

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

СІРЕНКО ЮЛІЯ ВОЛОДИМИРІВНА

Гриф.

Прим. № ____

УДК 631.171:631.3.075

ДИСЕРТАЦІЯ

**ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНИХ ПРИЙОМІВ
ВИКОРИСТАННЯ ПОЛЬОВИХ АГРЕГАТІВ**

Спеціальність 133 – Галузеве машинобудування

Галузь знань 13 – Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

Науковий керівник **Довжик Михайло Якович** кандидат технічних наук, доцент
Сумського національного аграрного університету

Суми – 2021

АНОТАЦІЯ

Сіренко Ю. В. Дослідження та обґрунтування ефективних прийомів використання польових агрегатів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 133 – «Галузеве машинобудування». – Сумський національний аграрний університет, Суми, 2021.

Дисертація присвячена дослідженню криволінійного руху колісних машин. Основні зусилля були зосереджені на вивченні і дослідженні криволінійного руху чотирьохколісного трактора. Всі висновки і положення у рівній мірі відносяться до будь-якої чотирьохколісної машини з передніми керованими колесами.

Вивченню динаміки руху колісних тракторів присвячена велика кількість наукових робіт. Теоретичні основи динаміки трактора включають в навчальні плани всіх освітніх закладів, що готують спеціалістів по їх виробництву та експлуатації. Останнім часом з'являється багато публікацій з питань паливної економічності тракторів, підвищення надійності, покращення умов роботи водіїв. Залишається багато невирішених питань, що виникають під час роботи колісного трактора в особливих умовах: на схилах, вологих ґрунтах та ґрунтах малої щільності, складних рельєфах. Однією з важливих задач сучасного тракторобудування є автоматизація управління агрегатами. Залишаються при цьому невирішеними до кінця і такі класичні задачі, як кінематика і динаміка криволінійного руху з урахуванням різних факторів, що впливають на траєкторію руху і її параметри. Криволінійний рух (поворот) має місце в роботі будь-якої транспортної або тягової машини. Теорія повороту нараховує численну кількість різних моделей руху. Рух МТА під час повороту завжди супроводжується ковзанням, часто має місце так званий пасивний поворот під дією зовнішніх сил (бокових, сил інерції та інших) без керуючої дії з боку водія. Ці специфічні особливості мають значення при проектуванні нових або дослідженні роботи існуючих машин. Тому вивчення криволінійного руху машин залишається важливою темою наукових досліджень.

Незважаючи на значну кількість робіт, присвячених криволінійному руху машин, слід відмітити, що це явище вивчене ще в недостатній мірі. Відомо, що криволінійний рух машинно-тракторного агрегату (МТА) істотно відрізняється від прямолінійного руху. Кінематика і динаміка криволінійного руху машин набагато складніші. Це вимагає додаткового вивчення багатьох факторів, які впливають на керованість, стабільність і надійність руху машини.

У більшості сучасних транспортних засобів застосовується кінематичний спосіб повороту за рахунок обертання керованих коліс відносно остова машини в площині, паралельній площині руху. Найбільше розповсюдження отримали чотирьохвісні трактори і автомобілі з передніми керованими колесами. Тому дослідження в рамках цієї роботи присвячені класу тракторів з колісними формулами 4К2 і 4К4, хоча запропоновані методи рішення задач можна поширити і на інші класи колісних машин.

Теоретичні дослідження криволінійного руху трактора потребують, перш за все, отримання математичних рівнянь траєкторії руху при вході в поворот, під час так званого статичного повороту з постійним курсовим кутом і на ділянці виходу з повороту. Існують основні причини, що обумовлюють необхідність рівнянь руху. Одна з яких пов'язана з впровадженням в практику виконання польових операцій при вирощуванні рослин автоматичного керування МТА. Як відомо, такі спроби поки що обмежуються веденням агрегату по траєкторіям, наближеним до прямої лінії, еквідистантній одній із сторін оброблюваної ділянки поля. Мають місце також і намагання охопити розвороти трактора під час чергування робочих циклів. Повна автоматизація керування роботою МТА без участі водія потребує забезпечити отримання точної інформації про положення агрегату відносно заданої траєкторії протягом всього часу роботи. Задана траєкторія руху називається траєкторією управління, і є теоретична функція криволінійного руху, яку необхідно отримати з достатньою точністю для будь-яких умов переміщення агрегату.

