м$	$y, м$
1	0,31	0,31	-0,01	0,562	0,562	0	6,17	2,1
				32,22	32,22			
2	0,62	0,62	-0,04	0,500	0,500	0,31	6,48	2,09
				28,64	28,64			
3	0,94	0,93	-0,09	0,437	0,437	0,62	6,79	2,06
				25,06	25,06			
4	1,25	1,24	-0,16	0,375	0,375	0,94	7,10	2,01
				21,48	21,48			
5	1,56	1,54	-0,24	0,312	0,312	1,25	7,41	1,94
				17,90	17,90			
6	1,87	1,83	-0,35	0,250	0,250	1,56	7,71	1,86
				14,32	14,32			
7	2,19	2,12	-0,47	0,187	0,187	1,87	8,00	1,75
				10,74	10,74			
8	2,50	2,40	-0,61	0,125	0,125	2,19	8,29	1,63
				7,16	7,16			
9	2,81	2,66	-0,77	0,062	0,062	2,50	8,57	1,49
				3,58	3,58			
10	0,31	0,31	-0,01	0	0	0	6,17	2,1
				0	0			

4.4 Застосування GPS-навігації при отриманні відтворених маневрів модельного енергетичного засобу

Використовуючи додаток до планшету з супутниковою навігаційною системою нами були отримані три маневри.

Далі зображені кожен маневр навантажувача окремо разом з теоретичним (рис. 4.1, рис. 4.2, рис. 4.3) та його статистична обробка (табл. 4.19, табл. 4.20).

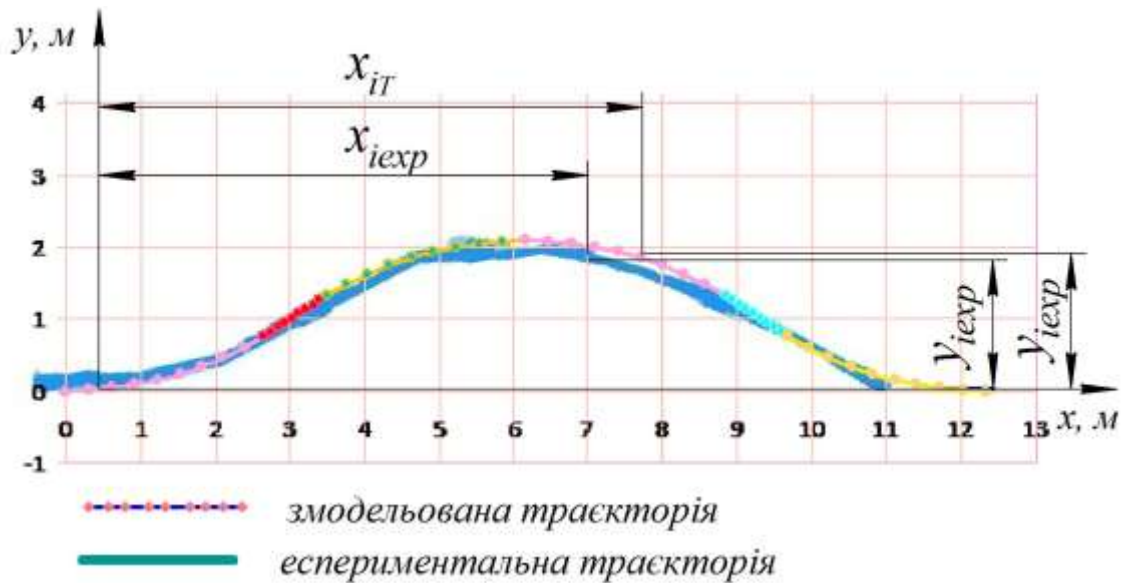


Рисунок 4.1 – Сумісний перебіг змодельованого та відтвореного крабового маневру модельного енергетичного засобу довжина та час маневру 3:

$$S_{\text{exp}} = 12,66 \text{ м}; t_{\text{exp}} = 12,66 \text{ с}; S_T = 13,24 \text{ м}; t_T = 13,24 \text{ с}$$

Таблиця 4.19 – Результат статистичної обробки координат експериментальної та змодельованої траєкторій маневру 3 за допомогою коефіцієнта кореляції Пірсона

№ точки	Координати змодельованої траєкторії маневру		Координати експериментальної траєкторії маневру		Коефіцієнт Пірсона
	$x_{Теор}$	$y_{Теор}$	$x_{Екс}$	$y_{Екс}$	
Лівий крабовидний поворот					
1	2	3	4	5	6
1.	0	0	0	0	0,9986
2.	0,31	0,01	0,31	0,001	
3.	0,62	0,04	0,62	0,018	
4.	0,93	0,09	0,93	0,06	
5.	1,24	0,16	1,24	0,12	
6.	1,54	0,24	1,54	0,2	
7.	1,83	0,35	1,83	0,31	
8.	2,12	0,47	2,12	0,43	
9.	2,4	0,61	2,4	0,56	
10.	2,66	0,77	2,66	0,72	
Крабовий прямолінійний хід – лінійних рух					
11.	2,66	0,77	2,66	0,72	0,9988

12.	2,76	0,83	2,76	0,79	
13.	2,85	0,89	2,85	0,85	
14.	2,95	0,96	2,95	0,92	
15.	3,04	1,02	3,04	0,98	
16.	3,13	1,08	3,13	1,03	
17.	3,23	1,14	3,23	1,10	
18.	3,32	1,21	3,32	1,16	
19.	3,41	1,27	3,41	1,22	
20.	3,51	1,33	3,51	1,27	
Правий крабовидний поворот					
21.	3,51	1,33	3,51	1,27	0,9998
22.	3,78	1,49	3,78	1,42	
23.	4,05	1,63	4,05	1,57	
24.	4,34	1,75	4,34	1,69	
25.	4,64	1,86	4,64	1,80	
26.	4,93	1,94	4,93	1,88	
27.	5,24	2,01	5,24	1,95	
28.	5,55	2,06	5,55	2,00	
29.	5,86	2,09	5,86	2,02	
30.	6,17	2,10	6,17	2,03	
Правий крабовидний поворот					
31.	6,17	2,10	6,17	2,03	0,9995
32.	6,48	2,09	6,48	2,02	
33.	6,79	2,06	6,79	1,99	
34.	7,10	2,01	7,10	1,94	
35.	7,41	1,94	7,41	1,87	
36.	7,71	1,86	7,71	1,79	
37.	8,00	1,75	8,00	1,67	
38.	8,29	1,63	8,29	1,57	
39.	8,57	1,49	8,57	1,41	
40.	8,84	1,33	8,84	1,25	
Крабовий прямолінійний хід – лінійних рух					
41.	8,84	1,33	8,84	1,25	0,9985
42.	8,93	1,27	8,93	1,21	
43.	9,02	1,21	9,02	1,15	
44.	9,12	1,14	9,12	1,09	
45.	9,21	1,08	9,21	1,02	
46.	9,30	1,02	9,30	0,96	
47.	9,40	0,96	9,40	0,90	
48.	9,49	0,89	9,49	0,83	
49.	9,58	0,83	9,58	0,77	
50.	9,68	0,77	9,68	0,71	

Лівий крабовидний поворот					0,9953
51.	9,68	0,77	9,68	0,71	
52.	9,95	0,61	9,95	0,55	
53.	10,23	0,47	10,23	0,42	
54.	10,51	0,35	10,51	0,29	
55.	10,81	0,24	10,81	0,18	
56.	11,11	0,16	11,11	0,10	
57.	11,41	0,09	11,41	0,03	
58.	11,72	0,04	11,72	0,00	
59.	12,03	0,01	12,03	0,00	
60.	12,34	0,00	12,34	0,00	
Загальний коефіцієнт Пірсона					0,9996

Додатний коефіцієнт кореляції вказує на однонаправлену динаміку параметрів, збільшення одного параметра обумовлює збільшення іншого, він вимірює ступінь лінійного кореляційного зв'язку між кількісними скалярними ознаками.

Відповідно до значення коефіцієнта кореляції Пірсона 0,9996 між параметрами встановлений тісний функціональний зв'язок. Коефіцієнт Пірсона показує (фіксує) тісноту лінійного зв'язку між двома вибірками випадкових величин, є мірою тісноти зв'язку між двома ознаками, коли між ними встановлений лінійний зв'язок.

Відповідно до методики визначення критерію узгодженості Пірсона формуємо нульову гіпотезу H_0 : полягає в тому, що координати відтвореної траєкторії з координатами змодельованою траєкторією польового маневру узгоджені, тобто фактичні дані не суперечать очікуванім, відрізняються незначуще. Обсяг вибірки складає 55 точок. Записуємо обсяг вибірки у вигляді інтервального розподілу і отримуємо 6 інтервалів з шагом 2 одиниці.

Обчислюємо теоретичні та емпіричні ймовірності потрапляння p_{ie} , p_{it} випадкової величини Y в інтервал за формулою 3.5, визначаємо теоретичні $\bar{n}_i$ та емпіричні частоти n_i об'єму вибірки за формулами 3.6, 3.7, результати розрахунків зводимо до таблиці 4.20.

Таблиця 4.20 – Теоретичні, емпіричні ймовірності потрапляння та теоретичні та емпіричні частоти об'єму вибірки

№ з/П	$S_{it}, мм$	$S_{ie}, мм$	p_{im}	p_{ie}	$\bar{n}_i = 55p_{it}$	n_{ie}
1	24,746	35,9	0,019	0,03	1,045	1,65
2	202,386	184,0	0,155	0,154	8,55	8,47
3	387,453	366,056	0,297	0,306	16,36	16,86
4	404,2	361,7	0,312	0,3027	17,075	16,62
5	245,25	216,62	0,188	0,1813	10,36	9,97
6	37,935	30,58	0,029	0,0256	1,6025	1,421
Σ	1301,97	1194,856				

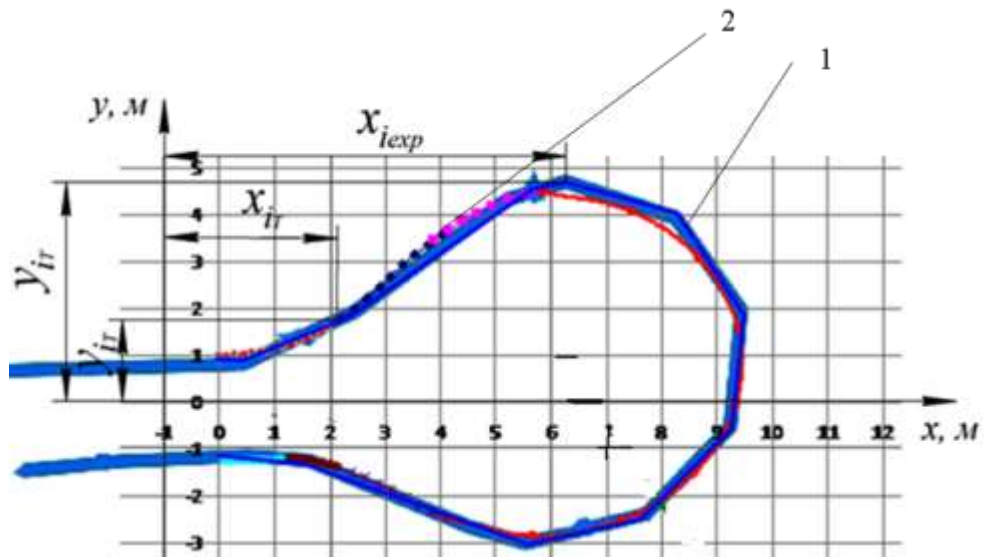
Далі розраховуємо емпіричне значення критерію узгодження Пірсона за формулою 3.4 та результат обчислень розрахунків зводимо до таблиці 4.21.

Таблиця 4.21 – Емпіричне значення критерію узгодження Пірсона

i	Δi	n_{ie}	$\bar{n}_i$	$n_i - \bar{n}_i$	$(n_i - \bar{n}_i)^2$	$\frac{(n_i - \bar{n}_i)^2}{\bar{n}_i}$
1	0–2	2	1	1	1	1
2	2–4	8	9	1	1	0,11
3	4–6	17	16	1	1	0,0625
4	6–8	17	17	0	-	-
5	8–10	10	10	0	-	-
6	10–12	1	2	1	1	0,5
		55	55			$\chi_{емп}^2 = 1,6725$

За таблицею критичних точок розподілу χ^2 (додаток Г) при рівні значущості $\alpha = 0,01$ та числі ступенів вільності $\nu = i - 1 = 6 - 1 = 5$ знаходимо критичну точку $k_{кр} = \chi_{кр}^2(\alpha; \nu) = \chi_{кр}^2(0,01; 5) = 15,1$.

Оскільки $\chi_{емп}^2 = 1,6725 < \chi_{кр}^2 = 15,1$, то немає підстав відхиляти нульову гіпотезу.



1 – експериментальна траєкторія; 2 – змодельована траєкторія.

Рисунок 4.2 – Сумісний перебіг змодельованого та відтвореного розвороту модельного енергетичного засобу з передніми керованими колесами з параметрами довжина та час розвороту маневру 1: $S_{\text{exp}} = 25,99 \text{ м}$;

$$t_{\text{exp}} = 15,28 \text{ с}; S_T = 24,99 \text{ м}; t_T = 14,7 \text{ с}$$

Малі значення $\chi_{\text{емп}}^2$ свідчать на користь нульової $\chi_{\text{емп}}^2$ гіпотези, що різниця між частотами не дуже значні і вони узгоджені та невеликі відхилення вписуються в випадкові коливання. Чим менше відрізняються спостерігаємі та очікувані частоти, тим ближче до нуля критерій $\chi_{\text{емп}}^2$.

Нульова гіпотеза вважається вірною, поки не доведено, що вона є помилковою. Для перевірки нульової гіпотези використовуємо метод дослідження за допомогою р-значення (p-value). Для отримання повної користі від інформації, яка доступна у результаті статистичної гіпотези більш обґрунтованого рішення, корисно визначити міру кількості статистичних фактів, які підтримують альтернативну гіпотезу. Таку міру та можливість оцінити найменшу ймовірність припущення помилки першого типу падає р-значення. Цей метод використовується, в основному, для розрахунків з використанням комп'ютера та статистичного програмного забезпечення [3].

За допомогою формули 3.8 та програмного процесора Microsoft Excel визначаємо значення $p\text{-value}=0,892$. Чим менше p -значення, тим більше статистичних факторів на користь підтримки альтернативної гіпотези. Значення $p\text{-value}=0,892$ значно більше встановленого рівня значущості $\alpha = 0,01$ на 89,2 %, значить нульова гіпотеза не відхиляється.

Таблиця 4.22 – Результат статистичної обробки координат експериментальної та змодельованої траєкторій маневру 1 за допомогою коефіцієнта кореляції Пірсона

№ точ ки	Координати змодельованої траєкторії маневру		Координати експериментальної траєкторії маневру		Коефіцієнт Пірсона
	$x_{\text{Теор}}$	$y_{\text{Теор}}$	$x_{\text{Екс}}$	$y_{\text{Екс}}$	
1	2	3	4	5	6
Вхід в лівий поворот з передніми керованими колесами					
1.	0	1,00	0	1,2	0,9988
2.	0,30	1,02	0,30	1,2	
3.	0,59	1,05	0,59	1,25	
4.	0,88	1,11	0,88	1,3	
5.	1,17	1,19	1,17	1,4	
6.	1,45	1,29	1,45	1,52	
7.	1,72	1,43	1,72	1,68	
8.	1,97	1,59	1,97	1,85	
9.	2,20	1,79	2,20	2,05	
Вихід в лівого повороту з передніми керованими колесами					
10.	2,44	2,00	2,44	2,3	0,9995
11.	2,66	2,23	2,66	2,55	
12.	2,89	2,46	2,89	2,75	
13.	3,11	2,69	3,11	3	
14.	3,33	2,92	3,33	3,25	
15.	3,55	3,15	3,55	3,5	
16.	3,78	3,37	3,78	3,75	
17.	4,02	3,59	4,02	3,95	
Вхід в правий поворот з передніми керованими колесами					
18.	4,27	3,79	4,27	4,25	0,9837
19.	4,53	3,97	4,53	4,45	
20.	4,80	4,14	4,80	4,6	
21.	5,09	4,28	5,09	4,7	
22.	5,38	4,40	5,38	4,8	

1	2	3	4	5	6
23.	5,69	4,48	5,69	4,9	
24.	6,01	4,53	6,01	4,9	
25.	6,33	4,53	6,33	4,9	
Правий поворот (колова траєкторія) з передніми керованими колесами					
26.	7,60	4,14	7,60	4,65	0,9989
27.	8,87	3,09	8,87	3,6	
28.	9,55	1,59	9,55	2,1	
29.	9,52	-0,05	9,52	0,7	
30.	8,78	-1,51	8,78	-0,5	
31.	7,47	-2,51	7,47	-1,5	
32.	5,86	-2,84	5,86	-2	
33.	4,26	-2,43	4,26	-1,5	
Вихід в правого повороту з передніми керованими колесами					
34.	4,02	-2,30	4,02	-1,8	0,9925
35.	3,78	-2,16	3,78	-1,67	
36.	3,54	-2,03	3,54	-1,55	
37.	3,30	-1,89	3,30	-1,45	
38.	3,06	-1,75	3,06	-1,35	
39.	2,82	-1,62	2,82	-1,23	
40.	2,57	-1,49	2,57	-1,1	
41.	2,32	-1,38	2,32	-1	
Вхід в лівий поворот з передніми керованими колесами					
42.	2,20	-1,33	2,20	-1,07	0,9861
43.	2,08	-1,29	2,08	-1,02	
44.	1,96	-1,25	1,96	-0,99	
45.	1,83	-1,23	1,83	-0,97	
46.	1,71	-1,21	1,71	-0,94	
47.	1,58	-1,20	1,58	-0,92	
48.	1,45	-1,20	1,45	-0,93	
49.	1,32	-1,21	1,32	-0,95	
Вихід з лівого повороту з передніми керованими колесами					
50.	1,20	-1,22	1,20	-0,95	0,9624
51.	1,07	-1,23	1,07	-0,97	
52.	0,94	-1,24	0,94	-0,98	
53.	0,81	-1,25	0,81	-0,98	
54.	0,69	-1,25	0,69	-0,98	
55.	0,56	-1,25	0,56	-0,98	
56.	0,43	-1,24	0,43	-0,97	
57.	0,30	-1,22	0,30	-0,95	
Загальний коефіцієнт Пірсона					0,9889

Відповідно до значення коефіцієнта кореляції Пірсона 0,9889 між параметрами встановлений тісний функціональний зв'язок.

Коефіцієнт Пірсона показує (фіксує) тісноту лінійного зв'язку між двома вибірками випадкових величин, є мірою тісноти зв'язку між двома ознаками, коли між ними встановлений лінійний зв'язок.

Відповідно до методики визначення критерію узгодженості Пірсона формуємо нульову гіпотезу H_0 : полягає в тому, що координати відтвореної траєкторії з координатами змодельованою траєкторією польового маневру узгоджені, тобто фактичні дані не суперечать очікуваним, відрізняються незначуще. Обсяг вибірки складає 57 точок.

Записуємо обсяг вибірки у вигляді інтервального розподілу і отримуємо 6 інтервалів з шагом 2 одиниці. Обчислюємо теоретичні та емпіричні ймовірності потрапляння p_{ie} , p_{it} випадкової величини Y в інтервал за формулою 3.5, визначаємо теоретичні $\bar{n}_i$ та емпіричні частоти n_i об'єму вибірки за формулами 3.6, 3.7, результати розрахунків зводимо до таблиці 4.23.

Таблиця 4.23 – Теоретичні, емпіричні ймовірності потрапляння та теоретичні та емпіричні частоти об'єму вибірки

№ з/п	$S_{it}, мм$	$S_{ie}, мм$	p_{it}	p_{ie}	$\bar{n}_i = 57 p_{it}$	n_{ie}
1	291,27	279,045	0,1088	0,1038	6,2	5,9
2	498,215	478,87	0,186	0,178	10,6	10,1
3	785,353	777,969	0,2935	0,289	16,7	16,6
4	775,3	811,691	0,2897	0,3019	16,6	17,2
5	326,045	340,768	0,1218	0,12675	6,9	7,2
Σ	2676,183	2688,343				

Далі розраховуємо емпіричне значення критерію узгодження Пірсона за формулою 3.4 та результат обчислень розрахунків зводимо до таблиці 4.24.

Таблиця 4.24 – Емпіричне значення критерію узгодження Пірсона

i	Δi	n_{ie}	$\bar{n}_i$	$n_i - \bar{n}_i$	$(n_i - \bar{n}_i)^2$	$\frac{(n_i - \bar{n}_i)^2}{\bar{n}_i}$
1	0–2	6	6	0	0	0
2	2–4	10	11	1	1	0,0909
3	4–6	17	17	0	0	0
4	6–8	17	16	1	1	0,0625
5	8–10	7	7	0	0	0
		57	57			$\chi_{емп}^2 = 0,1534$

За таблицею критичних точок розподілу χ^2 (додаток Г) при рівні значущості $\alpha = 0,01$ та числі ступенів вільності $\nu = i - 1 = 5 - 1 = 4$ знаходимо критичну точку $k_{кр} = \chi_{кр}^2(\alpha; \nu) = \chi_{кр}^2(0,01; 4) = 13,277$.

Оскільки $\chi_{емп}^2 = 0,1534 < \chi_{кр}^2 = 13,277$, то немає підстав відхиляти нульову гіпотезу. Малі значення $\chi_{емп}^2$ свідчать на користь нульової $\chi_{емп}^2$ гіпотези, що різниця між частотами не дуже значні і вони узгоджені та невеликі відхилення вписуються в випадкові коливання. Чим менше відрізняються спостерігаємі та очікувані частоти, тим ближче до нуля критерій $\chi_{емп}^2$.

Нульова гіпотеза вважається вірною, поки не доведено, що вона є помилковою.

Для перевірки нульової гіпотези використовуємо метод дослідження за допомогою р-значення (p-value).

Для отримання повної користі від інформації, яка доступна у результаті статистичної гіпотези більш обґрунтованого рішення, корисно визначити міру кількості статистичних фактів, які підтримують альтернативну гіпотезу. Таку міру та можливість оцінити найменшу ймовірність припущення помилки першого типу падає р-значення. Цей метод використовується, в основному, для розрахунків з використанням комп'ютера та статистичного програмного забезпечення [3].

За допомогою формули 3.8 та програмного процесора Microsoft Excel визначаємо значення $p\text{-value}=0,997$. Чим менше р-значення, тим більше статистичних факторів на користь підтримки альтернативної гіпотези. Значення $p\text{-value}=0,997$ значно більше встановленого рівня значущості $\alpha = 0,01$ 99,7 %, значить нульова гіпотеза не відхиляється.

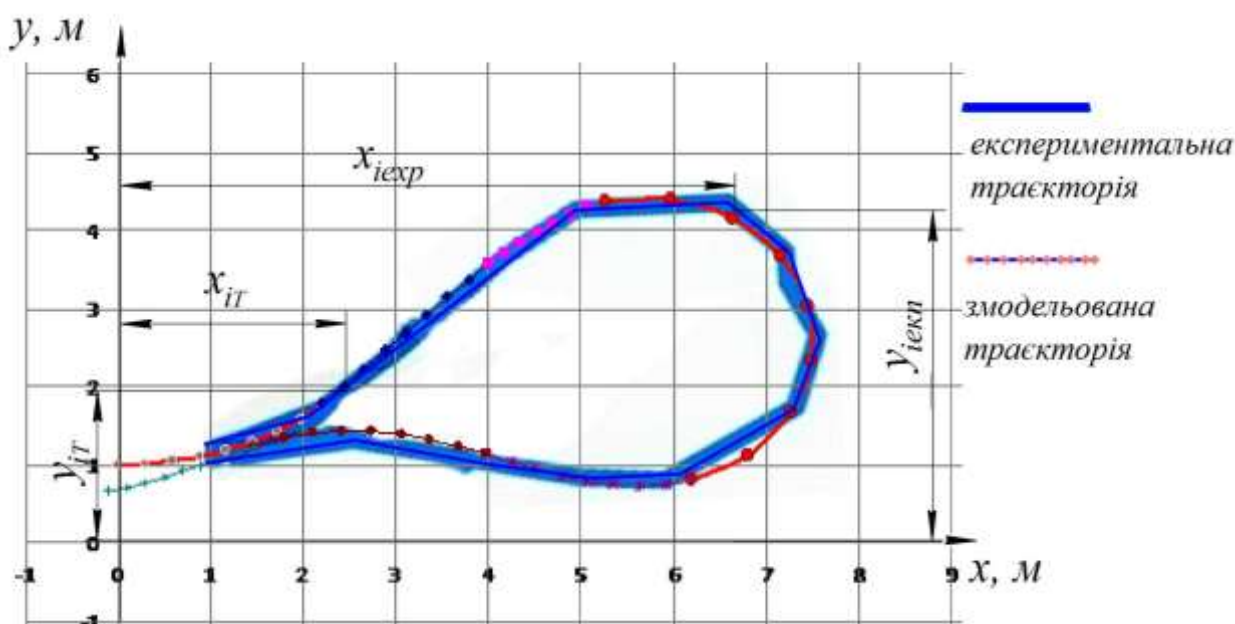


Рисунок 4.3 – Сумісний перебіг змодельованого та відтвореного розвороту модельного енергетичного засобу з передніми керованими колесами та все керовані колеса по колу маневру 2: довжина та час розвороту $S_{\text{exp}} = 17,75 \text{ м}$;

$$t_{\text{exp}} = 10,4 \text{ с}; S_T = 18,8 \text{ м}; t_T = 11,06 \text{ с}$$

Таблиця 4.25 – Результат статистичної обробки координат експериментальної та змодельованої траєкторій маневру 2 за допомогою коефіцієнта кореляції Пірсона

№ точ ки	Координати змодельованої траєкторії маневру		Координати експериментальної траєкторії маневру		Коефіцієнт Пірсона
	$x_{\text{Теор}}$	$y_{\text{Теор}}$	$x_{\text{Екс}}$	$y_{\text{Екс}}$	
1	2	3	4	5	6
Вхід в лівий поворот з передніми керованими колесами					
1.	0	1,00	0	1,000	0,9979
2.	0,30	1,02	0,30	1,000	
3.	0,59	1,05	0,59	1,020	
4.	0,88	1,11	0,88	1,070	
5.	1,17	1,19	1,17	1,140	
6.	1,45	1,29	1,45	1,250	
7.	1,72	1,43	1,72	1,370	
8.	1,97	1,59	1,97	1,530	
9.	2,20	1,79	2,20	1,730	
Вихід в лівого повороту з передніми керованими колесами					
10.	2,44	2,00	2,44	1,85	0,9985
11.	2,66	2,23	2,66	2,05	
12.	2,89	2,46	2,89	2,25	
13.	3,11	2,69	3,11	2,48	
14.	3,33	2,92	3,33	2,7	
15.	3,55	3,15	3,55	2,92	
16.	3,78	3,37	3,78	3,15	
17.	4,02	3,59	4,02	3,4	
Вхід в правий поворот всі керовані колеса					
18.	4,18	3,72	4,18	3,52	0,9534
19.	4,35	3,86	4,35	3,65	
20.	4,52	3,98	4,52	3,78	
21.	4,70	4,10	4,70	3,9	
22.	4,88	4,21	4,88	4,05	
23.	5,07	4,30	5,07	4,2	
24.	5,27	4,38	5,27	4,4	
25.	5,48	4,43	5,48	4,6	

1	2	3	4	5	6
Правий поворот (колова траєкторія) всі керовані колеса					
26.	5,97	4,40	5,97	4,6	0,9982
27.	6,63	4,15	6,63	4,4	
28.	7,15	3,67	7,15	3,9	
29.	7,45	3,04	7,45	3,4	
30.	7,49	2,34	7,49	2,7	
31.	7,27	1,67	7,27	1,9	
32.	6,81	1,13	6,81	1,4	
33.	6,19	0,81	6,19	1,1	
Вихід в правого повороту всі керовані колеса					
34.	5,91	0,75	5,9122	0,9	0,8838
35.	5,63	0,73	5,6305	0,85	
36.	5,35	0,74	5,348	0,84	
37.	5,07	0,79	5,0677	0,9	
38.	4,79	0,85	4,7913	0,98	
39.	4,52	0,94	4,5188	1,09	
40.	4,25	1,04	4,2496	1,2	
41.	3,98	1,15	3,982	1,3	
Вхід в лівий поворот з передніми керованими колесами					
42.	3,68	1,25	3,68	1,4	0,9975
43.	3,37	1,33	3,37	1,48	
44.	3,06	1,39	3,06	1,55	
45.	2,74	1,43	2,74	1,59	
46.	2,42	1,44	2,42	1,6	
47.	2,11	1,41	2,11	1,58	
48.	1,79	1,35	1,79	1,5	
49.	1,48	1,24	1,48	1,4	
Вихід з лівого повороту з передніми керованими колесами					
50.	1,29	1,16	1,29	1,35	0,9916
51.	1,09	1,08	1,09	1,29	
52.	0,89	1,00	0,89	1,22	
53.	0,69	0,92	0,69	1,14	
54.	0,49	0,85	0,49	1,05	
55.	0,29	0,78	0,29	0,98	
56.	0,09	0,72	0,09	0,91	
57.	-0,12	0,67	-0,12	0,85	
Загальний коефіцієнт Пірсона					0,9744

Відповідно до значення коефіцієнта кореляції Пірсона 0,9744 між параметрами встановлений тісний функціональний зв'язок. Коефіцієнт Пірсона показує (фіксує) тісноту лінійного зв'язку між двома вибірками випадкових величин, є мірою тісноти зв'язку між двома ознаками, коли між ними встановлений лінійний зв'язок.

Відповідно до методики визначення критерію узгодженості Пірсона формуємо нульову гіпотезу H_0 : полягає в тому, що координати відтвореної траєкторії з координатами змодельованою траєкторією польового маневру узгоджені, тобто фактичні дані не суперечать очікуванім, відрізняються незначуще. Обсяг вибірки складає 57 точок.

Записуємо обсяг вибірки у вигляді інтервального розподілу і отримуємо 6 інтервалів з шагом 2 одиниці. Обчислюємо теоретичні та емпіричні ймовірності потрапляння p_{ie} , p_{it} випадкової величини Y в інтервал за формулою 3.5, визначаємо теоретичні $\bar{n}_i$ та емпіричні частоти n_i об'єму вибірки за формулами 3.6, 3.7, результати розрахунків зводимо до таблиці 4.26.

Таблиця 4.26 – Теоретичні, емпіричні ймовірності потрапляння та теоретичні та емпіричні частоти об'єму вибірки

№ з/п	$S_{it}, мм$	$S_{ie}, мм$	p_{it}	p_{ie}	$\bar{n}_i = 57 p_{it}$	n_{ie}
1	53,7	75,365	0,0212	0,03	1,2	1,7
2	448,65	498,98	0,177	0,198	10,08	11,3
3	1263,365	1224,73	0,496	0,485	28,28	27,6
4	770,55	729,94	0,3038	0,289	17,3	16,5
Σ	2536,265	2529,015				

Далі розраховуємо емпіричне значення критерію узгодження Пірсона за формулою 3.4 та результат обчислень розрахунків зводимо до таблиці 4.27.

Таблиця 4.27 – Емпіричне значення критерію узгодження Пірсона

i	Δi	n_{ie}	$\bar{n}_i$	$n_i - \bar{n}_i$	$(n_i - \bar{n}_i)^2$	$\frac{(n_i - \bar{n}_i)^2}{\bar{n}_i}$
1	0–2	2	1	1	1	1
2	2–4	11	10	1	1	0,1
3	4–6	28	29	-1	1	0,0345
4	6–8	16	17	-1	1	0,059
		57	57			$\chi_{емп}^2 = 1,1935$

За таблицею критичних точок розподілу χ^2 (додаток Г) при рівні значущості $\alpha = 0,01$ та числі ступенів вільності $\nu = i - 1 = 4 - 1 = 3$ знаходимо критичну точку $k_{кр} = \chi_{кр}^2(\alpha; \nu) = \chi_{кр}^2(0,01; 3) = 11,345$.

Оскільки $\chi_{емп}^2 = 1,1935 < \chi_{кр}^2 = 11,345$, то немає підстав відхиляти нульову гіпотезу. Малі значення $\chi_{емп}^2$ свідчать на користь нульової $\chi_{емп}^2$ гіпотези, що різниця між частотами не дуже значні і вони узгоджені та невеликі відхилення вписуються в випадкові коливання. Чим менше відрізняються спостерігаємі та очікувані частоти, тим ближче до нуля критерій $\chi_{емп}^2$.

Нульова гіпотеза вважається вірною, поки не доведено, що вона є помилковою. Для перевірки нульової гіпотези використовуємо метод дослідження за допомогою р-значення (p-value). Для отримання повної користі від інформації, яка доступна у результаті статистичної гіпотези більш обґрунтованого рішення, корисно визначити міру кількості статистичних фактів, які підтримують альтернативну гіпотезу. Таку міру та можливість оцінити найменшу ймовірність припущення помилки першого типу падає р-значення. Цей метод використовується, в основному, для розрахунків з використанням комп'ютера та статистичного програмного забезпечення [3].

За допомогою формули 3.8 та програмного процесора Microsoft Excel визначаємо значення $p\text{-value}=0,7546$. Чим менше p -значення, тим більше статистичних факторів на користь підтримки альтернативної гіпотези. Значення $p\text{-value}=0,7546$ значно більше встановленого рівня значущості $\alpha = 0,01$ 75,46 %, значить нульова гіпотеза не відхиляється.

4.5 Висновки по розділу 4

В результаті проведеного експерименту за допомогою GPS навігації та додатку до планшету на прикладі модельного енергетичного засобу було відтворено траєкторії трьох маневрів: 1 – грушопобідний розворот з передніми керованими колесами; 2 – вхід (вихід) в лівий (правий) поворот з передніми керованими колесами та рух по колу зі всіма керованими колесами та 3 – крабовий рух. Під час проведення статистичної обробки даних координат змодельованих траєкторій маневрів на відповідність до координат експериментальних маневрів були отримані: значення коефіцієнту кореляції Пірсона, значення критерію узгодженості Пірсона та рівня значущості $p\text{-value}$.

Для маневру – 1 коефіцієнт кореляції Пірсона склав 0,9996; для маневру 2 – 0,9889; для маневру 3 – 0,9744. Оскільки коефіцієнт кореляції Пірсона може змінюватись у діапазоні $[-1; 1]$ і при цьому чим більшим є його абсолютне значення, тим істотніше зв'язок між двома досліджуваними величинами, в даному випадку множинами розрахункових та фактичних координат точок траєкторій маневрів. Отримані значення дають можливість стверджувати, що у всіх в трьох випадках між теоретичними і експериментальними даними існує суттєвий зв'язок.

Для маневру 1 – критерій узгодженості Пірсона дорівнював $\chi^2 = 1,6725 < \chi^2_{kp} = 15,1$; для маневру 2 – $\chi^2 = 0,1534 < \chi^2_{kp} = 13,277$; для маневру 3 – $\chi^2 = 1,1935 < \chi^2_{kp} = 11,345$. Оскільки значення критерію

узгодженості Пірсона всіх трьох маневрів менші за критичні допустимі значення і складають малі величини, то немає підстав відхиляти нульову гіпотезу. Тобто різниця між координатами центра ваги енергетичного засобу зі всіма керованими колесами змодельованої траєкторії маневрів та експериментальними координатами траєкторій цих маневрів практично не значна і є узгодженою, а невеликі відхилення вписуються в випадкові коливання. Виявлено що, зі зменшенням значення критерію узгодженості Пірсона координати змодельованої траєкторії не відрізняються від експериментальних.

Рівень значущості нульової гіпотези отриманих на практиці розподілів оцінювали використавши апроксимації p-value для кожного значення χ^2 , отриманого за порівнянням координат теоретичних маневрів з координатами польових маневрів. Визначено, що для маневру 1 значення p-value складало 0,892; для маневру 2 отримали 0,997; для маневру 3 – 0,7546.

Максимальне значення перевірки нульової гіпотези за допомогою рівня значущості p-value для всіх маневрів складає 1 (100%). Значення цієї величини для всіх 3-х маневрів знаходиться в діапазоні від 75,46% до 99,7%. Рівень значущості становить $\alpha = 0,01$. Це свідчить про те, що відсоток відхилення від встановленого значення вказує на користь нульової гіпотези. Тобто координати відтвореної траєкторії польових маневрів енергетичного засобу зі всіма керованими колесами з координатами змодельованих траєкторій маневрів узгоджені фактично не суперечать експериментальним даним.

Таким чином проведена статистична оцінка на відповідність координат теоретичних маневрів модельного енергетичного засобу з координатами польових траєкторій показала повну ідентичність і достатню відповідність.

Застосування отриманих нами математичних рівнянь та запропонованих алгоритмів для автоматичного водіння дозволить оптимізувати рух агрегатів при виконанні технологічних операцій, а, значить,

покращити експлуатаційні та економічні показники які належить розглянути та оцінити.

Список використаних джерел до розділу 4

1. Методологія та організація наукових досліджень: Конспект лекцій / Укладач В.М. Кислий. – Суми: Вид-во СумДУ, 2009.-113 с.
2. A-GPS Tracker [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.giobat.troviamoci&hl=ru&gl=US>.
3. Зінкевич Т. О. Застосування величини P - значення P - value при перевірці статистичних гіпотез / Т. О. Зінкевич, В. П. Лісовська, В. Д. Стасюк. // Журнал Ринок цінних паперів України. – 2012. – С. 89–94.
4. Моцний Ф. В. Аналіз непараметричних і параметричних критеріїв перевірки статистичних гіпотез. Частина I. Критерії узгодження Пірсона і Колмогорова / Ф. В. Моцний // Статистика України. - 2018. - № 4. - С. 14-24. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/su_2018_4_4.
5. Статистична обробка і оформлення результатів експериментальних досліджень (із досвіду написання дисертаційних робіт): Навчальний посібник / О.В. Кисельов, І.Б. Комарова, Д.О. Мілько, Р.О. Бакарджієв, за заг. ред. Д. О. Мілька; Інститут механізації тваринництва НААН. - Електронний аналог друкованого видання (електронна книга). - Запоріжжя: СТАТУС, 2017. - 1181 с., 482 табл., 379 іл., додатк. 9 (147 табл., 9 іл.).
6. Моцний Ф.В. Сучасний базовий інструментарій математичної статистики. Ч. I, II // Науковий вісник НАСОНА. 2015. № 2, С. 16–29. № 3, С. 14–25.
7. Моцний Ф.В. Статистичні розподіли хі-квадрат, Стюдента, Фішера – Снедекора та їх застосування // Статистика України. 2018. № 31 (80). С. 16–23.

8. Руденко В.М. Математична статистика: навч. посібник. Київ: Центр учбової літератури, 2012. 304 с.

9. Сіренко Ю.В. Дослідження та обґрунтування ефективних прийомів використання польових агрегатів : дис. ... д-ра філософії у галузі 20 Аграр. науки та продовольство : 133 Галузеве машинобудування / Сумський національний аграрний університет. Суми, 2021. 198 с. URL: https://drive.google.com/file/d/1iwvQ81FZafecKG8BSI6WlaCKWx-1p_8j/view (дата звернення: 12.01.2025).