Повна автоматизація керування роботою машин і машино-тракторних агрегатів без участі водія потребує забезпечити отримання точної інформації про положення агрегату відносно заданої траєкторії протягом всього часу роботи.

В роботі приведені результати використання універсального рівняння в параметричній формі для побудови траєкторії руху чотирьохколісної машини з передніми керованими колесами для ділянок входу в поворот і виходу із повороту у функції кута повороту остова машини з урахуванням інтенсивності повороту передніх коліс або керма. Наведена програма побудови складної траєкторії і спосіб спряження окремих її ділянок. Ці рівняння можна використати для планування розворотів МТА під час обробітку і виконання технологічних операцій та для автоматичного управління агрегатами і машинами.

В умовах невеликих розмірів поля розвороти тракторного агрегату під час виконання сільськогосподарських робіт складають значну частину від загального об'єму роботи. Як наслідок, маємо ущільнену, деформовану земельну площу. Фактично це зниження родючості ґрунту. Тому питання економічної ефективності оптимізації криволінійного руху тракторного агрегату, що ще недостатньо освітлені в науковій літературі, набувають все більшого практичного значення.

Залишається ще мало дослідженим, таке джерело економії енергозатрат, як непродуктивні витрати енергії, до яких відносяться і розвороти тракторних агрегатів під час роботи на полях. МТА під час роботи проходить шлях довжиною багато десятків кілометрів. Шлях, що складається з робочих циклів, які часто мають криволінійний характер, і холостих поворотів, як правило, з відключеними робочими органами. Важливо, щоб холостий шлях агрегату був якомога меншим і економічним. Тому основна задача кінематики і динаміки руху агрегату полягає у виборі способу руху МТА, при якому будуть виконуватися такі вимоги як якість виконання роботи, максимальна продуктивність при найменших витратах палива та інших ресурсів на одиницю виконаної роботи; безпечна робота механізаторів; мінімальний негативний вплив на навколишнє середовище.

В сучасній науковій літературі робляться спроби описати криволінійний рух колісної машини аналітичними рівняннями, як правило, у вигляді проекцій на осі координат. Вирішення цих рівнянь, у відомій нам літературі не зустрічаються. Розроблено спосіб аналітичного вирішення диференціальних рівнянь криволінійного руху МТА з урахуванням всіх зовнішніх навантажень. В результаті

отримані аналітичні рівняння визначення функцій кутової швидкості і кута повороту чотирьохколійної машини під час повороту із змінним кутом повороту керованих коліс на ділянках входу в поворот і виходу з повороту. За допомогою запропонованих рівнянь можна виконувати аналіз залежностей кутової швидкості і кута повороту МТА від різних силових факторів і конструктивних параметрів чотирьохколійної машини з метою зменшення витрат палива і негативного впливу на довколишнє середовище і планувати повороти і розвороти МТА під час виконання технологічних операцій, для автоматичного управління агрегатами і машинами. Це дає можливість вибрати найбільш економічний спосіб руху машини у кожному окремому випадку.

В роботі приведені результати аналітичного дослідження руху чотирьохколійної машини по криволінійній траєкторії, отримані загальні рівняння траєкторії входу в поворот і виходу з повороту, приведені чисельні рішення рівнянь на прикладі агрегату на базі трактора МТЗ-80. Розглянуто чинники, які викликають відведення коліс. Запропоновано спосіб урахування впливу бічного відведення коліс на траєкторію криволінійного руху машини. Розроблено аналітичний метод отримання траєкторії криволінійного руху двовісних колісних машин з урахуванням впливу явища відведення коліс. Визначені траєкторії руху за допомогою аналітичних рівнянь, що дають можливість створювати програмне забезпечення управління рухом машин.

В роботі наведено аналіз останніх наукових досліджень і публікацій з питань криволінійного руху машин і отримані рівняння криволінійної траєкторії центра ваги чотирьохколійної машини з передніми керованими колесами.

Ключові слова: криволінійний рух, чотирьохколійна машина, траєкторія криволінійного руху, курсовий кут, кут повороту остова трактора, вхід в лівий (правий) поворот, вихід з лівого (правого) повороту, універсальні рівняння траєкторії.

ABSTRACT

Yu.V. Sirenko. Study and justification of effective methods of using field aggregates. – Qualifying scientific work on the rights of manuscript.

Thesis submitted for the Doctor of Philosophy degree (PhD) in the specialty 133 – Industrial Machinery Engineering. – Sumy National Agrarian University, Sumy, 2021.

The thesis is devoted to the study of curvilinear motion of wheeled vehicles. A greater focus is placed on studying and investigating the curvilinear motion of a four-wheeled tractor. All conclusions and provisions apply equally to any four-wheeled vehicle with front steerable wheels.

A large number of scientific papers are devoted to the study of the dynamics of wheeled tractors. The theoretical foundations of tractor dynamics are included in the curricula of all educational institutions that train specialists in their production and operation. Recently, there have been many publications on the fuel efficiency of tractors, enhancing reliability, and improving the working conditions of drivers. There are still many unresolved issues that arise during the operation of a wheeled tractor in special conditions: on slopes, wet soils and low-density soils, difficult terrain. One of the most important tasks of modern tractor production is the automation of unit control. At the same time, such classical problems as kinematics and dynamics of curvilinear motion remain unresolved in full, taking into account various factors affecting the trajectory of movement and its parameters. Curvilinear motion (pivoting motion) takes place in the operation of any transport or traction machine. The theory of turning includes a large number of different models of movement. The movement of machine-tractor aggregates during a turn is always accompanied by sliding, often there is a so-called passive turn under the influence of external forces (skid force, inertia forces, etc.) without a control action on the part of a driver. These specific features are important when designing new or studying the operation of existing machines. Therefore, the study of curvilinear motion of machines remains an important topic of scientific research.

Despite a significant number of papers devoted to the curvilinear motion of vehicles, it should be noted that this phenomenon has not been sufficiently studied yet. It is known that the curvilinear motion of a machine-tractor aggregate (MTA) differs significantly

from the rectilinear motion. The kinematics and dynamics of the curvilinear motion of vehicles are much more complicated. This requires additional study of many factors that affect the vehicle steerability, stability and reliability.

In most modern vehicles, a kinematic method of turning is used due to the rotation of the steerable wheels relative to the frame of the vehicle in a plane parallel to the plane of motion. The most widespread are four-axle tractors and vehicles with front steerable wheels. Therefore, the research conducted under this work is devoted to the class of tractors with 4K2 and 4k4 wheel formulas, although the proposed methods for solving problems may be extended to other classes of wheeled vehicles.

The theoretical studies of the curvilinear motion of a tractor require, first of all, obtaining the mathematical equations of the trajectory of motion when driving into the curve, during the so-called static turn with a constant heading angle and at the section of driving out of the curve. There are main reasons for the need for equations of motion. One of them is related to the introduction of automatic MTA control into the practice of performing field operations when growing plants. As it is known, such attempts are still limited to driving the vehicle along trajectories close to a straight line equidistant to one of the sides of the field section under cultivation. There are also attempts to cover the tractor's U-turns during alternating working cycles. The full automation of MTA operation control without the driver's participation requires obtaining accurate information on the position of the vehicle relative to the specified trajectory during the entire operating time. A given trajectory of motion is called a control trajectory, and there is a theoretical function of curvilinear motion, which should be obtained with sufficient accuracy for any conditions of motion of the tractor.

The full control automation of the operation of machines and machine-tractor aggregates without the participation of the driver requires obtaining accurate information on the position of the aggregate relative to the specified trajectory during the entire operating time.

The paper presents the results of using a universal equation in parametric form to make the trajectory of a four-wheeled vehicle with front steerable wheels for the areas of driving into the curve and driving out of the curve in the function of the angle of rotation

of the frame of the vehicle, taking into account the intensity of rotation of the front wheels or steering wheel. A program for constructing a complicated trajectory and a method for interfacing its individual sections are presented. These equations may be used for planning MTA reversals during processing and performing technological operations, as well as for automatic control of aggregates and machines.

In conditions of small field size, the tractor aggregate's U-turns during agricultural work make up a significant part of the total amount of work. This results in a compacted, deformed land area. In fact, this is a decrease in soil fertility. Therefore, the issues of economic efficiency of optimizing the curvilinear motion of a tractor aggregate, which are still insufficiently highlighted in the scientific literature, are becoming increasingly practical.