РОЗДІЛ 5

ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ АЛГОРИТМІВ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВОДІННЯ АГРЕГАТІВ

5.1 Вивчення класичних методик розрахунку техніко-експлуатаційних показників МТА

Ефективна робота машинно-тракторного агрегату (надалі МТА) полягає в збільшенні його продуктивності та зменшенні затрат часу і палива під час виконання технологічної операції.

Якісне виконання будь-якої технологічної операції залежить від певних чинників, а саме: енергетичних показників як трактора так сільськогосподарської машини; правильності комплектування (агрегатування) під час їх використання. Неправильне комплектування призводить до неефективного завантаження двигуна та швидкості руху всього МТА при виконанні сільськогосподарської операції.

Неефективне агрегатування та регулювання призводить до збільшення питомого опору сільськогосподарської машини, а це в свою чергу до збільшення витрат пального.

Одним із елементів, який впливає на збільшення продуктивності МТА є вибір швидкісного режиму роботи агрегату з врахуванням зчеплення ходових систем енергозасобу з ґрунтом [1]. Але слід зауважити, що зі збільшенням швидкості руху можливе погіршення якості виконання технологічної операції, а не недопустимо.

Збільшення, або зменшення, значення тягового коефіцієнта корисної дії призводить до відповідної витрати палива та продуктивності машинного агрегату.

Тому особливу увагу необхідно приділяти швидкісному режиму роботи енергетичного засобу та конструктивним особливостям сільськогосподарської машини (знаряддя).

Отже, головним показником ефективного використання машинно-тракторного агрегату є його продуктивність.

На продуктивність відповідного машинно-тракторного агрегату впливають багато факторів, таких як:

- витрата палива (годинна, змінна чи то питома);
- кінематичні дані агрегату, як енергозасобу так і сільськогосподарської машини (їх довжина та ширина);
- спосіб руху агрегату (особливо на поворотних смугах);
- опір сільськогосподарської машини в складі з енергетичним засобом;
- швидкість руху (з врахуванням буксування рушіїв енергозасобу на відповідних передачах);
- час, який витрачається на чисту роботу та на холості переїзди.

Для забезпечення даного показника необхідно: підтримання як енергетичного засобу так і сільськогосподарської машини в технічносправному стані; вчасно проводити технічне обслуговування; максимально використовувати ширину захвату машини та швидкість руху енергетичного засобу.

Отже основним резервом для підвищення продуктивності машинно-тракторного агрегату є коефіцієнт використання робочих ходів, який що показує ступінь використання на корисну роботу загального шляху агрегату в загінці, і є важливою характеристикою обраного способу руху, і являється відношенням сумарного робочого шляху агрегату на загінці до всього пройденого шляху [7].

Для розрахунку вищенаведених факторів, які визначають техніко-експлуатаційні показники МТА, нами було використано загальновідомі формули (додаток Г).

Провівши аналіз всіх відомих методик для розрахунку показників ефективності використання польових агрегатів можемо сказати, що основними є:

- продуктивність агрегату, як змінна так і годинна $\omega_{зм}(\omega_{год})$;
- витрата палива (на одиницю площі під час виконання технологічної операції) $G_{за}$;
- коефіцієнти: використання часу зміни і робочих ходів τ та φ відповідно [1, 16-26, 29].

Дані показники безпосередньо залежать від такого фактору як: холостий хід агрегату, а саме його довжина, на поворотних смугах під час виконання технологічних операцій.

Майже 12% шляху припадає на холості ходи (заїзди, переїзди та розвороти) від загального шляху під час виконання технологічної операції на полі. Тому такі ходи необхідно зменшувати до мінімуму для ефективного використання польового агрегату [29].

5.2 Застосування запропонованого методу моделювання для виконання різних маневрів польовим агрегатом в складі: трактора (Claas Xerion 5000 Trac) і борони (Lemken Gigant 10/1200 Heliodor 9)

Повний розворот маневрів складається з ділянок: вхід-вихід лівий поворот, вхід-вихід правий поворот, колова траєкторія (правий поворот). Наглядне зображення ефективності застосування алгоритмів при автоматизації водіння під час маневрів з використанням енегетичного засобу Claas Xerion 5000 Trac та дискової борони Lemken Gigant 10/1200 Heliodor 9 наведено в таблицях 5.1 – 5.14 та рисунку 5.2.

Для кожної ділянки маневрів були отримані вихідні параметри для спряження повного розвороту.



Рисунок 5.1 – Трактор (Claas Xerion 5000 Trac) і борона (Lemken Gigant 10/1200 Heliodor 9)

5.2.1 Результат моделювання кожної ділянки маневру 1 – петлевидний розворот з передніми керованими колесами

На основі запропонованих алгоритмів маневру з передніми колесами керування отримали результат моделювання кожної ділянки маневру 1 –

петлевидний розворот з передніми керованими колесами (рис. 5.2): вхід в лівий та вихід поворот, вхід в правий та вихід повороту, правий поворот.

Прийmemo початкові для всіх ділянок сталі параметри: $v = 2,00$ м/с;
 $\ell_1 = 1,575$ м; $\ell_2 = 1,925$ м; $R_{\min} = 7,85$; шлях $S = vt$.

Ділянка 1 маневру 1 «лівий поворот» вхід.

Користуючись значенням мінімального радіуса кривизни траєкторії повороту, визначаємо максимального число повороту коліс: передніх коліс
 $\alpha_{1K_{\text{пер}}} = \ell / R_{\min} = 3,5 / 7,85 = 0,446 \text{ рад} = 25,55^\circ$.

Приймаємо значення на початку входу в поворот курсового кута: передніх коліс $\alpha_{no} = 2^\circ = 0,035 \text{ рад}$, загальний початковий кут $\alpha_o = \alpha_{no} + \alpha_{zo} = 0,2452 \text{ рад}$ та в кінці лівого повороту курсовий кут становитиме: для передніх коліс
 $\alpha_{k_{\max}} = \alpha_{K1_{\text{пер}}} = \alpha_{1K} \ell_2 / L = 0,44586 \cdot 1,925 / 3,5 = 0,2452 \text{ рад} = 14,05^\circ$. Час входу маневру $t = 1,0$ с.

Після чого число коефіцієнту зміни інтенсивності кута курсового
 $k = k_{II} = \alpha_k - \alpha_o / t = 0,2452 - 0,035 / 1,0 = 0,2102 \text{ с}^{-1}$ і кут наприкінці повороту
рами трактора
$$\varphi = v \left(\frac{\alpha_{no}t + 0,5k_n t^2}{\ell_2} + \frac{\alpha_{zo}t + 0,5k_z t^2}{\ell_1} \right),$$

$$\varphi_k = 2,0 \cdot ((0,035 \cdot 1,5 + 0,5 \cdot 0,2102 \cdot 1,5^2) / 1,925) = 0,218 \text{ рад} = 12,5^\circ.$$

Час входу розділяємо $t = 1,5$ с на проміжні значення та рахуємо (2.37) для кожної точки t координати x_i і y_i в системі $x_1 y_1$ зі значенням кутів α і φ згідно формул (2.35), а також з системи координат зальної xu значення x і y згідно формул (2.41). Початкове значення $\theta_1 = 0$.

Чисельний розрахунок зведений до таблиці 5.1.

Ділянка 2 маневру 1 «лівий поворот» вихід.

Число з початку та наприкінці ділянки курсового кута:
 $\alpha_o = 0,0733 \text{ рад} = 4,2^\circ$, $\alpha_k = 0$. Час виходу з ділянки $t = 1,5 \text{ с}$.

Число коефіцієнту інтенсивності буде
 $k = (\alpha_{K_{\text{кінц}}} - \alpha_{\text{поч}}) / t = (0 - 0,2452) / 1,5 = -0,1635 \text{ с}^{-1}$.

$$\varphi_k = 2,0 \cdot ((0,2452 \cdot 1,5 + 0,5 \cdot (-0,1635) \cdot 1,5^2) / 1,925) = 0,1624 \text{ рад} = 9,31^\circ.$$

Таблиця 5.1 – Ділянка 1 маневру 1 «лівий поворот» вхід

№ з/п	t , с	x_i , м	y_i , м	α , $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	φ , $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	S , м	R , м	x , м	y , м
1	0	0	0	0,0349	0	0	55,18	0	6,0
				2	0				
2	0,19	0,37	0,02	0,0612	0,0094	0,38	31,46	0,37	6,02
				3,51	0,54				
3	0,38	0,75	0,05	0,0875	0,0238	0,75	22,01	0,75	6,05
				5,01	1,37				
4	0,56	1,12	0,10	0,1138	0,0434	1,13	16,92	1,12	6,10
				6,52	2,49				
5	0,75	1,49	0,17	0,1401	0,0682	1,5	13,74	1,49	6,17
				8,03	3,91				
6	0,94	1,85	0,26	0,1663	0,0980	1,88	11,57	1,85	6,26
				9,54	5,62				
7	1,13	2,21	0,37	0,1926	0,1330	2,25	9,99	2,21	6,37
				11,04	7,62				
8	1,31	2,56	0,51	0,2189	0,1731	2,63	8,79	2,56	6,51
				12,55	9,92				
9	1,5	2,90	0,67	0,2452	0,2183	3,0	7,85	2,90	6,67
				14,06	12,51				

Вісі x_2y_2 розташовані до осей x_1 під кутом $\theta_2 = \varphi_{\kappa 1} = 12,51^\circ$.

Чисельний розрахунок зведений до таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Ділянка 2 маневру 1 «лівий поворот» вихід

№ з/П	$t, \text{с}$	$x_i, \text{м}$	$y_i, \text{м}$	$\alpha, \frac{\text{рад}}{\text{град}}$	$\varphi, \frac{\text{рад}}{\text{град}}$	$S, \text{м}$	$R, \text{м}$	$x, \text{м}$	$y, \text{м}$
1	0	0	0	0,245	0	0	7,85	2,90	6,67
				14,06	0				
2	0,19	0,36	0,09	0,215	0,045	0,38	8,97	3,24	6,84
				12,30	2,57				
3	0,38	0,72	0,19	0,184	0,084	0,75	10,47	3,57	7,01
				10,54	4,79				
4	0,56	1,09	0,29	0,153	0,116	1,13	12,56	3,90	7,19
				8,79	6,67				
5	0,75	1,45	0,40	0,123	0,143	1,50	15,70	4,23	7,37
				7,03	8,22				
6	0,94	1,81	0,49	0,092	0,164	1,88	20,93	4,56	7,54
				5,27	9,41				
7	1,13	2,17	0,59	0,061	0,179	2,25	31,40	4,90	7,71
				3,51	10,27				
8	1,31	2,54	0,67	0,031	0,188	2,63	62,80	5,24	7,87
				1,76	10,78				
9	1,5	2,91	0,75	0	0,191	3,0	∞	5,58	8,03
				0	10,95				

Ділянка 3 маневру 1 «правий поворот» вхід.

Користуючись значенням мінімального радіуса кривизни траєкторії повороту, визначаємо максимального число повороту коліс: передніх коліс $\alpha_{1Kпер} = \ell / R_{\min} = 3,5 / 7,85 = 0,446 \text{ рад} = 25,55^\circ$.

Приймаємо значення на початку входу ділянки курсового кута: передніх коліс $\alpha_{no} = 0$, загальний початковий кут $\alpha_o = \alpha_{no} + \alpha_{zo} = 0$ та в кінці правого повороту курсовий кут становитиме: для передніх коліс $\alpha_{\kappa \max} = -0,2452 \text{ рад} = -14,05^\circ$.

Час входу маневру $t=1,5$ с. Після чого число коефіцієнту зміни інтенсивності кута курсового $k = k_{II} = \alpha_k - \alpha_o / t = -0,2452 - 0/1,5 = -0,1635 \text{ c}^{-1}$ і кут наприкінці повороту рами трактора, $\varphi_k = 2,0 \cdot ((0 + 0,5 \cdot 0,1635 \cdot 1,5^2) / 1,925) = -0,191 \text{ рад} = -10,95^\circ$.

Вісі $x_3 y_3$ розташовані до осей $x y$ під кутом $\theta_3 = \theta_2 + \varphi_2 = 23,47^\circ$.

Чисельний розрахунок зведений до таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Ділянка 3 маневру 1 «правий поворот» вхід

№ з/п	$t, \text{ c}$	$x_i, \text{ м}$	$y_i, \text{ м}$	$\alpha, \frac{\text{рад}}{\text{град}}$	$\varphi, \frac{\text{рад}}{\text{град}}$	$S, \text{ м}$	$R, \text{ м}$	$x, \text{ м}$	$y, \text{ м}$
1	0	0	0	0	0	0	∞	5,58	8,03
				0	0				
2	0,19	0,37	-0,01	-0,0307	-0,0030	0,38	-62,8	5,92	8,17
				-1,76	-0,17				
3	0,38	0,75	-0,03	-0,0613	-0,0119	0,75	-31,4	6,28	8,30
				-3,51	-0,68				
4	0,56	1,12	-0,06	-0,0920	-0,0269	1,13	-20,93	6,63	8,42
				-5,27	-1,54				
5	0,75	1,49	-0,12	-0,1226	-0,0478	1,50	-15,7	6,99	8,52
				-7,03	-2,74				
6	0,94	1,86	-0,19	-0,1533	-0,0746	1,88	-12,56	7,36	8,59
				-8,79	-4,28				
7	1,13	2,22	-0,29	-0,1839	-0,1075	2,25	-10,47	7,73	8,65
				-10,54	-6,16				
8	1,31	2,58	-0,41	-0,2146	-0,1463	2,63	-8,97	8,11	8,68
				-12,30	-8,39				
9	1,50	2,92	-0,56	-0,2452	-0,1911	3,00	-7,85	8,48	8,68
				-14,06	-10,95				

Ділянка 4 маневру 1 - правий поворот (рух по колу).

Число з початку та наприкінці ділянки курсового кута буде сталим і рівним: $\alpha_o = \alpha_k = -0,2452 \text{ рад} = -14,06^\circ = \text{const}$.

Час ділянки $t = 13,15 \text{ c}$.

Число коефіцієнту інтенсивності буде
 $k = (\alpha_{K_{кінц}} - \alpha_{поч}) / t = (0 - 0,2452) / 1,5 = -0,1635 \text{ c}^{-1}$ і кут наприкінці повороту
 рами трактора $\varphi_k = 2,0 \cdot ((0 + 0,5 \cdot 0,1635 \cdot 13,15^2) / 1,925) = -3,35 \text{ рад} = -192,1^\circ$.
 Вісі $x_4 y_4$ розташовані до осей xu під кутом $\theta_4 = \theta_3 + \varphi_{k3} = 12,51^\circ$.

Чисельний розрахунок зведений до таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Ділянка 4 маневру 1 «правий поворот»

№ з/п	$t, \text{ c}$	$x_i, \text{ м}$	$y_i, \text{ м}$	$\varphi, \text{ рад}$	$\varphi, \text{ град}$	$S, \text{ м}$	$x, \text{ м}$	$y, \text{ м}$
1	0	0	0	0	0	0	8,48	8,68
2	1,64	2,93	-1,43	-0,419	-24,01	3,29	11,28	7,91
3	3,29	5,03	-3,93	-0,838	-48,01	6,58	13,87	5,93
4	4,93	5,93	-7,07	-1,256	-72,02	9,86	15,42	3,06
5	6,58	5,47	-10,30	-1,675	-96,03	13,15	15,68	-0,20
6	8,22	3,74	-13,07	-2,094	-120,04	16,44	14,59	-3,27
7	9,86	1,03	-14,89	-2,513	-144,04	19,73	12,34	-5,64
8	11,51	-2,18	-15,46	-2,932	-168,05	23,01	9,32	-6,89
9	13,15	-5,35	-14,67	-3,350	-192,06	26,30	6,06	-6,80

Ділянка 5 маневру 1 «правий поворот» вихід.

Число з початку та наприкінці ділянки курсового кута:
 $\alpha_o = 0,0733 \text{ рад} = 4,2^\circ$, $\alpha_k = 0$.

Час виходу з ділянки $t = 1,5 \text{ c}$.

Число коефіцієнту інтенсивності буде
 $k = (\alpha_{K_{кінц}} - \alpha_{поч}) / t = (0 - 0,2452) / 1,5 = -0,1635 \text{ c}^{-1}$ і кут наприкінці повороту
 рами трактора $\varphi_k = 2,0 \cdot ((0 + 0,5 \cdot 0,1635 \cdot 13,15^2) / 1,925) = -3,35 \text{ рад} = -192,1^\circ$.
 Вісі $x_5 y_5$ розташовані до осей xu під кутом $\theta_5 = \theta_4 + \varphi_4 = -179,54^\circ$.
 Чисельний розрахунок зведений до таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Ділянка 5 маневру 1 «правий поворот» вихід

№ з/П	$t, \text{с}$	$x_i, \text{м}$	$y_i, \text{м}$	$\alpha, \frac{\text{рад}}{\text{град}}$	$\varphi, \frac{\text{рад}}{\text{град}}$	$S, \text{м}$	$R, \text{м}$	$x, \text{м}$	$y, \text{м}$
1	0	0	0	-0,245	0	0	-7,85	6,06	-6,80
				-14,06	0				
2	0,19	0,36	-0,09	-0,215	-0,0448	0,38	-8,97	5,70	-6,71
				-12,30	-2,57				
3	0,38	0,72	-0,19	-0,184	-0,0836	0,75	-10,47	5,33	-6,62
				-10,54	-4,79				
4	0,56	1,09	-0,29	-0,153	-0,1164	1,13	-12,56	4,97	-6,52
				-8,79	-6,67				
5	0,75	1,45	-0,40	-0,123	-0,1433	1,50	-15,70	4,61	-6,42
				-7,03	-8,22				
6	0,94	1,81	-0,49	-0,092	-0,1642	1,88	-20,93	4,25	-6,33
				-5,27	-9,41				
7	1,13	2,17	-0,59	-0,061	-0,1791	2,25	-31,40	3,88	-6,24
				-3,51	-10,27				
8	1,31	2,54	-0,67	-0,031	-0,1881	2,63	-62,80	3,52	-6,15
				-1,76	-10,78				
9	1,5	2,91	-0,75	0	-0,1911	3,00	∞	3,15	-6,08
				0	-10,95				

Ділянка 6 маневру 1 «лівий поворот» вхід.

Приймаємо значення на початку входу в поворот курсового кута: передніх коліс $\alpha_{no} = 0$, загальний початковий кут $\alpha_o = \alpha_{no} + \alpha_{zo} = 0$ та в кінці лівого повороту курсовий кут становитиме: для передніх коліс $\alpha_{\kappa \max} = \alpha_{K1nep} = \alpha_{1K} \ell_2 / L = 0,44586 \cdot 1,925 / 3,5 = 0,2452 \text{ рад} = 14,05^\circ$. Час входу маневру $t = 1,0 \text{ с}$. Після чого число коефіцієнту зміни інтенсивності кута курсового $k = k_{II} = \alpha_{\kappa} - \alpha_o / t = 0,2452 - 0 / 1,0 = 0,2452 \text{ с}^{-1}$ і кут наприкінці повороту рами трактора $\varphi_{\kappa} = 2,0 \cdot ((0 + 0,5 \cdot 0,2452 \cdot 1,0^2) / 1,925) = 0,1274 \text{ рад} = 7,3^\circ$. Вісі $x_6 y_6$ розташовані до осей x_u під кутом $\theta_6 = \theta_5 + \varphi_5 = -190,5^\circ$. Чисельний розрахунок зведений до таблиці 5.6.

Таблиця 5.6 – Ділянка 6 маневру 1 «лівий поворот» вхід

№ з/п	t , с	x_i , м	y_i , м	α , $\frac{рад}{град}$	φ , $\frac{рад}{град}$	S , м	R , м	x , м	y , м
1	0	0	0	0	0	0	∞	3,15	-6,08
				0	0				
2	0,13	0,25	0,004	0,031	0,0020	0,25	62,80	2,90	-6,04
				1,76	0,11				
3	0,25	0,5	0,02	0,061	0,0080	0,50	31,40	2,65	-6,01
				3,51	0,46				
4	0,38	0,75	0,04	0,092	0,0179	0,75	20,93	2,41	-5,98
				5,27	1,03				
5	0,50	0,99	0,07	0,123	0,0318	1,00	15,70	2,16	-5,97
				7,03	1,83				
6	0,63	1,24	0,12	0,153	0,0498	1,25	12,56	1,91	-5,97
				8,79	2,85				
7	0,75	1,49	0,17	0,184	0,0717	1,50	10,47	1,66	-5,98
				10,54	4,11				
8	0,88	1,73	0,25	0,215	0,0975	1,75	8,97	1,41	-6,01
				12,30	5,59				
9	1	1,96	0,33	0,245	0,1274	2,00	7,85	1,16	-6,05
				14,06	7,30				

Ділянка 7 маневру 1 «лівий поворот» вихід.

Приймаємо значення на початку виходу з повороту курсового кута: передніх коліс $\alpha_{no} = 0,2452 \text{ рад} = 14,06^\circ$, загальний початковий кут $\alpha_o = \alpha_{no} + \alpha_{zo} = 0,2452 \text{ рад} = 14,06^\circ$ та в кінці лівого повороту курсовий кут становитиме: для передніх коліс $\alpha_{k \max} = 0$. Час входу маневру $t = 0,6 \text{ с}$. Після чого число коефіцієнту зміни інтенсивності кута курсового $k = k_{II} = \alpha_k - \alpha_o / t = 0 - 0,2452 / 0,6 = -0,4087 \text{ с}^{-1}$ і кут наприкінці повороту трактора $\varphi_k = 2,0 \cdot ((0,2452 \cdot 0,6 + 0,5 \cdot (-0,4087) \cdot 1,0^2) / 1,925) = 0,0764 \text{ рад} = 4,38^\circ$. Вісі

x_7, y_7 розташовані до осей x, y під кутом $\theta_7 = \theta_6 + \varphi_6 = -183,2^\circ$. Чисельний розрахунок зведений до таблиці 5.7.

Таблиця 5.7 – Ділянка 7 маневру 1 «лівий поворот» вихід

№ з/п	t , с	x_i , м	y_i , м	α , $\frac{рад}{град}$	φ , $\frac{рад}{град}$	S , м	R , м	x , м	y , м
1	0	0	0	0,245	0	0	7,85	1,16	-6,05
				14,06	0				
2	0,08	0,15	0,04	0,215	0,0179	0,150	8,97	1,01	-6,08
				12,30	1,03				
3	0,15	0,29	0,07	0,184	0,0334	0,30	10,47	0,86	-6,10
				10,54	1,92				
4	0,23	0,44	0,10	0,153	0,0466	0,450	12,56	0,72	-6,13
				8,79	2,67				
5	0,30	0,59	0,13	0,123	0,0573	0,60	15,70	0,57	-6,15
				7,03	3,29				
6	0,38	0,73	0,15	0,092	0,0657	0,750	20,93	0,42	-6,17
				5,27	3,77				
7	0,45	0,88	0,18	0,061	0,0717	0,90	31,40	0,27	-6,18
				3,51	4,11				
8	0,53	1,03	0,19	0,031	0,0752	1,050	62,80	0,12	-6,19
				1,76	4,31				
9	0,6	1,18	0,21	0	0,0764	1,20	∞	-0,03	-6,20
				0	4,38				

5.2.2 Результат моделювання кожної ділянки маневру 2 – петлевидний розворот зі всіма керованими колесами (рис. 5.2)

Приймемо початкові для всіх ділянок сталі параметри: $v = 2,00$ м/с;
 $\ell_1 = 1,575$ м; $\ell_2 = 1,925$ м; $R_{\min} = 7,85$; шлях $S = vt$.

Ділянка 1 маневру 2 «лівий поворот» вхід.

Користуючись значенням мінімального радіуса кривизни траєкторії повороту, визначаємо максимального число повороту коліс: передніх коліс

$$\alpha_{1Kпер} = \ell / R_{\min} = 3,5 / 7,85 = 0,446 \text{ рад} = 25,55^\circ, \quad \text{задніх} \quad \text{коліс}$$

$$\alpha_{1Kпер} = \ell / R_{\min} = 3,5 / -7,85 = -0,446 \text{ рад} = -25,55^\circ.$$

Приймаємо значення на початку входу в поворот курсового кута: передніх коліс $\alpha_{no} = 2^\circ = 0,035 \text{ рад}$, задніх коліс $\alpha_{so} = -2^\circ = -0,035 \text{ рад}$, загальний початковий кут $\alpha_o = \alpha_{no} + \alpha_{so} = 0,035 - 0,035 = 0$ та в кінці лівого повороту курсовий кут становитиме: для передніх коліс $\alpha_{\kappa \max} = \alpha_{K1пер} = \alpha_{1K} \ell_2 / L = 0,44586 \cdot 1,925 / 3,5 = 0,2452 \text{ рад} = 14,05^\circ$, задніх коліс $\alpha_{\kappa \max} = \alpha_{K2зад} = \alpha_{2K} \ell_1 / L = -0,44586 \cdot 1,575 / 3,5 = -0,2005 \text{ рад} = -11,5^\circ$.

$$\text{Загальний курсовий кут } \alpha_\kappa = \alpha_o + kt = 0 + 0,0446 \cdot 0,5 = 0,0223 \text{ рад} = 1,28^\circ.$$

Час входу маневру $t = 0,5 \text{ с}$. Після чого число коефіцієнту зміни інтенсивності кута курсового: передніх коліс $k_{II} = \alpha_\kappa - \alpha_o / t = (0,2452 - 0,035) / 0,5 = 0,4204 \text{ с}^{-1}$ і задніх коліс $k_3 = \alpha_\kappa - \alpha_o / t = (-0,2006 - (-0,035)) / 0,5 = -0,3312 \text{ с}^{-1}$.

Всього коефіцієнт інтенсивності буде $k = k_{II} + k_3 = 0,4204 - 0,3312 = 0,0892 \text{ с}^{-1}$.

Кут наприкінці повороту рами трактора

$$\varphi = \nu \left(\frac{\alpha_{no} t + 0,5 k_{II} t^2}{\ell_2} + \frac{\alpha_{so} t + 0,5 k_3 t^2}{\ell_1} \right),$$

$$\varphi_K = 2,0 \cdot ((0,035 \cdot 0,5 + 0,5 \cdot 0,4204 \cdot 0,5^2) / 1,925 + (-0,035 \cdot 0,5 + 0,5 \cdot (-0,3312) \cdot 0,5^2) / 1,575) = 0,148 \text{ рад} = 8,45^\circ.$$

Час входу розділяємо $t = 0,5 \text{ с}$ на проміжні значення та рахуємо (2.37) для кожної точки t координати x_i і y_i в системі $x_1 y_1$ зі значенням кутів α і φ згідно формул (2.35), а також з системи координат зальної xu значення x і y згідно формул (2.41). Початкове значення $\theta_1 = 0$.

Чисельний розрахунок зведений до таблиці 5.8.

Таблиця 5.8 – Ділянка 1 маневру 2 «лівий поворот» вхід

№ з/П	t , с	x_i , м	y_i , м	α_{Π} , $\frac{рад}{град}$	α_3 , $\frac{рад}{град}$	α_K , $\frac{рад}{град}$	φ , $\frac{рад}{град}$	S , м	R , м	x , м	y , м
1	0	0	0	0,0349	-0,0349	0	0	0	24,83	0	6,0
				2	-2	0	0				
2	0,06	0,12	0	0,0612	-0,0556	0,0056	0,0067	0,13	14,91	0,12	6,0
				3,51	-3,19	0,32	0,38				
3	0,13	0,25	0	0,0875	-0,0763	0,0111	0,0168	0,25	10,65	0,25	6,0
				5,01	-4,38	0,64	0,96				
4	0,19	0,37	0,01	0,1138	-0,0970	0,0167	0,0302	0,38	8,28	0,37	6,01
				6,52	-5,56	0,96	1,73				
5	0,25	0,50	0,02	0,1401	-0,1178	0,0223	0,0470	0,50	6,78	0,50	6,02
				8,03	-6,75	1,28	2,69				
6	0,31	0,62	0,03	0,1663	-0,1385	0,0279	0,0671	0,63	5,74	0,62	6,03
				9,54	-7,94	1,60	3,84				
7	0,38	0,75	0,04	0,1926	-0,1592	0,0334	0,0905	0,75	4,97	0,75	6,04
				11,04	-9,13	1,92	5,19				
8	0,44	0,87	0,06	0,2189	-0,1799	0,0390	0,1174	0,88	4,39	0,87	6,06
				12,55	-10,31	2,24	6,73				
9	0,5	1,0	0,08	0,2452	-0,2006	0,0446	0,1475	1,0	3,93	1,00	6,08
				14,06	-11,50	2,56	8,46				

Ділянка 2 маневру 2 «лівий поворот» вихід.

Число з початку та наприкінці ділянки курсового кута: передніх коліс $\alpha_{no} = 0,2452 \text{ рад} = 14,05^\circ$, задніх коліс $\alpha_{3o} = -0,2006 \text{ рад} = -11,5^\circ$, загальний початковий кут $\alpha_o = \alpha_{no} + \alpha_{3o} = 0,2452 + (-0,2006) = 0,0446 \text{ рад} = 2,56^\circ$. Час виходу з ділянки $t = 0,5 \text{ с}$. Число коефіцієнта інтенсивності буде: передніх коліс: $k_{\Pi} = \alpha_K - \alpha_o / t = (0 - 0,2452) / 0,5 = -0,4904 \text{ с}^{-1}$ і задніх коліс $k_3 = \alpha_K - \alpha_o / t = (0 - (-0,2006)) / 0,5 = -0,4012 \text{ с}^{-1}$. Всього коефіцієнт інтенсивності буде $k = k_{\Pi} + k_3 = -0,4904 + 0,4012 = -0,0892 \text{ с}^{-1}$.
 $\varphi_K = 2,0 \cdot ((0,2452 \cdot 0,5 + 0,5 \cdot 0,4904 \cdot 0,5^2) / 1,925 + (-0,2006 \cdot 0,5 +$

$+0,5 \cdot (-0,4012) \cdot 0,5^2) / 1,575) = 0,127 \text{ рад} = 7,3^\circ$. Вісі $x_2 y_2$ розташовані до осей $x y$ під кутом $\theta_2 = \varphi_{\kappa 1} = 8,45^\circ$. Чисельний розрахунок зведений до таблиці 5.9.

Таблиця 5.9 – Ділянка 2 маневру 2 «лівий поворот» вихід

№ з/п	$t, \text{с}$	$x_i, \text{м}$	$y_i, \text{м}$	$\alpha_{\Pi}, \frac{\text{рад}}{\text{град}}$	$\alpha_3, \frac{\text{рад}}{\text{град}}$	$\alpha_{\kappa}, \frac{\text{рад}}{\text{град}}$	$\varphi, \frac{\text{рад}}{\text{град}}$	$S, \text{м}$	$R, \text{м}$	$x, \text{м}$	$y, \text{м}$
1	0	0	0	0,2452	-0,2006	0,0446	0	0	3,93	0,99	6,08
				14,06	-72,23	2,56	0				
2	0,06	0,12	0,01	0,2146	-0,1756	0,0390	0,030	0,13	4,49	1,12	6,10
				12,30	-10,06	2,24	1,71				
3	0,13	0,25	0,02	0,1839	-0,1505	0,0334	0,056	0,25	5,23	1,24	6,13
				10,54	-8,63	1,92	3,19				
4	0,19	0,37	0,03	0,1533	-0,1254	0,0279	0,078	0,38	6,28	1,36	6,16
				8,79	-7,19	1,60	4,45				
5	0,25	0,50	0,04	0,1226	-0,1003	0,0223	0,096	0,50	7,85	1,48	6,19
				7,03	-5,75	1,28	5,48				
6	0,31	0,62	0,06	0,0920	-0,0752	0,0167	0,109	0,63	10,47	1,60	6,23
				5,27	-4,31	0,96	6,28				
7	0,38	0,75	0,07	0,0613	-0,0502	0,0111	0,119	0,75	15,70	1,72	6,26
				3,51	-2,88	0,64	6,85				
8	0,44	0,87	0,09	0,0307	-0,0251	0,0056	0,125	0,88	31,40	1,84	6,30
				1,76	-1,44	0,32	7,19				
9	0,50	0,99	0,11	0	0	0	0,127	1	∞	1,96	6,33
				0	0	0	7,30				

Ділянка 3 маневру 2 «правий поворот» вхід.

Визначаємо максимальне число повороту коліс: передніх коліс $\alpha_{1\kappa_{\text{пер}}} = \ell / R_{\min} = 3,5 / -12,5 = -0,28 \text{ рад} = 16,05^\circ$, задніх коліс $\alpha_{1\kappa_{\text{пер}}} = \ell / R_{\min} = 3,5 / 12,5 = 0,28 \text{ рад} = 16,05^\circ$. Приймаємо значення на початку входу в поворот курсового кута: передніх коліс $\alpha_{\Pi 0} = 0$, задніх коліс $\alpha_{30} = 0$, загальний початковий кут $\alpha_o = \alpha_{\Pi 0} + \alpha_{30} = 0$ та в кінці правого повороту курсовий кут становитиме: для передніх коліс $\alpha_{\kappa_{\text{max}}} = \alpha_{\kappa_{1\text{пер}}} = \alpha_{1\kappa} \ell_2 / L = -0,28 \cdot 1,925 / 3,5 = -0,154 \text{ рад} = -8,83^\circ$, задніх коліс

$$\alpha_{\kappa \max} = \alpha_{K23ad} = \alpha_{2K} \ell_1 / L = 0,28 \cdot 1,575 / 3,5 = 0,126 \text{ рад} = 7,22^\circ. \quad \text{Загальний}$$

курсний кут $\alpha_\kappa = \alpha_o + kt = 0 - 0,056 \cdot 0,5 = -0,028 \text{ рад} = -1,6^\circ$. Час входу маневру $t = 0,5 \text{ с}$. Після чого число коефіцієнту зміни інтенсивності кута курсового: передніх коліс $k_\Pi = \alpha_\kappa - \alpha_o / t = (-0,154 - 0) / 0,5 = -0,308 \text{ с}^{-1}$ і задніх коліс $k_3 = \alpha_\kappa - \alpha_o / t = (0,126 - 0) / 0,5 = 0,252 \text{ с}^{-1}$. Всього коефіцієнт інтенсивності буде $k = k_\Pi + k_3 = -0,308 + 0,252 = -0,056 \text{ с}^{-1}$.

$$\begin{aligned} & \text{Кут наприкінці повороту рами трактора} \\ \varphi_\kappa &= 2,0 \cdot \left((0 + 0,5 \cdot (-0,308) \cdot 0,5^2) / 1,925 + (0 + 0,5 \cdot 0,252 \cdot 0,5^2) / 1,575 \right) = \\ &= -0,08 \text{ рад} = -4,58^\circ. \end{aligned}$$

Час входу розділяємо $t = 0,5 \text{ с}$. Вісі $x_3 y_3$ розташовані до осей $x y$ під кутом $\theta_3 = \varphi_{\kappa 2} + \theta_2 = 15,76^\circ$. Чисельний розрахунок зведений до таблиці 5.10.

Таблиця 5.10 – Ділянка 3 маневру 2 «правий поворот» вхід

№ з/П	$t, \text{ с}$	$x_i, \text{ м}$	$y_i, \text{ м}$	$\alpha_\Pi, \frac{\text{рад}}{\text{град}}$	$\alpha_3, \frac{\text{рад}}{\text{град}}$	$\alpha_\kappa, \frac{\text{рад}}{\text{град}}$	$\varphi, \frac{\text{рад}}{\text{град}}$	$S, \text{ м}$	$R, \text{ м}$	$x, \text{ м}$	$y, \text{ м}$
1	0	0	0	0	0	0	0	0	∞	1,96	6,33
				0	0	0	0				
2	0,06	0,12	0	-0,0193	0,0158	-0,0035	-0,001	0,00	-50,0	2,08	6,36
				-1,10	0,90	-0,20	-0,07				
3	0,13	0,25	0	-0,0385	0,0315	-0,0070	-0,005	0,13	-25,0	2,20	6,40
				-2,21	1,81	-0,40	-0,29				
4	0,19	0,37	0	-0,0578	0,0473	-0,0105	-0,011	0,25	-16,67	2,32	6,43
				-3,31	2,71	-0,60	-0,64				
5	0,25	0,50	-0,01	-0,0770	0,0630	-0,0140	-0,020	0,38	-12,50	2,45	6,46
				-4,41	3,61	-0,80	-1,15				
6	0,31	0,62	-0,01	-0,0963	0,0788	-0,0175	-0,031	0,50	-10,0	2,57	6,49
				-5,52	4,51	-1,00	-1,79				
7	0,38	0,75	-0,02	-0,1155	0,0945	-0,0210	-0,045	0,63	-8,33	2,69	6,52
				-6,62	5,42	-1,20	-2,58				
8	0,44	0,87	-0,03	-0,1348	0,1103	-0,0245	-0,061	0,75	-7,14	2,81	6,54
				-7,72	6,32	-1,40	-3,51				
9	0,5	1,0	-0,04	-0,1540	0,1260	-0,0280	-0,080	0,88	-6,25	2,93	6,56
				-8,83	7,22	-1,61	-4,59				

Ділянка 4 маневру 2 - правий поворот (рух по колу).

Число з початку та наприкінці ділянки курсового кута буде сталим і рівним: $\alpha_0 = \alpha_K = -0,028 \text{ рад} = -1,61^\circ = \text{const}$. Час ділянки $t = 10,6 \text{ с}$. Число коефіцієнта інтенсивності буде $k = 0$ і кут наприкінці повороту $\varphi_K = 2,0 \cdot ((-0,154 \cdot 10,6 + 0)/1,925 + (0,126 \cdot 10,6 + 0)/1,575) = -3,39 \text{ рад} = -194,45^\circ$ рами трактора. Вісі $x_4 y_4$ розташовані до осей $x_3 y_3$ під кутом $\theta_4 = \theta_3 + \varphi_{K3} = 11,17^\circ$. Чисельний розрахунок зведений до таблиці 5.11.

Таблиця 5.11 – Ділянка 4 маневру 2 «правий поворот»

№ з/п	t , с	x_i , м	y_i , м	φ , рад	φ , град	S , м	R , м	x , м	y , м
1	0	0	0	0	0	0	-12,5	2,81	6,54
2	1,33	2,55	-0,63	-0,212	-12,15	2,65	-12,5	5,44	6,42
3	2,65	4,63	-2,25	-0,424	-24,31	5,3	-12,5	7,79	5,23
4	3,98	5,85	-4,58	-0,636	-36,46	7,95	-12,5	9,44	3,18
5	5,30	6,00	-7,20	-0,848	-48,61	10,6	-12,5	10,09	0,64
6	6,63	5,06	-9,66	-1,060	-60,76	13,25	-12,5	9,65	-1,95
7	7,95	3,20	-11,51	-1,272	-72,92	15,9	-12,5	8,18	-4,13
8	9,28	0,73	-12,43	-1,484	-85,07	18,55	-12,5	5,94	-5,51
9	10,6	-1,89	-12,26	-3,392	-194,45	21,2	-12,5	3,33	-5,85

Ділянка 5 маневру 2 «правий поворот» вихід.