There is still little research on such a source of energy savings as unproductive energy costs, which include turning tractor aggregates while working in the fields. The MTA covers many tens of kilometers long during operation. A path consists of operating cycles, which are often curved in nature, and idle turns, usually with the working elements disconnected. It is important that the idle path of the aggregate is as small and economical as possible. Therefore, the main task of kinematics and dynamics of motion of the aggregate is to choose the method of motion of MTA, which will meet such requirements as work quality, maximum productivity with the lowest consumption of fuel and other resources per unit of work performed; safe operation of machine operators; minimal negative impact on the environment.

In the modern scientific literature, attempts are made to describe the curvilinear motion of a wheeled vehicle with analytical equations, usually in the form of projections on the coordinate axis. Solutions to these equations are not found in the examined literature. A method for analytical solution of differential equations of curvilinear motion of MTA, taking into account all external loads, is developed. As a result, analytical equations for determining the functions of the angular velocity and angle of rotation of a four-wheeled vehicle during a turn with a variable angle of rotation of the steerable wheels while driving into the curve and driving out of the curve are obtained. With the help of the proposed equations, it is possible to analyze the dependences of the angular velocity and

angle of rotation of MTA on various power factors and design parameters of a four-wheeled vehicle in order to reduce fuel consumption and negative impact on the environment, and plan turns and U-turns of MTA during technological operations, for automatic control of units and machines. This makes it possible to choose the most economical way to move the vehicle in each individual case.

The paper presents the results of an analytical study of the motion of a four-wheeled vehicle along a curved trajectory, general equations of the trajectory of driving into the curve and driving out of the curve are obtained, and numerical solutions of equations are given on the example of an aggregate based on the MTZ-80 tractor. The factors that cause wheel deflection are considered. A method for taking into account the influence of lateral wheel deflection on the trajectory of curvilinear motion of the vehicle is proposed. An analytical method for obtaining the trajectory of curvilinear motion of two-axle wheeled vehicles is developed, taking into account the influence of the phenomenon of wheel deflection. The trajectories of movement are determined using analytical equations that make it possible to create software for controlling the movement of machines.

The paper analyzes the latest scientific research and publications on the issues of curvilinear motion of vehicles and provides equations for the curved trajectory of the center of gravity of a four-wheeled vehicle with front steerable wheels.

Keywords: curvilinear motion, four-wheeled vehicle, curvilinear motion trajectory, heading angle, tractor frame rotation angle, driving into the left (right) turn, driving out of the left (right) turn, universal trajectory equations.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ, В ЯКИХ ОПУБЛІКОВАНІ ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ

У фахових виданнях.

1. Мельник В.І., Довжик М.Я., Татьяначенко Б.Я., Соларьов О.О., Сіренко Ю.В. Рівняння швидкості криволінійного руху колісного трактора // Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів». – Суми, 2016. – Вип. 10/2 (30). – С. 7-14.

(Здобувачем отримано метод аналітичного вирішення диференціальних рівнянь криволінійного руху чотирьохколійної машини з урахуванням всіх зовнішніх сил та аналітичні рівняння кутової швидкості чотирьохколійної машини на ділянках входу в поворот, виходу з повороту, а також під час повороту з фіксованим положенням керма при рівномірному обертанні керованих коліс).

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

(Здобувачем отримано результати аналітичного дослідження руху чотирьохколійної машини по криволінійній траєкторії, загальні рівняння траєкторії входу в поворот і виходу з повороту, приведені чисельні рішення на прикладі трактора МТЗ-80).

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

(Здобувачем використано універсального рівняння в параметричній формі для побудови траєкторії руху чотирьохколійної машини з передніми керованими колесами для ділянок входу в поворот і виходу із повороту у функції кута повороту остова машини з урахуванням інтенсивності повороту передніх коліс або керма).

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

(Здобувачем запропоновано спосіб урахування впливу бічного відведення коліс на траєкторію криволінійного русу машини, розроблено аналітичний метод отримання траєкторії криволінійного руху двовісних колісних машин з урахуванням впливу явища відведення коліс).

5. Довжик М.Я., Татяанченко Б.Я., Соларьов О.О., Калнагуз О.М., Сіренко Ю.В. Кутова швидкість обертання корпусу машини в повороті // Вісник Сумського національного аграрного університету, серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів», випуск 5 (33), 2018. с.93–98.

(Здобувачем розроблено спосіб аналітичного вирішення диференціальних рівнянь криволінійного руху машинно-тракторного агрегату з урахуванням всіх зовнішніх навантажень та отримані аналітичні рівняння визначення функцій кутової швидкості і кута повороту чотирьохколісної машини під час повороту із змінним кутом повороту керованих коліс на ділянках входу в поворот і виходу з повороту).