Число з початку та наприкінці ділянки курсового кута: передніх коліс $\alpha_{п0} = -0,154 \text{ рад} = -8,83^\circ$, задніх коліс $\alpha_{30} = 0,126 \text{ рад} = 7,22^\circ$, загальний початковий кут $\alpha_0 = \alpha_{п0} + \alpha_{30} = -0,154 + 0,126 = -0,028 \text{ рад} = -1,61^\circ$. Час виходу з ділянки $t = 0,5 \text{ с}$. Число коефіцієнта інтенсивності буде: передніх коліс: $k_{п} = \alpha_K - \alpha_0 / t = (0 - (-0,154)) / 0,5 = 0,308 \text{ с}^{-1}$ і задніх коліс $k_3 = \alpha_K - \alpha_0 / t = (0 - 0,126) / 0,5 = -0,252 \text{ с}^{-1}$. Всього коефіцієнт інтенсивності буде $k = k_{п} + k_3 = 0,308 - 0,252 = 0,056 \text{ с}^{-1}$.

$$\varphi_K = 2,0 \cdot (((-0,154) \cdot 0,5 + 0,5 \cdot 0,308 \cdot 0,5^2) / 1,925 + (-0,126 \cdot 0,5 + 0,5 \cdot (-0,252) \cdot$$

$\cdot 0,5^2)/1,575)) = -0,08 \text{ рад} = -4,59^\circ$. Вісі $x_5 y_5$ розташовані до осей $x y$ під кутом $\theta_5 = \theta_4 + \varphi_4 = -183,27^\circ$. Чисельний розрахунок зведений до таблиці 5.12.

Таблиця 5.12 – Ділянка 5 маневру 2 «правий поворот» вихід

№ з/П	t , с	x_i , м	y_i , м	α_{II} , $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	α_3 , $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	α_K , $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	φ , $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	S , м	R , м	x , м	y , м
1	0	0	0	-0,1540	0,1260	-0,0280	0	0	-6,25	3,33	-5,85
				-8,83	7,22	-1,61	0				
2	0,06	0,12	0	-0,1348	0,1103	-0,0245	-0,0188	0,13	-7,14	3,21	-5,84
				-7,72	6,32	-1,40	-1,07				
3	0,13	0,25	-0,01	-0,1155	0,0945	-0,0210	-0,0350	0,25	-8,33	3,08	-5,83
				-6,62	5,42	-1,20	-2,01				
4	0,19	0,37	-0,02	-0,0963	0,0788	-0,0175	-0,0488	0,38	-10	2,96	-5,81
				-5,52	4,51	-1,00	-2,79				
5	0,25	0,50	-0,03	-0,0770	0,0630	-0,0140	-0,0600	0,50	-12,50	2,83	-5,80
				-4,41	3,61	-0,80	-3,44				
6	0,31	0,62	-0,04	-0,0578	0,0473	-0,0105	-0,0688	0,63	-16,67	2,71	-5,78
				-3,31	2,71	-0,60	-3,94				
7	0,38	0,75	-0,05	-0,0385	0,0315	-0,0070	-0,0750	0,75	-25	2,58	-5,76
				-2,21	1,81	-0,40	-4,30				
8	0,44	0,87	-0,06	-0,0193	0,0158	-0,0035	-0,0788	0,88	-50	2,46	-5,75
				-1,10	0,90	-0,20	-4,51				
9	0,5	1,0	-0,07	0	0	0	-0,0800	1,00	∞	2,34	-5,73
				0	0	0	-4,59				

Ділянка 6 маневру 2 «лівий поворот» вхід.

Користуючись значенням мінімального радіуса кривизни траєкторії повороту, визначаємо максимального число повороту коліс: передніх коліс $\alpha_{1Kпер} = \ell / R_{\min} = 3,5 / 7,85 = 0,446 \text{ рад} = 25,55^\circ$, задніх коліс $\alpha_{1Kпер} = \ell / R_{\min} = 3,5 / -7,85 = -0,446 \text{ рад} = -25,55^\circ$. Приймаємо значення на початку входу в поворот курсового кута: передніх коліс $\alpha_{no} = 0$, задніх коліс $\alpha_{3o} = 0$, загальний початковий кут $\alpha_o = \alpha_{no} + \alpha_{3o} = 0$ та в кінці лівого повороту курсовий кут становитиме: для передніх коліс

$$\alpha_{\kappa \max} = \alpha_{K1nep} = \alpha_{1K} \ell_2 / L = 0,44586 \cdot 1,925 / 3,5 = 0,2452 \text{ рад} = 14,05^\circ, \quad \text{задніх}$$

$$\text{коліс} \quad \alpha_{\kappa \max} = \alpha_{K2зад} = \alpha_{2K} \ell_1 / L = -0,44586 \cdot 1,575 / 3,5 = -0,2005 \text{ рад} = -11,5^\circ.$$

$$\text{Загальний курсовий кут } \alpha_{\kappa} = \alpha_o + kt = 0 + 0,0446 \cdot 0,6 = 0,02676 \text{ рад} = 1,53^\circ. \text{ Час}$$

входу маневру $t = 0,6 \text{ с}$. Після чого число коефіцієнту зміни інтенсивності

$$\text{кута курсового: передніх коліс } k_{\Pi} = \alpha_{\kappa} - \alpha_o / t = (0,2452 - 0) / 0,6 = 0,4087 \text{ с}^{-1} \text{ і}$$

$$\text{задніх коліс } k_3 = \alpha_{\kappa} - \alpha_o / t = (-0,2006 - 0) / 0,6 = -0,3343 \text{ с}^{-1}. \text{ Всього коефіцієнт}$$

$$\text{інтенсивності буде } k = k_{\Pi} + k_3 = 0,4087 - 0,3343 = 0,0744 \text{ с}^{-1}.$$

Кут наприкінці повороту рами трактора

$$\varphi_{\kappa} = 2,0 \cdot \left((0 + 0,5 \cdot 0,4087 \cdot 0,6^2) / 1,925 + (0 + 0,5 \cdot (-0,3343) \cdot 0,6^2) / 1,575 \right) =$$

$$= 0,153 \text{ рад} = 8,76^\circ. \text{ Вісі } x_6 y_6 \text{ розташовані до осей } x_u \text{ під кутом}$$

$$\theta_6 = \theta_5 + \varphi_5 = -179,1^\circ. \text{ Чисельний розрахунок зведений до таблиці 5.13.}$$

Таблиця 5.13 – Ділянка 6 маневру 2 «лівий поворот» вхід

№ з/п	t, с	x _i , м	y _i , м	$\alpha_{\Pi},$ $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	$\alpha_3,$ $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	$\alpha_{\kappa},$ $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	$\varphi,$ $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	S, м	R, м	x, м	y, м
1	0	0	0	0	0	0	0	0	∞	2,34	-5,73
				0	0	0	0				
2	0,08	0,15	0	0,0307	-0,0251	0,0056	0,0024	0,15	31,40	2,19	-5,71
				1,76	-1,44	0,32	0,14				
3	0,15	0,30	0	0,0613	-0,0502	0,0111	0,0096	0,30	15,70	2,04	-5,69
				3,51	-2,88	0,64	0,55				
4	0,23	0,45	0,01	0,0920	-0,0752	0,0167	0,0215	0,45	10,47	1,89	-5,67
				5,27	-4,31	0,96	1,23				
5	0,30	0,60	0,01	0,1226	-0,1003	0,0223	0,0382	0,60	7,85	1,74	-5,66
				7,03	-5,75	1,28	2,19				
6	0,38	0,75	0,03	0,1533	-0,1254	0,0279	0,0597	0,75	6,28	1,59	-5,65
				8,79	-7,19	1,60	3,42				
7	0,45	0,90	0,04	0,1839	-0,1505	0,0334	0,0860	0,90	5,23	1,44	-5,65
				10,54	-8,63	1,92	4,93				
8	0,53	1,05	0,06	0,2146	-0,1756	0,0390	0,1170	1,05	4,49	1,29	-5,65
				12,30	-10,06	2,24	6,71				
9	0,60	1,19	0,09	0,2452	-0,2006	0,0446	0,1529	1,20	3,93	1,14	-5,65
				14,06	-11,50	2,56	8,76				

Ділянка 7 маневру 2 «лівий поворот» вихід.

Число з початку та наприкінці ділянки курсового кута: передніх коліс $\alpha_{no} = 0$, задніх коліс $\alpha_{zo} = 0$, загальний початковий кут $\alpha_o = \alpha_{no} + \alpha_{zo} = 0$.

Час виходу з ділянки $t = 0,6 \text{ с}$. Число коефіцієнта інтенсивності буде:

передніх коліс: $k_{\Pi} = \alpha_K - \alpha_o / t = (0 - 0,2452) / 0,6 = -0,4087 \text{ с}^{-1}$ і задніх коліс

$k_3 = \alpha_K - \alpha_o / t = (0 - (-0,2006)) / 0,6 = -0,3343 \text{ с}^{-1}$. Всього коефіцієнт

інтенсивності буде $k = k_{\Pi} + k_3 = -0,4087 + 0,3343 = -0,0744 \text{ с}^{-1}$.

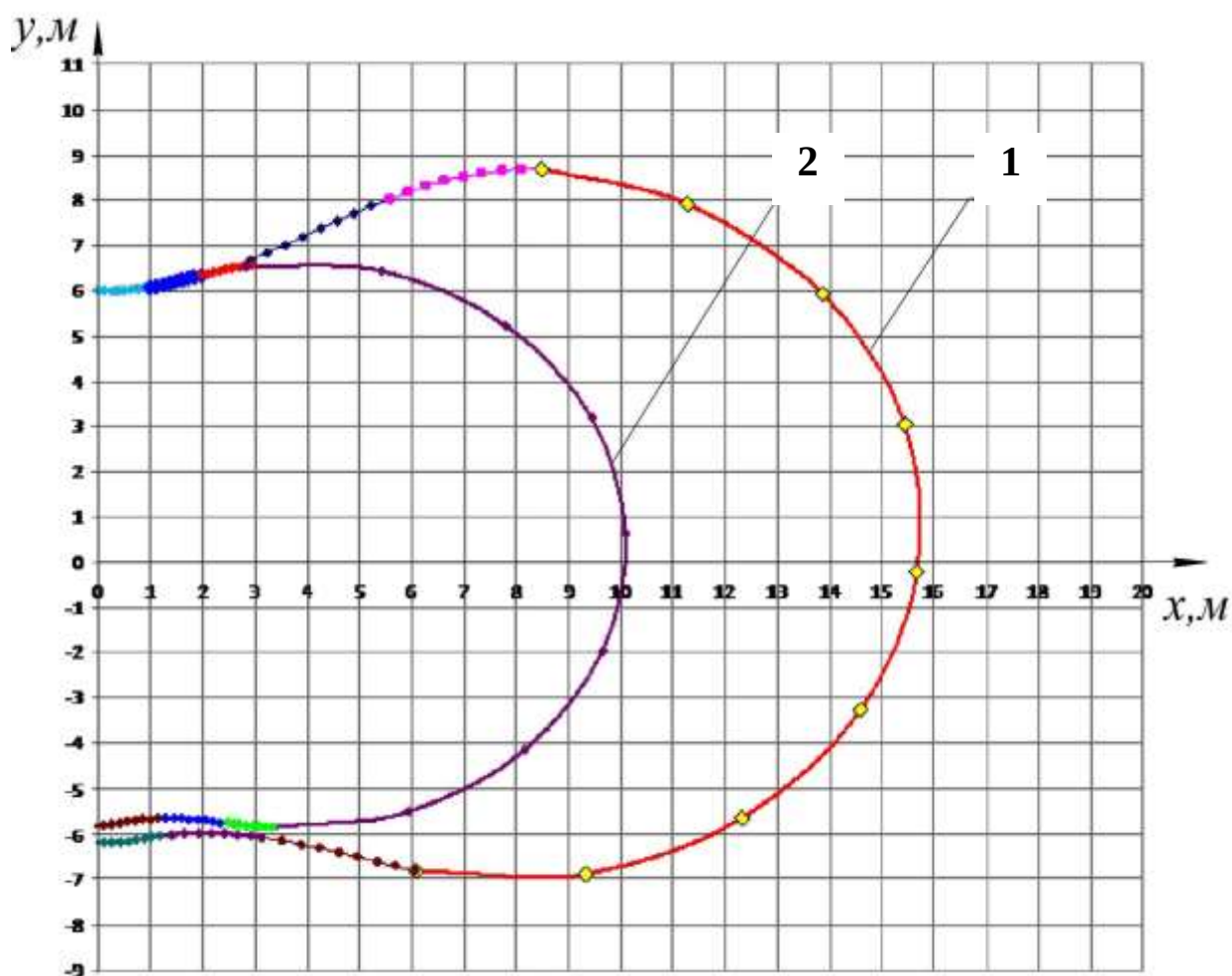
$\varphi_K = 2,0 \cdot ((0 + 0,5 \cdot 0,4087 \cdot 0,6^2) / 1,925 + (0 + 0,5 \cdot (-0,3343) \cdot 0,6^2) / 1,575) =$

$= 0,153 \text{ рад} = 8,76^\circ$. Вісі $x_7 y_7$ розташовані до осей x_u під кутом

$\theta_7 = \theta_6 + \varphi_6 = -170,34^\circ$. Чисельний розрахунок зведений до таблиці 5.14.

Таблиця 5.14 – Ділянка 7 маневру 2 «лівий поворот» вихід

№ з/п	t, с	x_i , м	y_i , м	α_{Π} , $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	α_3 , $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	α_K , $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	φ , $\frac{\text{рад}}{\text{град}}$	S, м	R, м	x, м	y, м
1	0	0	0	0,2452	-0,2006	0,0446	0	0	7,850	1,14	-5,65
				14,06	-11,50	14,06	0				
2	0,08	0,15	0,01	0,2146	-0,1756	0,0390	0,0358	0,15	8,97	0,99	-5,67
				12,30	-10,06	12,30	2,05				
3	0,15	0,30	0,02	0,1839	-0,1505	0,0334	0,0669	0,30	10,47	0,84	-5,68
				10,54	-8,63	10,54	3,83				
4	0,23	0,45	0,04	0,1533	-0,1254	0,0279	0,0932	0,45	12,56	0,69	-5,70
				8,79	-7,19	8,79	5,34				
5	0,30	0,60	0,06	0,1226	-0,1003	0,0223	0,1146	0,60	15,70	0,55	-5,72
				7,03	-5,75	7,03	6,57				
6	0,38	0,75	0,08	0,0920	-0,0752	0,0167	0,1314	0,75	20,93	0,4	-5,75
				5,27	-4,31	5,27	7,53				
7	0,45	0,89	0,10	0,0613	-0,0502	0,0111	0,1433	0,90	31,40	0,25	-5,77
				3,51	-2,88	3,51	8,22				
8	0,53	1,04	0,13	0,0307	-0,0251	0,0056	0,1505	1,05	62,80	0,10	-5,80
				1,76	-1,44	1,76	8,63				
9	0,60	1,19	0,15	0	0	0	0,1529	1,20	∞	-0,05	-5,82
				0	0	0	8,76				



1 – маневр 2; 2 – маневр 1

Рисунок 5.2 – Наглядне зображення моделювання траєкторій маневрів трактора (Claas Xerion 5000 Trac) і борони (Lemken Gigant 10/1200 Heliodor 9) при $v=10$ км/год. з використанням наших алгоритмів

Під час нормування і планування механізованих польових робіт враховують обмежену кількість факторів, які безпосередньо впливають на продуктивність машинно-тракторного агрегату. До таких факторів, які впливають на продуктивність МТА та його витрату палива, відносять: фізико-механічні властивості ґрунту (механічний склад ґрунту, вологість та інше); розміри поля, ділянки (його довжина та ширина); агрофон та інші (рис. 5.3)



Рисунок 5.3 – Фактори впливу на продуктивність [29, 30]

Отже, продуктивність агрегату є основною складовою техніко-економічного показника роботи будь якого польового агрегату. На підставі вищенаведених факторів відбувається планування та нормування виконання сільськогосподарських робіт під час вирощування продукції рослинництва. Тому від правильного визначення продуктивності польового агрегату залежить ефективність сільськогосподарського виробництва, розраховуючи заробітну плату робітникам (операторам, механізаторам та допоміжному персоналу). Виконання будь-якої технологічної операції повинно відбуватись у встановлені агротехнічні терміни, та згідно з їх вимогами, недотримання яких призводить до втрат врожаю.

Одним з можливих факторів збільшення продуктивності – це оптимізація експлуатаційних властивостей агрегату (зменшення довжини холостого ходу) на поворотах, що тим саме призводить до збільшення довжини гону та зменшення ширини поворотної смуги. Порівняльна оцінка

результатів розрахунку техніко-економічних показників траєкторій розвороту агрегату за допомогою ручного водіння та з використанням запропонованих алгоритмів для автоматичного водіння польових агрегатів наведено в таблиці 5.15.

Таблиця 5.15 – Результат застосування під час маневру без ручного водіння за допомогою наших математичних виразів для використання автоводіння розвороту

Кінематичний параметр	Змодельована траєкторія розвороту для автоматичного водіння петля 1	Змодельована траєкторія розвороту для автоматичного водіння петля 2
Довжина петлі ℓ_n , м	60,46	46,56
Робоча довжина заїмки, ℓ_p , м	1161,7	1189,7
Чистий час роботи агрегату за зміну, T_p (год.)	5,9	6,06
Час поворотів за зміну, T_x (год.)	0,676	0,5216
Кількість циклів за зміну, $n_{\text{ц}}$	67	67
Коефіцієнт використання часу зміни τ	0,843	0,865
Продуктивність за 1 год. змінного часу, $\omega_{\text{зм}}$ (га/год)	13,36	13,709
Витрати палива на одиницю площі, $G_{\text{га}}$ (кг/га)	38,15	38,24
Коефіцієнт використання робочих ходів, φ	0,9505	0,9623
Витрати на паливо на поворотах, S_n (грн.)	267836,94	268475,9
Економічний ефект для посівної площі 3859 га (СТОВ «Вікторія»).	-	24755 грн.

5.3 Висновок по розділу 5

Застосування результатів теоретичних досліджень при налаштуванні автоматичного керування машинно-тракторного агрегату в складі: трактора (Claas Xerion 5000) і борони (Lemken Gigant 10/1200 Heliodor 9) дозволило зменшити розворотну полосу на 11 метрів в разі використання всіх керованих коліс під час розвороту.

В разі використання тільки передніх коліс під час петлевидного розвороту були отримані такі результати:

- коефіцієнт використанні робочих ходів $\varphi = 0,9505$;
- коефіцієнт використання часу зміни $\tau = 0,843$;
- продуктивність роботи машинно-тракторного агрегату за 1 годину

$$\text{змінного часу } \omega_{\text{год}} = 13,36 \frac{\text{га}}{\text{год}}.$$

В разі використання всіх керованих коліс були отримані такі результати: коефіцієнт використанні робочих ходів $\varphi = 0,9623$; коефіцієнт використання часу зміни $\tau = 0,865$; продуктивність роботи машинно-тракторного агрегату за 1 годину змінного часу $\omega_{\text{год}} = 13,71 \frac{\text{га}}{\text{год}}.$

В результаті порівняння техніко-експлуатаційних показників краще використовувати під час виконання операцій вирощування сільськогосподарських культур використання маневрів зі всіма керованими колесами, які покращують експлуатаційні показники: на 1,2% коефіцієнт φ ; на 2,6% коефіцієнт τ та година продуктивність машинно-тракторного агрегату збільшиться на 2,6%.

Прогнозований річний економічний ефект складає на 1 гектар 6,40 грн, під час виконання операції: боронування. Обсяг впровадження 3868 га. Прогнозований річний економічний ефект 24755,2 грн. під час виконання вищеописаної операції.

Список використаних джерел до розділу 5

1. Шуліка С.А., Дяченко Л.А., Іванов Є.К. Тема 1.9. Продуктивність машинно-тракторних агрегатів. Експлуатація машин і обладнання. Електронний підручник / В.М. Кіяшко, Е.М. Луговська ; ДУ «Науково-методичний центр вищої та фахової передвищої освіти». URL: https://evgivanov.github.io/expl_html_book/book/part1/tema1-9.html (дата звернення: 18.02.2025).
2. Перспективи зростання продуктивності роботи машинно-тракторного агрегату [Електронний ресурс] / [В.Т. Надикто, В.М. Кюрчев, А.М. Аюбов та ін.] // Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету, 8(2). – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <http://oj.tsatu.edu.ua/index.php/visnik/article/view/2/3>.
3. Методика обґрунтування раціонального складу і швидкісного режиму роботи машинних агрегатів / О. Анікеєв та ін. *Науковий журнал «Технічний сервіс агропромислового лісового та транспортного комплексів»*. 2020. вип. 18 : Technical service of agriculture, forestry and transport. С. 62–69. URL: <https://doi.org/10.37700/ts.2019.18.62-69> (дата звернення: 13.02.2025).
4. Саржанов О.А. Обґрунтування складу машинних агрегатів для виконання механізованих технологічних процесів у рослинництві на основі сучасних технічних засобів / О.А. Саржанов, О.В. Таценко // *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів*. - 2015. - Вип. 11. - С. 39-45. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vsna_mekh_2015_11_10.
5. Надикто В.Т. Енергонасиченість тракторів та шляхи її реалізації / В.Т. Надикто // *Техніка і технології АПК*.—2011.— No9. —С. 8-11.
6. Adamchuk,V., Bulgakov, V., Nadykto,V., Ihnatiev, Y., Olt, J.(2016). Theoretical research in to the power and energy performance of agricultural tractors. *Agronomy Research*, 14(5), 1511–1518.

7. Довжик М.Я., Сіренко Ю.В., Калнагуз О.М. Продуктивність машинних агрегатів. <https://repo.btu.kharkov.ua/>. Матеріали МНПК «Сучасна інженерія агропромислових і харчових виробництв». 26.11.2021. URL: https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/2836/1/materialy-MNPK_SIAHV_2021-561-563.pdf (дата звернення: 13.02.2025).

8. Сиволапов В., Кислий С., Марченко В. Як підвищити продуктивність машинних агрегатів. <https://agroexpert.ua>. Agroexpert – щомісячне науково-практичне видання / Головна / Загальне. 15.11.2016. URL: <https://agroexpert.ua/ak-pidvisiti-produktivnist-masinnih-agregativ/> (дата звернення: 13.02.2025).

9. Галєєва А., Зубехіна-Хайят О. Проектування технологічних процесів у рослинництві. Методичні рекомендації до виконання практичних робіт для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня «Магістр» спеціальності 208 «Агроінженерія». <https://dspace.mnau.edu.ua/>. 24.11.2020. URL: <https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/8063/1/Proektuvannia%20tekhnologichnykh%20protsesiv%20u%20roslynnytstvi.pdf> (дата звернення: 17.02.2025).

10. Довідник з машиновикористання в землеробстві / В. Пастухов та ін. Харків: Веста, 2001. 347. с. ISBN 966 - 679 - 004 - 1. URL: <https://repo.btu.kharkov.ua/handle/123456789/6785> (дата звернення: 17.02.2025).

11. Перспективи зростання продуктивності роботи машинно-тракторного агрегату / В.Т. Надикто та ін. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2018. Т. 2, вип. 8. С. 1–12. (дата звернення: 18.02.2025).

12. Мельник І.І., Зубко В.М., Хворост Т.В. Інформаційна технологія оцінки роботи машинних агрегатів. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства Ім. П. Василенка*. 2015. Т.

1, вип. 156 : «Технічні науки» «Механізація сільськогосподарського виробництва». С. 222–230. URL: https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/27837/1/VISNUK_%e2%84%96156_2015_36.pdf (дата звернення: 17.02.2025).

13. Агрегатування сільськогосподарської техніки — одна з сучасних актуальних проблем землеробської механіки. / В.М. Булгаков, В.В. Адамчук, В.Т. Надикто, М.Я. Ружило. Вісник аграрної науки, 2022, №11 (836). С. 48 - 55. Бібліогр.:20. DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202211-07>

14. Зубко В.М., Хворост Т.В., Тесленко О.В., Барабаш Г.І., Омельченко Є.М., Романовський М.О. Дослідження організації і проведення механізованих технологічних операцій у рослинництві / Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів», випуск 1 (55), 2024.- с. 37-45. <https://doi.org/10.32782/msnau.2024.1.5>

15. Машиновикористання в землеробстві / В.Ю. Ільченко [та ін.]; за ред. В.Ю. Ільченка, Ю.П. Нагірного. –К.: Урожай, 1996. – 384 с.

16. Теоретичні основи експлуатації сільськогосподарської техніки : метод. вказ. до виконання практ. занять з курсу / уклад. О. О. Матвієнко, О. В. Крилов. - Кропивницький : ЦНТУ, 2018. - 105 с. <https://dspace.kntu.kr.ua/bitstreams/b05d0d44-6a4f-4829-94d5-a5e3a026c61f/download>

17. Експлуатація машин і обладнання. Методичні вказівки для виконання курсового проекту для студентів спеціальності «Експлуатація та ремонт машин і обладнання агропромислового виробництва» / Укладач: Оласюк Я.В., рецензент: Кіндер Р.В. – Любешівський технічний коледж Луцького національного технічного університету, Луцьк, 2016 – 101 с.

18. Дослідження умов раціонального комплектування орних машинно-тракторних агрегатів / В. Адамчук та ін. *Bulletin of Agricultural Science*. 2022.

Т. 100, вип. 4: Механізація, електрифікація. С. 60–69. URL: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202205-09>.

19. Експлуатація машин і обладнання. Барабаш Г.І., Таценко О.В., Бакай Р.Б. Р.2. Використання машин в механізованих технологічних процесах: Практикум щодо виконання лабораторно-практичних робіт для студентів 4-го курсу спеціальності 6.100102 «Процеси, машини та обладнання АПВ» денної та заочної форми навчання. – СНАУ, Суми, 2014. – 135 с.

20. Експлуатація машин і обладнання: навчально-методичний комплекс (навч. посібник для студентів інженерних спеціальностей осв.-кваліф. рівня "Бакалавр") 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.

21. Експлуатація машин і обладнання: Навчальний посібник / Ружицький М.А., Рябець В.І., Кіяшко В.М. та ін. – К.: Аграрна освіта, 2010. – 617 с.

22. Сенчук М.М., Демещук В.А. Основи машиновикористання в рослинництві: Методичні вказівки для самостійної роботи та лабораторно-практичних занять за кредитно-модульною системою навчання студентів агрономічного факультету. – Біла Церква, 2010. – 85 с.

23. Практикум із машиновикористання в рослинництві: Навч. посібник для студентів ВНЗ/ за ред. І.І. Мельника/[А. С. Лімонт, І.І. Мельник, А.С. Малиновський та ін.]. – Київ: Кондор, 2009. – 284 с.

24. Марченко В.В. Механізація технологічних процесів у рослинництві: Навчальний посібник (За ред. В.В. Марченка) / В.В. Марченко. – Київ: Кондор, 2007. – 334 с.

25. Практикум з використання машин в рослинництві: Навч. посібник / [В.Ю. Ільченко, А.С. Кобець, В.П. Мельник та ін.]. – Дніпропетровськ:

Редакційно-видавничий відділ Дніпропетровського держагроуніверситету, 2002. – 212 с.

26. Практикум з технічної експлуатації сільськогосподарської техніки: (Монографія/ За ред. О.В. Козаченка) / [О.В. Козаченко, І.П. Сичов, С.П. Сорокін та ін.]. – Харків: ХДТУСГ: Торнадо, 2001. – 374 с.

27. Головне Управління Статистики У Сумській області. Посівні площі культур за категоріями господарств у Сумській області під урожай 2024 року. <https://sumy.ukrstat.gov.ua/>. Статистична інформація / 2. Економічна статистика / Сільське, лісове та рибне господарство / Сільське господарство /. 25.04.2024. URL: https://sumy.ukrstat.gov.ua/?menu=1312&article_id=13865 (дата звернення: 22.05.2024).

28. Збірник методик з використання машин в землеробстві : навчальний посібник / В. Мельник та ін. Харків : ООО “Промпроект”, 2020. 257 с. ISBN 966 - 679 - 004 - 1. URL: https://repo.btu.kharkov.ua/bitstream/123456789/8631/1/2020_Dovidnik_All_02.pdf (дата звернення: 18.02.2025).

29. Шуліка С.А., Дяченко Л.А., Іванов Є.К. Експлуатація машин і обладнання. Електронний підручник / В. М. Кіяшко, Е. М. Луговська ; ДУ «Науково-методичний центр вищої та фахової передвищої освіти». URL: https://evgivanov.github.io/expl_html_book/index.html (дата звернення: 18.02.2025).

30. Шуліка С.А., Дяченко Л.А., Іванов Є.К. Тема 1.9. Продуктивність машинно-тракторних агрегатів. Експлуатація машин і обладнання. Електронний підручник / В. М. Кіяшко, Е. М. Луговська ; ДУ «Науково-методичний центр вищої та фахової передвищої освіти». URL: https://evgivanov.github.io/expl_html_book/book/part1/tema1-9.html (дата звернення: 18.02.2025).

ВИСНОВКИ

В дисертації викладено теоретичні узагальнення та новий розв'язок наукового завдання, яке полягає в розробці малоресурсоемкісної математичної моделі криволінійного руху енергетичного засобу зі всіма керованими колесами. Це дозволило раціоналізувати маневри польового агрегату під час виконання всіх технологічних операцій вирощування культур та покращити кінематичні характеристики енергетичного засобу під час виконання маневрів, тим самим підвищити продуктивність його роботи.

В результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень отримали наступні висновки:

1. Шляхом аналізу математичних моделей криволінійного руху енергетичного засобу зі всіма керованими колесами встановлено: для отримання траєкторії руху польового агрегату застосовуються наближені методи, математичні моделі, графічні методи та сучасні, за допомогою сучасних систем супутникової навігації, але всі вони мають ряд недоліків для використання на практиці і не мають кінцевих математичних рівнянь в параметричній формі для моделювання раціональних маневрів. Тому виникає необхідність у створенні математичної моделі криволінійного руху польового агрегату зі всіма керованими колесами.

2. Розроблена математична модель криволінійного руху у вигляді системи універсальних нових математичних рівнянь залежності координат траєкторії від кута повороту корпусу машини та курсового кута для центра ваги будь-якого енергетичного засобу зі всіма керованими колесами. Ці рівняння описують рух агрегату: вхід в поворот, вихід з повороту, крабовий рух та рух по колу, незалежно від того, які колеса керовані. Отримана система рівнянь враховує інтенсивність повороту керма та дає можливість моделювати за допомогою табличного процесора Microsoft Excel маневри будь-якої складності.

3. На прикладі модернізованого трактора тягового класу 2 моделі ХТЗ-120/160 з колісною формулою 4х4 (зі всіма керованими колесами) за допомогою отриманих математичних рівнянь змодельовані основні прості маневри лівого та правого поворотів з керованими передніми, задніми та всіма колесами та крабовидний поворот з відтворенням схем цих маневрів.

4. Для моделювання маневрів центра ваги енергетичного засобу в лабораторних та польових умовах запропоновані методи на базі табличного процесора Microsoft Excel з використанням створеної математичної моделі криволінійного руху. Для модельного енергетичного засобу зі всіма керованими колесами шляхом використання розробленої методики змодельовано траєкторії трьох складних маневрів з визначенням вихідних параметрів для кожної ділянки та кінцевих параметрів маневру: довжини та часу.

5. Відповідно до розробленої методики шляхом польових досліджень для трьох маневрів (1 – рух з передніми керованими колесами; 2 – петлевидний розворот з передніми керованими колесами та рух по колу зі всіма керованими колесами; 3 – крабовий рух) відтворено траєкторії центра ваги модельного енергетичного засобу за допомогою CPS навігації та програмного забезпечення до планшету. Довжина маневру склала: маневр 1 $S_{EKC} = 23,9\text{м}$; маневр 2 $S_{EKC} = 16,0\text{м}$ та маневр 3 $S_{EKC} = 12,7\text{м}$.

6. Статистична обробка на відповідність координат змодельованої траєкторії до експериментальної становила: маневр 1 (коефіцієнт кореляції Пірсона $0,9996 \rightarrow 1$, критерій узгодженості Пірсона дорівнював $\chi^2 = 1,6725 < \chi^2_{Kp} = 15,1$, рівень значимості p-value $0,892 \rightarrow 1$ (100%)); маневр 2 (коефіцієнт кореляції Пірсона $0,9889 \rightarrow 1$, критерій узгодженості Пірсона дорівнював $\chi^2 = 0,1534 < \chi^2_{Kp} = 13,277$, рівень значимості p-value $0,997 \rightarrow 1$ (100%)); маневр 3 (коефіцієнт кореляції Пірсона $0,9744 \rightarrow 1$, критерій

узгодженості Пірсона дорівнював $\chi^2 = 1,1935 < \chi_{кр}^2 = 11,345$, рівень значимості p-value $0,7546 \rightarrow 1$ (100%).

Виконана статистична обробка підтвердила відповідність змодельованих координат траєкторій до експериментальних і встановила: суттєвий зв'язок між координатами; наявні відхилення незначущі і пояснюються випадковими коливаннями, фактично вони не суперечать експериментальним значенням. Це свідчить про адекватність розробленої математичної моделі криволінійного руху центру ваги енергетичного засобу зі всіма керованими колесами і придатність даної моделі для будь-якого енергетичного засобу з будь-якою колісною формулою.

7. Використання запропонованих алгоритмів математичної моделі криволінійного руху для моделювання автоматичного керування польового агрегату в складі: трактора (Claas Xerion 5000 Trac) і борони (Lemken Gigant 10/1200 Heliodor 9) дозволило підвищити продуктивність МТА на 100 га під час виконання операції боронування на 2,6%, коефіцієнт робочих ходів на 1,2% та коефіцієнт часу зміни на 2,6% за рахунок скорочення ширини поворотної смуги на 11 м, під час виконання петлевидного розвороту з застосуванням всіх керованих коліс.

8. Розрахункова економічна ефективність застосування запропонованих алгоритмів автоматичного водіння польового агрегату під час виконання операції боронування на площі 3868 га в СТОВ «Вікторія» Сумського району Сумської області становить 24755,2 грн.

ДОДАТКИ

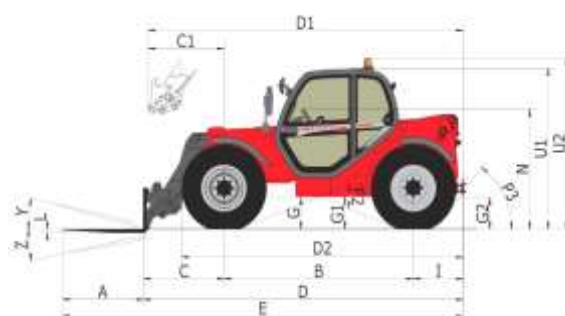
Додаток А Технічні характеристики модельного енергетичного засобу
MANITOU MLX-X 735-120 LSU SERIE 6-E3



MANITOU MLX-X 735-120 LSU SERIE 6-E3 — це високопродуктивний модельний енергетичний засіб, створений для інтенсивних аграрних робіт.

Таблиця А.1 – Технічна характеристика модельного енергетичного засобу MANITOU MLX-X 735-120 LSU SERIE 6-E3

№ п/п	Показник	Величина
1.	Модель	MLX-X 735-120 LSU SERIE 6-E3
2.	Тип двигуна	Perkins 1104D-44 TA
3.	Кількість циліндрів/ Об'єм циліндрів	4 / 4400 см ³
4.	Потужність двигуна (к.с./kW)	101 Hp / 75 kW
5.	Максимальний крутний момент / Крутний момент двигуна	410 Nm / 1400 rpm
6.	Тягове зусилля	8200 daN
7.	Кількість передач (вперед / назад)	4 / 4
8.	Максимальна швидкість переміщення	35 км/год
9.	Дорожній просвіт / Колісна база	0,44 м / 2,81 м
10.	Габаритна довжина до каретки / Загальна ширина	4,79 м / 2,40 м
11.	Радіус повороту (зовні колеса)	3,86 м
12.	Стандартні шини	Alliance - A580 - 460/70 R24 159A8
13.	Ведучі колеса (передні/задні)	2 / 2



MM	
A	1200
B	2810
C	1191.4
C1	1287
D	4790.4
D1	4886

D2	4165
E	5990.4
F	1935
F1	1935
G	450
G1	435
G2	435



I	789
J	980
K	1260
L	45
N	1715
O	125
P2	38°

P3	53°
R	3685
S	7714.9
T	3575
U1	2295
U2	2545
V	4885

V1	1310
V2	3918.5
W	2402
Y	12.5°
Z	133.7°

Додаток Б Технічні характеристики трактора Claas Xerion 5000 TRAC



Таблиця Б.1 – Технічна характеристика трактора Claas Xerion 5000 TRAC

№ п/п	Показник	Величина
1	2	3
1.	Модель	Xerion 5000 Trac
2.	Тип двигуна	Perkins 2206D E13TA Двигун відповідає вимогам норми токсичності вихлопних газів IIIA (Tier 3)
3.	Потужність двигуна	390 кВт
4.	Номінальна потужність двигуна	358 кВт (при 2000 об/хв)
5.	Максимальна потужність двигуна	385 кВт (при 1800 об/хв)
6.	Мінімальна частота обертання холостого ходу	800 об/хв
7.	Номінальна кількість оборотів	2000 об/хв
8.	Кількість циліндрів	6 штук
9.	Робочий об'єм циліндрів	12,5 л. (12500 см ³)
10.	Максимальний крутящий момент	2353 Нм
11.	Об'єм паливного баку	1000 літрів
12.	Коробка передач	ZF-Essom 5.0
13.	Тип коробки передач	Гідромеханічна, із розгалуженим потоком потужності
14.	Привод	Постійний повний привод
15.	Міжосьовий диференціал	100% блокування, гідропідтиска, муфта
16.	Блокування диференціала	Повне блокування, електрогідравліка, гідропідтиска муфта, з автоматичною функцією

Продовження таблиці Б.1

1	2	3
17.	Гідросистема. Максимальний ємність гідравлічного бака / об'єм масла, що відбирається	120 літрів / 80 літрів
18.	Передня навіска. Категорія	III N, подвійної дії
19.	Передня навіска. Постійна підйомна сила/підйомна сила, макс./хід підйому, макс.	81 kN / 84 kN / 905 мм
20.	Задня навіска. Категорія	IV N, подвійної дії
21.	Задня навіска. Постійна підйомна сила/підйомна сила, макс./хід підйому, макс.	100 kN / 136 kN / 763 мм
22.	Задні та передні шини	710/75 R42
	Розміри й вага	
23.	Міцна фронтальна навіска з постійною вантажопідйомністю 8,1 т	
24.	Загальна довжина, вкл. з навіскою	7270 мм
25.	Загальна ширина	мін. від 2540 мм до 3300 мм
26.	Загальна висота залежно від установлених шин	від 3651 мм до 3801 мм
27.	Колісна база	3500 мм
28.	Кліренс залежно від комплектації	від 375 мм до 525 мм
29.	Мінімальний радіус розвороту	15 м
30.	Власна маса (з повним паливним баком і механізатором)	до 17230 кг

Додаток В Технічні характеристики борони LEMKEN Gigant Heliodor



Системоносій LEMKEN Gigant 10 пропонує можливість використання різних ґрунтообробних секцій на одній осі (системоносії). Системоносій має дві гідравлічні триточкові навіски, на які, в залежності від необхідних робіт, можна навісити дискові борони Heliodor чи Rubin, чи передпосівної комбінації Компактор. Дане універсальне використання удвічі, а то й утричі, заощаджує інвестиційні витрати на ходову частину, гальмівну систему та механізм гідравлічного складування.

Дискова борона LEMKEN Heliodor 9 може використовуватись як для неглибокого обробітку стерні на легких та середніх ґрунтах, так і для передпосівної підготовки для посіву в мульчу або після плуга. Дискова борона Heliodor має напівсферичні диски діаметром 510 мм, захищені від пилу, бруду та вологи за допомогою спеціального лабіринтного ущільнення. Heliodor є універсальною дисковою бороною як в традиційній технології, так і в консервувальній. Висока швидкість роботи при низькій тяговій потребі є основою економічного обробітку.