Статті у наукових виданнях, які входять до наукометричних баз даних.

6. Melnik V., Dovzhyk M., Tatyanchenko B., Solarov O., Sirenko Yu. Analytical method of examining the curvilinear motion of a four-wheeled vehicle. EASTERM-EUROPEAN JOURNAL OF ENTERPRISE TECHNOLOGIES. ISSN 1729-3774. No 3/7 (87) 2017. UDC 624.138.2.678.06 DOI: 10.15587/1729-4061.2017.101335.

(Здобувачем отримано універсальні рівняння в параметричній формі для усіх можливих траєкторій криволінійного руху колісних машин та розроблено спосіб спряження різних ділянок руху під час розвороту агрегату).

7. Dovzhyk M., Tatyanchenko B., Solarov A., Sirenko J., Roubík H. Determination of the trajectory of curvilinear motion of front steering wheels driven tractor // Scientia agriculturae bohemia, 50, 2019 (2): 127–134 (Scopus).

(Здобувачем досліджено та аналітично отримано траєкторію повороту трактора з передніми керованими колесами та описано криволінійну траєкторію чотириколісного трактора за допомогою параметричних рівнянь у декартових координатах).

В закордонних виданнях

8. Татяанченко Б.Я., Сіренко Ю.В. Результаты аналитического исследования траектории криволинейного движения четырехколесных машин // Техническое

обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: сборник научных статей Международной научно-практической конференции, Минск, 22-24 ноября 2017 г. - Минск: БГАТУ, 2017. - С. 324-327.

9. Довжик М.Я., Татьянченко Б.Я., Сіренко Ю.В. Реакції коліс трактора під час криволінійного руху. // Міжнародна конференція «Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід» 21- 24 листопада 2017 р., м. Відень, Австрія – Том 2, с. 227-235.

(Здобувачем розроблено алгоритм визначення реакцій коліс трактора під час криволінійного руху).

10. Татьянченко Б.Я., Сіренко Ю.В. Три рівняння траєкторії неусталеного руху колісної машини. // XIV Міжнародна конференція «Стратегія якості у промисловості і освіті» (4-7 червня 2018 р., Варна, Болгарія): Матеріали. У 2-х томах. Том I. Упорядники: Хохлова Т.С., Кімстач Т.В. – Дніпро-Варна, 2018. – 396 с., с. 118-124.

(Отримані три види рівнянь в параметричній формі для траєкторії неусталеного руху чотирьохколісної машини з передніми керованими колесами у функції кута повороту корпусу машини і в функції часу, а також рівняння колового руху.)

11. Довжик М.Я., Татьянченко Б.Я., Сіренко Ю.В. Коефіцієнти інтенсивності зміни кутових параметрів // Молоді вчені 2019 – від теорії до практики: збірник наукових статей X Міжнародної науково-практичної конференції – Дніпро, 2019. –с. 206-214.

(Здобувачем встановлена теоретична залежність між кутовими факторами – курсовим кутом, кутами повороту коліс, кутами відведення коліс і кутом між віссю трактора і вектором кривої сили)

Праці, які засвідчують апробацію дисертації.

12. Татьянченко Б.Я., Сіренко Ю.В. Програма дослідження криволінійного руху колісних машин. // Матеріали XVI Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" присвячена 116-річчю з дня народження

академіка П.М. Василенка (17–18 жовтня 2016 року) / МОН України, Сумський національний аграрний університет. – Суми., 2016. – Ст. 97.

13. Сіренко Ю.В. Кінематика та динаміка криволінійного руху. // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених «Молодь і технічний прогрес в АПК» (07–08 квітня 2017 року) / МОН України, ХНТУС. – Харків, 2017. – С. 36.

14. Довжик М.Я., Татяниченко Б.Я., Сіренко Ю.В. Аналітичні рівняння траєкторії неусталеного криволінійного руху чотирьохколісної машини з передніми керованими колесами // Збірник тез доповідей ХІХ Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки", присвяченої 120-й річниці з дня заснування кафедри с.-г. машин та системотехніки ім. академіка П.М. Василенка (17–19 жовтня 2018 р.) / МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 2018. 326 с. С. 279–282.

15. Довжик М.Я., Татяниченко Б.Я., Сіренко Ю.В. До визначення рівнянь траєкторії руху центра ваги чотирьохколісної машини з передніми керованими колесами // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні розробки в аграрній сфері» Том 1. – Харків: ХНТУСГ, 2018. – 270 с (С. 120).

16. Татяниченко Б.Я., Сіренко Ю.В. Рівняння траєкторії неусталеного руху колісної машини. // Матеріали ІV Всеукраїнської науково-практичної конференції «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь» (28-29 березня 2018 року м. Житомир) – (С. 236-239).

17. Довжик М.Я., Татяниченко Б.Я., Сіренко Ю.В. Значення коефіцієнтів інтенсивності зміни кутових параметрів // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Молодь і технічний прогрес в АПК» Інноваційні розробки в аграрній сфері. Том 2. – Харків: ХНТУСГ, 2019. – 285 с. (С. 115–117).

18. Довжик М.Я., Сіренко Ю.В. Аналітические уравнения траектории неуставившегося движения колесных машин // Материалы Международной научно-практической конференции «Техническое и кадровое обеспечение

инновационных технологий в сельском хозяйстве» (Минск, 24–25 октября 2019 года): в 2 ч./ редкол.: И. Н. Шило [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2019. – 408 (С. 148–150).

19. Довжик М.Я., Сіренко Ю.В. Параметричні рівняння траєкторії неусталеного криволінійного руху у функції часу // Збірник тез доповідей XX Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" присвяченої 119-й річниці з дня народження академіка П.М. Василенка (17–19 жовтня 2019 року) / МОН України, Миколаївський національний аграрний університет. – Миколаїв: МНАУ, 2019. – 222 с. С. 66-68.

20. Довжик М.Я., Сіренко Ю.В., Калнагуз О.М. 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).

Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації.

21. Патент №119886 Україна, МПК А01В 59/044 (2006.01). Корегований тягово-зчіпний пристрій / Сіренко Ю.В., Довжик М.Я., Татяниченко Б.Я., Соларьов О.О. №u2017 04512 заявка 10.05.2017; опубл. 10.10.2017, бюл. №19.

22. Патент №124185 Україна, МПК В50В 35/10 (2006.01). Транспортний засіб зі змінним центром мас / Сіренко Ю.В., Довжик М.Я., Татяниченко Б.Я., Соларьов О.О. № u2017 10260 заявка 23.10.2017; опубл. 26.03.2018, бюл. №6

ЗМІСТ

ВСТУП. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ДИСЕРТАЦІЇ.	20
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ: КІНЕМАТИКА І ДИНАМІКА КРИВОЛІНІЙНОГО РУХУ.	30
1.1. Кінематика і динаміка криволінійного руху колісних машин.	30
1.2. Аналіз графічних способів визначення траєкторій криволінійного руху.	33
1.3. Аналіз, недоліки відомих аналітичних рівнянь неусталеного руху.	35
1.3.1. Рівняння неусталеного криволінійного руху.	35
1.3.2. Спосіб урахування впливу явища відведення коліс.	40
1.4. Універсальні рівняння траєкторії криволінійного руху чотирьохколісної машини	42
1.5. Динаміка повороту тракторного агрегату	43
1.5.1. Диференціальні рівняння руху агрегату.	43
1.5.2. Кутова швидкість обертання корпусу машини в повороті.	46
1.6. Аналіз існуючих сучасних систем автоматичного керування агрегатами.	49
Висновки по розділу 1.	56
Список використаних джерел.	57
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ НЕЛІНІЙНОГО РУХУ ЧОТИРЬОХКОЛІСНОЇ МАШИНИ З ПЕРЕДНІМИ КЕРОВАНИМИ КОЛЕСАМИ.	63
2.1. Адаптація графоаналітичних способів визначення траєкторій криволінійного руху.	63
2.2. Отримання рівнянь колових траєкторій.	68
2.3. Виведення аналітичних рівнянь траєкторій несталого криволінійного руху.	71
2.3.1. Виведення аналітичних рівнянь для входу в лівий поворот.	71
2.3.2. Виведення аналітичних рівнянь для виходу з лівого повороту.	74
2.3.3. Виведення аналітичних рівнянь для входу в правий поворот і виходу з правого повороту.	76
2.4. Пошук способу урахування впливу відведення передніх коліс при визначенні траєкторії.	78