Таблиця В.1 – Технічна характеристика трактора LEMKEN Gigant 10/1200 Heliodor 9 (причіпний агрегат з гідравлічною складною рамою)

№ п/п	Показник (позначення)	Величина
1.	Модель	Системний носій LEMKEN Gigant 10, борона LEMKEN Heliodor 9
2.	Кількість дисків	96
3.	Діаметр дисків / Відстань між дисками	510 мм / 125 мм
4.	Робоча ширина	1200 см
5.	Висота рами	54,5 см
6.	Глибина обробітку	5...12 см
7.	Швидкість руху	від 12 км/год

Додаток Г Критичні значення χ^2 - розподілу Пірсона $\chi(\alpha; \gamma)$ для рівнів значущості α та γ ступенів

Число ступенів свободи f	Рівень значимості					
	0,01	0,025	0,05	0,95	0,975	0,99
1	6,6	5,0	3,8	0,0039	0,00098	0,00016
2	9,2	7,4	6,0	0,103	0,051	0,020
3	11,3	9,4	7,8	0,352	0,216	0,115
4	13,3	11,1	9,5	0,711	0,484	0,297
5	15,1	12,8	11,1	1,15	0,831	0,554
6	16,8	14,4	12,6	1,64	1,24	0,872
7	18,5	16,0	14,1	2,17	1,69	1,24
8	20,1	17,5	15,5	2,73	2,18	1,65
9	21,7	19,0	16,9	3,33	2,70	2,09
10	23,2	20,5	18,3	3,94	3,25	2,56
11	24,7	21,9	19,7	4,57	3,82	3,05
12	26,2	23,3	21,0	5,23	4,40	3,57
13	27,7	24,7	22,4	5,89	5,01	4,11
14	29,1	26,1	23,7	6,57	5,63	4,66
15	30,6	27,5	25,0	7,26	6,26	5,23
16	32,0	28,8	26,3	7,96	6,91	5,81
17	33,4	30,2	27,6	8,67	7,56	6,41
18	34,8	31,5	28,9	9,39	8,23	7,01
19	36,2	32,9	30,1	10,1	8,91	7,63
20	37,6	34,2	31,4	10,9	9,59	8,26
21	38,9	35,5	32,7	11,6	10,3	8,90
22	40,3	36,8	33,9	12,3	11,0	9,54
23	41,6	38,1	35,2	13,1	11,7	10,2
24	43,0	39,4	36,4	13,8	12,4	10,9
25	44,3	40,6	37,7	14,6	13,1	11,5
26	45,6	41,9	38,9	15,4	13,8	12,2
27	47,0	43,2	40,1	16,2	14,6	12,9
28	48,3	44,5	41,3	16,9	15,3	13,6
29	49,6	45,7	42,6	17,7	16,0	14,3
30	50,9	47,0	43,8	18,5	16,8	15,0

Додаток Г Показники експлуатації машинно-тракторного агрегату

Таблиця Г.1 – Методика розрахунку показників експлуатації МТА

№ з/п	Показник	Формула визначення	Параметри, що входять до формули
1	2	3	4
1.	Продуктивність роботи ($\omega_{зм}$), (га/год.)	$\omega_{зм} = 0,1 B_p V_p \tau$	V_p – робоча швидкість агрегату, (км/год.); B_p – робоча ширина захвату МТА, (м); τ – коефіцієнт використання часу зміни МТА;
2.	Робоча швидкість агрегату V_p (км/год.)	$V_p = V_T \left(1 - \frac{\delta}{100} \right)$	V_T – теоретична швидкість руху на даній передачі, (км/год.); δ – буксування рушіїв на вибраних передачах, %.
3.	Питомий опір робочих машин k , (кН/м).	$k = k_0 \left[1 + \frac{\Delta k}{100} (V_p - V_0) \right]$	$\Delta k = 2 \dots 4\%$ темп приросту питомого опору при збільшенні швидкості руху агрегату вище 5 км/год. на 1 км/год.
4.	Загальний опір робочої машини в складі агрегату R_a (кН):	$R_a = \sum_{i=1}^{s=n} R_{a_i} = k B_k n + G_m \left(f + \frac{i}{100} \right)$	B_k – конструктивна ширина захвату однієї робочої машини (у нашому випадку борони); N – кількість робочих машин в агрегаті; G_m – вага с.г. машини, кН; f – коефіцієнт опору кочення с.г. машин для свіжозораного поля; i – схил місцевості, %.
5.	Коефіцієнт використання тягового зусилля	$\eta_{зак} = \frac{R_a}{P_{зак}}$	$P_{зак}$ – тягове зусилля трактора на вибраних передачах, кН.
6.	Кількість циклів за зміну n_u	$n_u = \frac{T_{зм} - \sum T_{ну}}{t_u}$	$\sum T_{ну} = 0,42$ год.; t_u – тривалість циклу, год.;
7.	Тривалість циклу t_u год.;	$t_u = t_p + t_x = \frac{\ell_p}{V_p} + \frac{\ell_x}{V_x}$	t_p – час чистої роботи за один цикл, год.; t_x – час виконання холостого повороту, год.; ℓ_p – робоча довжина заїмки, км; ℓ_x – довжина одного холостого повороту, км;
8.	Робоча довжина заїмки, м	$\ell_p = L - 2E$	L – довжина поля, м; E – ширина поворотної смуги, м.

Продовження таблиці Г.1

1	2	3	4
9.	При петлевих грушоподібних поворотах	$E = 2,8R_n + 0,5d_k + e,$	R_n – радіус повороту боронувальних агрегатів; $R_n = 1,0B_k$; d_k – кінематична ширина агрегату, м; e – довжина прямолінійного виїзду агрегату поворотної смуги, м:
10.	Довжина прямолінійного виїзду агрегату поворотної смуги, м:	$e = (0,6...1,0)\ell_k = 0,7(\ell_{mp} + \ell_{бор}),$	ℓ_k – кінематична довжина агрегату, м
11.	Фактичне значення ширини поворотної смуги	$E_{onm} = nB_p \geq E, \text{ м}$	n – коефіцієнт кратності ($n = 2, 4 \dots i$)
12.	Середня довжина повороту агрегату ℓ_x	$\ell_x = 6R_n + 2e, \text{ м}$	
13.	Коефіцієнт використання робочих ходів φ :	$\varphi = \frac{\ell_p}{\ell_p + \ell_x}$	
14.	Чистий час роботи агрегату за зміну, T_p , (год.):	$T_p = t_p \cdot n_u, \text{ год.}$	
15.	Час поворотів за зміну, T_x , (год.):	$T_x = t_x \cdot n_u, \text{ год.}$	
16.	Витрати палива на одиницю площі, G_{za} ,	$G_{za} = \frac{G_p T_p + G_x T_x + G_{пер} T_{пер} + G_z T_z}{\omega_{зм} T_{зм}}$	$G_p, G_x, G_{пер}, G_z$ – годинна витрата палива, відповідно, при виконанні технологічного процесу, на поворотах, переїздах, зупинках з працюючим двигуном, кг/год.; $T_p, T_x, T_{пер}, T_z$ – тривалість, відповідно, чистого часу зміни, поворотів, переїздів, зупинок з працюючим двигуном, год.

Таблиця Г.2 – Результат розрахунку показників експлуатації МТА

	D	E	F	G
	Розрахунок оптимального складу МТА при виконанні операції - Боронування			
1				
2	Агротехнічні швидкості для виконання операції $V_p=9-12$ км/год			
3	Енергетичний засіб	Claas Xerion 5000 TRAC VC		
4	Номінальна потужність енергетичного засобу, Нен, к.с.	487		
5	Номінальна потужність енергетичного засобу, Нен, кВт	358,19	358,19	358,19
6	Номінальна частота обертання колінчастого валу, п, об/хв.	2000	2000	2000
7	Питома витрата палива g , г-кВт/год	239	239	239
8	Маса трактора	14860		
9	Шини	710/75 R42		
10	Кінематична довжина трактора=колійній базі, м	3,5+2(гак)	3,5	
	Сільськогосподарська машина	Системний носій Gigant 10 + Дискова борона Heliodor - 2 шт.		
11				
12	Кінематична довжина (ширина) системного носія, м	12,3		
13	передачі	VIII	XI	X
	Робоча швидкість МА V_p , км/год			
14				
15	$V_p = V_r \left(1 - \frac{\delta}{100}\right)$	11,44	12,32	13,2
16	Теоретична швидкість V_t , км/год	13	14	15
	δ – буксування рушіїв на вибраних передачах, %, 12 – колісні 4К4; 16 – колісні 4К2	12	12	12
17				
18	Питомий опір робочих машин при певній робочій швидкості k , (кН/м):			
19	$k = k_0 \left[1 + \frac{\Delta k}{100} (V_p - V_0)\right]$	1,509	1,551	1,594
	$\Delta k = 2-4\%$ темп приросту питомого опору при збільшенні швидкості руху агрегату вище 5 км/год на 1 км/год. (довідник)	4	4	4
20	$k_0 = 0,7-1,2$ кН/м – борона важка (довідник)	1,2	1,2	1,2
21	$V_0 = 5$ км/год.	5	5	5
22				
23	Загальний опір робочої машини в складі агрегату R_a (кН)			
24	$R_a = \sum_{i=1}^{i=n} R_{a_i} = k B_k n + G_a \left(f + \frac{i}{100}\right)$	51,86	52,37	52,87
25	B_k – конструктивна ширина захвату однієї робочої машини (борони)	12	12	12
26	n – кількість робочих машин в агрегаті	1	1	1
	$f=0,18 \dots 0,22$ коефіцієнт опору кочення с.г. машин для свіжозораного поля (довідник)	0,22	0,22	0,22
27	i – схил місцевості, %.	2	2	2
28				
29	G_m – вага сільськогосподарської машини, кН			
30	$G_a = \frac{m_a \cdot g}{1000}$	140,626	140,626	140,626
31	m_a – маса дискової борони, кг	14335	14335	14335
32	g – прискорення вільного падіння, м/с ²	9,81	9,81	9,81
	Коефіцієнт використання тягового зусилля $\eta_{гак}$ на вибраних передачах			
33				
34	$M_t = 9,55 \frac{N_t}{\eta_s}$	0,6110	0,6671	0,7245
35	$P_{гак}$ – тягове зусилля трактора на вибраних передачах, кН			

Продовження таблиці Г.2

	D	E	F	G
36	Радіус кочення ведучого колеса трактора, м			
37	$r_k = 0,5d + (0,8 \dots 0,9)b$	1,0194	1,0194	1,019
38	d=0,0254 d– посадочний діаметр колеса, м	1,067	1,067	1,067
39	b – ширина профілю шини, м (розміри з профілю в м)	0,54	0,54	0,540
40	Передатне число трансмісії колісного трактора			
41	$i_{np} = 0,377 \frac{n_s r_s}{V_s}$	59,13	54,90	51,242
42	Крутний момент Me, (кН·м)			
43	$M_e = 9,55 \frac{N_e}{\eta_s}$	1,710	1,71	1,710
44	Теоретична номінальна тягова характеристика трактора P _{кн} , кН			
45	$P_{кн} = \frac{M_e i_{np} \eta_{np}}{r_k}$	89,280	82,903	77,376
46	$\eta_{тр}$ – ККД, що враховує втрати потужності у трансмісії	0,9	0,9	0,90
47	Сила опору коченню трактора, кН			
48	$P_f = f \cdot G_e$	4,4	4,4	4,4
49	G _e – експлуатаційна вага трактора, кг	20000	20000	20000
50	Тягове зусилля на гаку трактора, кН(довідник)			
51	$P_r = P_{кн} - P_f$	84,880	78,503	72,976
52	За розрахункову швидкість приймаємо на III передачі V _p =13,2 м/с, $\eta_{гак}$ =0,7245 найближче до нормативного, але не перевищує його, = 0,90...0,95			
53	Продуктивність за 1 год. основного часу, ω_0 (га/год.)			
54	$\omega_0 = 0,1B_p V_p$	15,840		
55	Необхідна ефективна потужність двигуна			
56	при виконанні технологічного процесу, N_e^p , кВт			
57	$N_e^p = \frac{R_a \cdot V_p}{3,6 \cdot \eta_{тр} \cdot \eta_s}$	354,554	354,554	354,554
58	$\eta_{тр}$ – ККД трансмісії	0,95	0,95	0,95
59	η_s – коефіцієнт, що враховує втрату швидкості від буксування			
60	$\eta_s = 1 - \frac{\delta}{100}$	0,88	0,88	0,88
61	Загальний опір робочої машини в складі агрегату, R _a , (кН)			
62	$R_a = (G_x + G_s) \left(f + \frac{i}{100} \right)$	80,838	80,838	80,838
63	G _x – вага трактора, кН	196,200	196,200	196,200
64	при виконанні переїздіє, $N_e^{пер}$, кВт			
65	$N_e^{пер} = \frac{G_a f_{пер} V_{пер}}{3,6}$	56,138	56,138	56,138
66	f – коефіцієнт опору коченню на переїздах	0,06	0,06	0,06
67	V _{пер} – швидкість руху на переїздах, км/год (8-10 км/год)	10	10	10
68	Вага агрегату G _a , кН	336,826	336,826	336,826
69	при виконанні поворотів, N_e^x , кВт			
	$N_e^x = \frac{0,8 G_a f_x V_p}{3,6}$	53,89	53,89	53,89

Продовження таблиці Г.2

	D	E	F	G
69	при виконанні поворотів, N_{ε}^x кВт			
70	$N_{\varepsilon}^x = \frac{0,8 G_a f_x V_p}{3,6}$	53,89	53,89	53,89
71	f – коефіцієнт опору коченню на поворотах	0,12	0,12	0,12
72	$V_{\text{пов}}$ – швидкість руху на поворотах, км/год	6	6	6
73	Ступінь використання ефективної потужності двигуна			
74	при виконанні технологічного процесу, ξ_p			
75	$\xi_p = \frac{N_{\varepsilon}^p}{N_{\varepsilon n}}$	0,9899	0,9899	0,9899
76	при виконанні холостих поворотів, ξ_x			
77	$\xi_x = \frac{N_{\varepsilon}^x}{N_{\varepsilon n}}$	0,1505	0,1505	0,1505
78	при виконанні переїздів, $\xi_{\text{пер}}$			
79	$\xi_{\text{пер}} = \frac{N_{\varepsilon}^{\text{пер}}}{N_{\varepsilon n}}$	0,1567	0,1567	0,1567
80	Продуктивність агрегату за одиницю змінного часу			
81	Продуктивність за 1 год. змінного часу, $\omega_{\text{зм}}$ (га/год)			
82	$\omega_{\text{зм}} = 0,1 B_p V_p \tau$	13,360	13,709	14,890
83	τ – коефіцієнт використання часу зміни			
84	$\tau = \frac{T_p}{T_{\text{зм}}}$	0,843	0,865	0,940
85	T_p – час чистої (основної) роботи, год.			
86	$T_p = t_p \cdot n_{\text{ц}}$	5,9040	6,0584	6,5800
87	$T_{\text{зм}}$ – тривалість зміни, год. (для шкідливих умов $T_{\text{зм}} = 6$ год., для звичайних $T_{\text{зм}} = 7$ год.)	7	7	7
88	Кількість циклів за зміну, $n_{\text{ц}}$			
89	$n_{\text{ц}} = \frac{T_{\text{зм}} - \sum T_{\text{оч}}}{t_{\text{ц}}}$	67	67	73
90	$\sum T_{\text{оч}}$ – сума позациклових простоїв за зміну, час на власні потреби $\sum T_{\text{оч}} = 0,42$ год.	0,42	0,42	0,42
91	$t_{\text{ц}}$ – тривалість циклу, год.			
92	Тривалість циклу дорівнює			
93	для агрегатів, що не мають технологічних місткостей			
94	$t_{\text{ц}} = t_p + t_x = \frac{\ell_p}{V_p} + \frac{\ell_x}{V_x}$	0,0981	0,0979	0,0904
95	ℓ_p – робоча довжина загінки, км;			
96	ℓ_x – довжина одного холостого повороту, км			
97	$\ell_p = L - 2E$	1161,7	1189,7	1193,7
98	L – довжина поля, м	1257,7	1257,7	1257,7
99	E – ширина поворотної смуги, м.			
100	При петльових грушоподібних поворотах			
101	$E = 2,8 R_n + 0,5 d_{\text{а}} + e$	49,08	49,08	49,08
102	R_n – радіус повороту боронувальних агрегатів $R_n = 1,0 B_k$	12	12	12
103	$d_{\text{а}} = 12$ м – кінематична ширина агрегату, м	12	12	12

Продовження таблиці Г.2

	D	E	F	G
100	При петльових грушоподібних поворотах			
101	$E = 2,8R_n + 0,5d_k + e$	49,08	49,08	49,08
102	R_n – радіус повороту боронувальних агрегатів $R_n = 1,0B_k$	12	12	12
103	$d_k = 12\text{ м}$ – кінематична ширина агрегату, м	12	12	12
104	e – довжина прямолінійного виїзду агрегату поворотної смуги, м			
105	$e = (0,6 \dots 1,0)\ell_k = 0,7(\ell_{пр} + \ell_{култ})$	9,5	9,5	9,5
106	ℓ_k – кінематична довжина агрегату, м (борони, трактора) з характеристики			
107	Після визначення розрахункового значення ширини поворотної смуги E фактичне її значення приймається із умови:			
108	$E_{факт} = nB_p \geq E$	48	36	36
109	n – коефіцієнт кратності ($n = 2,4 \dots i$)			
110	Середня довжина повороту агрегату ℓ_x , що приходить на один робочий прохід для грушоподібного петлевого повороту			
111	$\ell_x = 6R_n + 2e$	90,96	90,96	
112	ДОВЖИНА ПЕТЛІ....(по рис з ЕКСЕЛЬ табл. Петель.)+27,4	60,46	46,56	
113		петля 1	петля 2	
114	Коефіцієнт використання робочих ходів φ			
115	$\varphi = \frac{\ell_p}{\ell_p + \ell_x}$	0,9505	0,9623	
116	Витрати палива на одиницю роботи			
117	Витрати палива на одиницю площі, $G_{ра}$ (кг/га)			
118	$G_{ра} = \frac{G_p T_p + G_x T_x + G_{пер} T_{пер} + G_z T_z}{\omega_{зм}}$	38,15	38,24	
119	Годинна витрата палива при виконанні технологічного процесу G_p , кг/год.			
120	$G_p = \frac{gN_{ен} \zeta_p}{1000}$	84,74	84,74	
121	T_p - тривалість чистого часу зміни, год.	5,90	6,06	
122	Годинна витрата палива на поворотах G_x , кг/год.			
123	$G_x = \frac{gN_{ен} \zeta_x}{1000}$	12,88	12,88	
124	T_x - тривалість поворотів, год.	0,6760	0,5216	
125	Годинна витрата палива на переїздах $G_{пер}$, кг/год.			
126	$G_{пер} = \frac{gN_{ен} \zeta_{пер}}{1000}$	13,417	13,417	
127	$T_{пер}$ - тривалість переїздів, год.			
128	$T_{пер} = \frac{L}{V_{пер}}$	0,1258	0,12577	
129	Годинна витрата на зупинках з працюючим двигуном, G_z , кг/год.			
130	$G_z = \frac{0,1 gN_{ен}}{1000}$	8,561	8,561	
131	T_z - тривалість зупинок з працюючим двигуном, год.			
132	$T_z = T_{заг} + (\sum T_{ни} - T_{пер})$	0,2942	0,29423	

Продовження таблиці Г.2

	D	E	F
133	Затрати праці		
134	Затрати праці на одиницю площі, (люд. – год./га)		
135	$z_n^{za} = \frac{n_o + n_g}{\omega_z}$	0,0749	0,0729
136	n_o, n_g – кількість робітників, відповідно, основних та допоміжних на обслуговуванні агрегату, люд	1	1
137	Затрати енергії		
138	Затрати енергії на одиницю площі, z_e^{za} (люд. – год./га)		
139	$z_e^{za} = \alpha_n \cdot G_{za}$	2014,50	2019,31
140	α_n – енергетичний еквівалент палива $\alpha_n = 52,8$ МДж/га	52,8	52,8
141	Техніко-економічні показники використання агрегату		
142		Трактор	БОРОНА
143	Норма річного навантаження, Т (год.) (довідник)	1350	130
144	Доля роботи в річному завантаженні, δ		
145	$\delta_{mp} = \frac{t}{T} = \frac{F}{\omega_{zt}}$	0,00554	0,05611
146	F – площа поля, га	100	100
147	Ціна, С (грн.)	7130000	2162000
148	Курс євро	46	
149	Балансова вартість, Б (грн.)		
150	Трактора $B_T = 1,1 \cdot C \cdot n_M$	7843000	2378200
151	n_M – кількість машин в агрегаті, шт.	1	1
152	Норма відрахувань на реновацію, a_M (%), (довідник)	17	16,6
153	Відрахування на реновацію, S_a (грн.)		
154	$S_a = 0,01 \cdot B \cdot a_M \cdot \delta$	7392,54	22151,31
155	Норма відрахувань на поточний ремонт (ПР) та технічне обслуговування (ТО), a_{TO} (%)	8,6	14
156	Відрахування на ПР та ТО, S_{TO} (грн.)		
157	$S_{TO} = 0,01 \cdot B \cdot a_{TO} \cdot \delta$	3739,75	18681,83
158	Комплексна ціна палива, s_n (грн./кг). (Вона більша за дизельне паливо на 3	70,2	70,2
159	Ціна на паливо 1л	54	54
160	Витрати на паливо, S_n (грн.)		
161	$S_n = G_{za} \cdot F \cdot s_n$	267836,94	268475,90
162	Число робітників, які обслуговують агрегат, п (люд.)		
163	основних, n_o	1	
164	допоміжних, n_g	0	
165	Розряд робіт:		
166	основних робітників	4	
167	допоміжних робітників	-	

Продовження таблиці Г.2

	D	E
168	Тарифна ставка робітників, s_T (грн./год.)	
169	основних	61,62
170	допоміжних	0
171	Основна оплата праці, S_0 (грн.)	
172	$S_0 = (s_{TO} n_0 + s_{MD} n_g) t$	431,34
173	Додаткова оплата праці, ΔS_g (грн.)	
174	$\Delta S_g = 0,32 S_0$	138,03
175	Загальна оплата праці, S_z (грн.)	
176	$S_z = S_0 + \Delta S_g$	569,37
177	Нарахування на заробітну плату й соціальні заходи S_{cs} (грн)	
178	$S_{cs} = 0,368 S_z$	209,53
179	Експлуатаційні витрати, S (грн.)	
180	$S = (S_a + S_{TO} + S_n + S_z + S_{cs})$	268615,83
181	Структура експлуатаційних затрат, Δ (%)	
182	$\Delta_z = (S_z / S) 100$	0,00
183	$\Delta_{TO} = (S_{TO} / S) 100$	0,00
184	$\Delta_n = (S_n / S) 100$	99,71
185	$\Delta_z = (S_z / S) 100$	0,21
186	$\Delta_{cs} = (S_{cs} / S) 100$	0,08
187	Експлуатаційні витрати на одиницю роботи, $\&$	
188	$\& = \frac{S}{F}$	2686,16
189	Норма ефективності капітальних вкладень, E	0,15
190	Приведені витрати, Π (грн.)	
191	$\Pi = S + E(B_T \delta_T + B_M \delta_M)$	295154,91
192	Приведені витрати на одиницю роботи, n (грн./га)	
193	$n = \frac{\Pi}{F}$	2951,549
194		
195		
196		

Додаток Д Список публікацій здобувача за темою дисертацій

Статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України та у інших наукових виданнях.

1. Довжик М.Я., Соларьов О.О., **Калнагуз О.М.**, Таценко О.В. (2019). Спосіб врахування відводу коліс при визначенні траєкторії криволінійного руху трактора. Вісник Сумського НАУ. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів, (1-2(35-36), 25-29.. <https://doi.org/10.32845/msnau.2019.1-2.5>

(Здобувачем розроблені аналітичні рівняння в параметричній формі координат x та y центру тяжіння енергетичного засобу з передніми керованими колесами окремо для ділянок: входу в поворот і виходу з повороту енергетичного засобу. Проведений розв'язок рівнянь траєкторії криволінійного руху в інтегральній формі через розкладання функцій $\cos$ і $\sin$ в ряди Маклорена. Введені коефіцієнти інтенсивності повороту передніх коліс, які можуть враховувати відведення коліс. На прикладі трактора МТЗ-80 з використанням отриманих рівнянь побудовані графіки траєкторії центру ваги трактора без урахування відведення та з урахуванням відведення передніх коліс, на якому наочно зображено відхилення траєкторії енергозасобу від початкової під впливом відведення передніх коліс).

2. Довжик М.Я., Сіренко Ю.В. & **Калнагуз О.М.** (2022). Аналіз кінематики руху польових агрегатів зі всіма керованими колесами. Вісник Сумського НАУ. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів, 2(48), 14-20. <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.2.3>

(Здобувачем проведений аналіз наукових досліджень праць вітчизняних та закордонних науковців зі створення математичних рівнянь криволінійного руху польового агрегату).

3. Зубко В. М., Сіренко Ю. В., & **Калнагуз О. М.** (2023). Використання алгоритмів під час моделювання маневрів польовими агрегатами. Вісник

Сумського НАУ. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів, (3 (53), 32-39. <https://doi.org/10.32782/msnau.2023.3.6>

(Здобувачем проведені моделювання маневрів польового агрегату на базі енергетичного засобу на розворотній полосі з використанням запропонованих математичних рівнянь для криволінійного руху, які дозволять підвищити його ефективність (продуктивність) використання).

Статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus.

4. Dovzhik M., **Kalnaguz A.**, Sirenko Yu. Curvilinear movement of a four-wheel machine using a satellite navigation system. Scientific Horizons. 2020, (07), pp.126-136. <https://doi.org/10.33249/2663-2144-2020-92-7-126-135>

(Здобувачем проведений експеримент відтворення криволінійних траєкторій з використанням супутникової навігаційної системи під час виконання маневрів (лівого та правого поворотів) на транспортному засобі з передніми керованими колесами. Виконана статистична оцінка координат траєкторії на відповідність експерименту до моделювання криволінійного руху).

Тези і матеріали конференцій.

5. **Калнагуз О.М.**, Довжик М.Я., Сіренко Ю.В. Визначення координат центру колової траєкторії грушоподібного розвороту МТА // Збірник тез VI Всеукраїнської науково-практичної конференції. Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу с.-г. машин і знарядь. (2–3 квітня 2020 року).– Житомир, 2020.–с. 310. (с. 95–98).

6. **Калнагуз О.М.**, Сіренко Ю.В. Отримання траєкторії повороту експериментальним шляхом. Технічне забезпечення інноваційних технологій в АПК: матеріали I Міжнар. наук.-практ. конференції молодих учених

(Мелітополь, 01-26 лютого 2021 р.) / ТДАТУ: ред. кол. В.М. Кюрчев, В.Т. Надикто, [та ін.]. - Мелітополь: ТДАТУ, 2021. - 229 с. (с. 213).

7. **Калнагуз О.М.,** Сіренко Ю.В. Системи автоматичного керування рухом польових агрегатів. Сучасні проблеми землеробської механіки: матеріали XXII Міжнар. наук.-практ., присвяченої 121-й річниці з дня народження академіка П. М. Василенка, 16-18 жовтня, 2021 р., м. Ніжин/ Міністерство освіти і науки України. – Київ: НУБіП, 2021. – 370 с. (с. 90-94)

8. **Калнагуз О.М.,** Сіренко Ю.В. Раціональний поворот – один із шляхів підвищення продуктивності роботи МТА. Збірник тез доповідей XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки» (10-12 листопада 2021 р.), - Кропивницький: ЦНТУ, 2021.- с. 205, (с. 123–124).

9. **Калнагуз О.М.,** Сіренко Ю.В., Соларьов О.О., Мартинюк А.В., Марченко М.В. Траєкторія криволінійного руху трактора. Технології XXI сторіччя: Збірник тез за матеріалами 27-ої міжнародної науково-практичної конференції (24-26 листопада 2021 р.). Ч.1. – Суми-Одеса: СНАУ, 2021 - 235 с. – С. 39-40.

10. **Калнагуз О.М.,** Сіренко Ю.В., Горовий М.В. Вивчення криволінійного руху агрегату. Технічне забезпечення інноваційних технологій в АПК: матеріали III Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференції (01-26 листопада 2021 р.) / ТДАТУ: ред.кол. В.М. Кюрчев, В.Т. Надикто [та ін.]. - Мелітополь: ТДАТУ, 2021. - 657 с. (С.351-353).

11. **Калнагуз О.М.,** Довжик М.Я., Соларьов О.О., Сіренко Ю.В. Сучасні системи автоматичного керування агрегатами Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасна інженерія агропромислових і харчових виробництв» (25–26 листопада 2021 року). – Харків: ДБТУ, 2021. – 263 с. (с.123-125).

12. **Калнагуз О.М.,** Довжик М.Я., Сіренко Ю.В. Продуктивність машинних агрегатів. Матеріали міжнародної науково-практичної

конференції «Сучасна інженерія агропромислових і харчових виробництв» (25–26 листопада 2021 року). – Харків: ДБТУ, 2021. – 263 с. (с.125-128).

13. **Калнагуз О.М.,** Зубко В.М., Довжик М.Я., Баличев Є.В. Огляд теоретичних досліджень криволінійного руху агрегату // Збірник тез доповідей XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки» (10-12 листопада 2021 р.), – Кропивницький: ЦНТУ, 2021.- с. 205, (с. 40–42).

14. **Калнагуз О.М.,** Семерня О.В., Сіренко Ю.В. Дослідження руху криволінійного руху МТА // Збірник тез доповідей XXIII Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (16–18 жовтня 2022 року). МОН України, НУБіП України, Житомирський агротехнічний фаховий коледж. Київ. Житомир. 2022. 289 с. (с. 24-27).

15. **Калнагуз О.М.,** Сіренко Ю.В., Горовий М.В., Семерня О.В., Сілюченко В.М. Дослідження кінематики машинно-тракторних агрегатів // Збірник тез доповідей Міжнародної. наук.-практ. конференції (Запоріжжя, 01-25 листопада 2022 р.) / ТДАТУ: ред. кол. С. В. Кюрчев, В. М. Кюрчев, В. Т. Надикто, О. Г. Скляр [та ін.]. – Запоріжжя: ТДАТУ, 2022. 239 с. (с. 56-59).

16. **Калнагуз О.М.,** Сілюченко В.М. Поворот енергетичного засобу та способи його виконання // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Автомобільний транспорт в аграрному секторі: проектування, дизайн та технологічна експлуатація». – (1-2 грудня 2022 року) Харків: ДБТУ, 2022. – 189 с. (с. 159-160).

17. **Калнагуз О. М.,** Довжик М. Я. Дослідження та удосконалення енергетичних засобів. Збірник праць учасників міжнародної науково-практичної конференції «100-річчя Поліського національного університету: здобутки, реалії, перспективи». – (1 листопада 2022 р.) Житомир: Поліський національний університет, 2022. 680 с. (с. 671-674).

18. **Калнагуз О.М.** Траєкторія руху агрегату по полю/ **Калнагуз О.М.,** Сіренко Ю.В. // Збірник тез доповідей XXIV Міжнародної наукової

конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–19 жовтня 2023 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 2023. 450 с (с. 315-317).

19. **Калнагуз О.М.** Кінематика руху складного агрегату / О.М. Калнагуз, Ю.В. Сіренко // Збірник тез IX Міжнародної науково-практичної конференції. «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу с.-г. машин і знарядь». (5 квітня 2023 року).– Житомир, 2023. 336 с. (С.73-74).

20. **Калнагуз О.М.** Рух енергетичного засобу по полю та способи його повороту/ О.М. Калнагуз // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Експлуатаційна та сервісна інженерія» «AutoTRAK-2023» . (4-5 травня 2023 року).– Київ: НУБіП України, 2023. – 193 с. (С.30-32).

21. **Калнагуз О.М.** Супутникові технології у сільському господарстві / Груць О.А., Сіренко Ю.В., Горовий М.В., Калнагуз О.М.// Матеріали Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–19 жовтня 2024 року) / МОН України, НУБіП України. Київ. 2024. 527с. – (с. 220–223).

22. **Калнагуз О.М.** Системи авторозвороту / Пилипенко І.І., Сіренко Ю.В., Горовий М.В., Калнагуз О.М. // Матеріали Міжнар. наук.-практ. "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–19 жовтня 2024 року) / МОН України, НУБіП України. Київ. 2024. 527с. – (с. 230–233).

23. **Калнагуз О.М.** Аналіз систем розумного землеробства / Харченко Ф.М., Калнагуз О.М., Пилипенко І.І. // Матеріали Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–19 жовтня 2024 року) / МОН України, НУБіП України. Київ. 2024. 527с. – (с. 233–236).

Додаток Е Акт впровадження

ПОГОДЖЕНО

Проректор з наукової роботи та
міжнародної діяльності
Сумського НАУ

Юрій ДАНЬКО

грудня 2022 рік
М.П.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Регіонального
відділення Суми ТОВ
«ЮПІТЕР 9 АГРОСЕРВІС»

Андрій ДЕМ'ЯНЕНКО



2022 рік

М.П.

АКТ

про впровадження результатів науково-дослідних,
дослідно-конструкторських та технологічних робіт

Даним актом стверджується, що результати роботи Калнагуза

Олексія Миколайовича виконані на основі держбюджетної

теми “Удосконалення технологічного процесу та технічнихназва теми, № державної реєстраціїзасобів для виробництва та переробки аграрної продукції”,№0119U103235від 17.12.2019 р.впровадження: ТОВ “ ЮПІТЕР 9 АГРОСЕРВІС ”назва підприємства, де здійснювалось впровадження

1. Вид впроваджувальних робіт: результати теоретичних та експериментальних досліджень кінематики криволінійного руху енергетичного засобу (на поворотах та розворотах).

2. Масштаб впровадження: визначення оптимальних експлуатаційних та кінематичних параметрів транспортного засобу при виконанні технологічних маневрів.

3. Новизна результатів науково-дослідних робіт отримано: вдосконалений технологічний процес отримання параметрів траєкторії маневрів криволінійного руху транспортного засобу

4. Річний економічний ефект у грошовому виразі (із зазначення цін якого року) при виконанні маневрів криволінійного руху транспортного засобу в польових умовах становить 37 тис. 883 грн. Сумського району (за показниками 2022 р.).

Від Сумського НАУ

Завідувач науково-дослідної частини



Олег ПАСЬКО
12 2022 р.

Від підприємства

Директор Регіонального відділення Суми ТОВ «ЮПІТЕР 9 АГРОСЕРВІС»



Андрій ДЕМ'ЯНЕНКО
2022 р.

Додаток Є Акт впровадження СТОВ «Вікторія»

ПОГОДЖЕНО

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи та
міжнародної діяльності
Сумського НАУ

Керівник СТОВ «Вікторія»



Ю.І. Данько

В.І. Швачич

М.П.

М.П.

12 2022 р.

« 28 » 2022 р.

АКТ

про впровадження результатів науково-дослідних,
дослідно-конструкторських та технологічних робіт

Даним актом стверджується, що результати роботи Калнагуза

Олексія Миколайовича виконані на основі держбюджетної

теми “Удосконалення технологічного процесу та технічних
назва теми, № державної реєстраціїзасобів для виробництва та переробки аграрної продукції”,№ 0119U103235від 17.12.2019 р.впровадження: СТОВ “Вікторія”назва підприємства, де здійснювалось впровадження

1. Вид впроваджувальних робіт: результати теоретичних та експериментальних досліджень кінематики руху польового агрегату (трактор та сільськогосподарська машина).

2. Масштаб впровадження: визначення оптимальних експлуатаційних та кінематичних параметрів машинно-тракторного агрегату при виконанні технологічних елементів руху.

3. Новизна результатів науково-дослідних робіт отримано за результатами патентних досліджень або згідно з авторськими свідоцтвами, вдосконалений технологічний процес траєкторії складного руху польового агрегату

модернізації старих розробок

принципово нові, якісно нові, модифікації

4. Річний економічний ефект у грошовому виразі (із зазначення цін якого року) при виконанні даної технології можливий економічний ефект 37 тис. 883 грн. на посівних площах 3868 гектар Сумського району (за показниками 2022 р.).

Від Сумського НАУ

Завідувач науково-дослідної частини



О.В. Пасько

2022 р.

Від підприємства

Керівник СТОВ «Вікторія»



В.І. Швачич

2022 р.

Додаток Ж Акт впровадження в навчальний процес Сумського НАУ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з науково-педагогічної та
навчальної роботи Сумського НАУ
д.б.н., професор

Маргарита ЛИШЕНКО

вересня 2025 р.

АКТ

**впровадження результатів дисертаційної роботи
старшого викладача кафедри агроінжинірингу інженерно-технологічного факультету
Калнагуза О.М. у навчальний процес кафедри агроінжинірингу Сумського НАУ**

Представники інженерно-технологічного факультету Сумського національного аграрного університету: в особі – декана, д.т.н., професора Зубка Владислава Миколайовича та завідувача кафедри агроінжинірингу, д.т.н., професора Шуляка Михайла Леонідовича, склали цей акт про те, що матеріали дисертаційної роботи Калнагуза Олексія Миколайовича використовуються при викладанні освітніх компонентів: «Експлуатація машин і обладнання», «Геоінформаційні системи та технології», «Системи точного землеробства та їх використання в аграрному виробництві», «Інформаційні технології, штучний інтелект та системи точного землеробства», «Аналіз та оптимізація технологічних процесів в рослинництві» та «Апаратне і машинне забезпечення в системах точного землеробства» для спеціальності Н7 «Агроінженерія» за наступними освітніми програмами: ОПП «Агроінженерія» перший (бакалаврський) рівень вищої освіти та ОПП «Системи точного землеробства» другий (магістерський) рівень вищої освіти.

Результати роботи Калнагуза О.М. доповнили освітні компоненти «Експлуатація машин і обладнання», «Геоінформаційні системи та технології», «Системи точного землеробства та їх використання в аграрному виробництві», «Інформаційні технології, штучний інтелект та системи точного землеробства», «Аналіз та оптимізація технологічних процесів в рослинництві» та «Апаратне і машинне забезпечення в системах точного землеробства» більш раціональними способами моделювання та визначення довжини холостого ходу машинно-тракторного агрегату при різних видах розвороту з визначенням ширини поворотної смуги для підвищення показника ефективності експлуатації машинно-тракторного агрегату.

Дисертаційні дослідження Калнагуза О.М. доповнили освітні компоненти можливістю визначення траєкторії криволінійного руху енергетичного засобу та машино-тракторного агрегату з використанням супутникової навігаційної системи при виконанні здобувачами вищої освіти лабораторних робіт, а також при виконанні кваліфікаційних (бакалаврських чи магістерських) робіт, спеціальності Н7 «Агроінженерія» за наступними освітніми програмами: ОПП «Агроінженерія» перший (бакалаврський) рівень вищої освіти та ОПП «Системи точного землеробства» другий (магістерський) рівень вищої освіти.

**Завідувач кафедри агроінжинірингу
д.т.н., професор**

Михайло ШУЛЯК

**Декан інженерно-технологічного
д.т.н., професор**

Владисла ЗУБКО