2.5. Узагальнення рівнянь траєкторій криволінійного руху в функції кута повороту корпусу машини.	82
2.5.1. Побудова рівняння без урахування впливу явища відведення коліс.	83
2.5.2. Побудова рівнянь з урахуванням впливу явища відведення всіх коліс машини.	86
2.5.3. Узагальнення рівнянь траєкторії з фіксованим положенням керма.	87
2.6. Побудова складної траєкторії руху та спряження ділянок.	89
2.7. Отримання узагальнених рівнянь траєкторії неусталеного руху в функції часу.	90
2.7.1. Дослідження рівнянь траєкторій в функції кута повороту корпусу машини та виявлення недоліків.	90
2.7.2. Дослідження рівнянь траєкторії в функції часу.	93
2.8. Отримання універсальних рівнянь траєкторій неусталеного руху колісної машини.	94
2.8.1. Обґрунтування необхідності універсальних рівнянь.	94
2.8.2. Приклади траєкторій входу в поворот при різних вихідних параметрах.	96
2.8.3. Обґрунтування необхідності окремих рівнянь для колових траєкторій.	97
2.9. Одержання уточненого рівняння для параметра y – координати центра ваги машини.	98
2.10. Дослідження додаткових умов при використанні рівнянь криволінійного руху.	100
2.10.1. Пошук розташування центру колової траєкторії.	101
2.10.2. Визначення аналітичним способом координат центру кривизни.	102
2.10.3. Розрахунок виходу агрегату в точку за попередньо заданими координатами.	103
2.11. Визначення кутової швидкості обертання корпусу машини в повороті.	107
2.11.1. Розрахунок динамічних диференціальних рівнянь руху.	107
2.11.2. Отримання часткових виразів для кутової швидкості.	108
2.11.3. Розрахунок повної кутової швидкості обертання корпусу трактора.	111
Висновки по розділу 2.	112
Список використаних джерел.	115

РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ ПЕРЕВІРКИ АДЕКВАТНОСТІ РОЗРОБЛЕНОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ.	117
3.1. Методика проведення дослідів в лабораторних умовах.	117
3.1.1. Методика моделювання петлевидного розвороту трактора МТЗ-80 з культиватором-рослинопідживлювачем КРН-4,2 та визначення вихідних параметрів.	117
3.1.2. Вибір та обґрунтування оптимальної траєкторії петлевидного розвороту трактора МТЗ-80 з культиватором КРН-4,2.	120
3.2. Методика проведення польового експерименту для відтворення теоретичної траєкторії на тракторі МТЗ-80 на дослідних полях Сумського НАУ.	120
3.2.1. Методика проведення дослідів в польових умовах і виконання вимірів.	123
3.2.2. Методика проведення статистичної оцінки експериментальних лабораторних даних.	125
3.3. Методика використання супутникової навігаційної системи при відтворенні траєкторії повороту на чотирьохколійній машині з передніми керованими колесами.	127
3.3.1. Визначення вихідних параметрів ділянок траєкторії розвороту для чотирьохколійної машини.	127
3.3.2. Методика відтворення траєкторії повороту чотирьохколійної машини з використанням супутникової навігаційної системи.	128
3.3.3. Методика проведення статистичної обробки ступеня відповідності розрахункових координат траєкторій чотирьохколійної машини з координатами траєкторій, отриманих з використанням супутникової навігаційної системи.	129
3.4. Методика використання супутникової навігаційної системи при відтворенні грушоподібного розвороту на тракторі New Holland T8050 з бороною Соломія БШН-17.	130
3.4.1. Визначення вихідних параметрів кожної ділянки траєкторії грушоподібного розвороту на тракторі New Holland T8050 з бороною Соломія БШН-17.	130
3.4.2. Методика отримання відтвореної траєкторії розвороту трактора New Holland T8050 з бороною Соломія БШН-17 в польових умовах на сільськогосподарських угіддях СТОВ «Вікторія» Краснопільського району Сумської області.	131
3.4.3. Методика проведення статичної обробки отриманих координат траєкторій розвороту трактора New Holland T8050, отриманих з	132

використанням супутникової навігаційної системи.

Висновки по розділу 3. 132

Список використаних джерел 135

РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА АДЕКВАТНОСТІ 136

РОЗРОБЛЕНОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ НЕЛІНІЙНОГО РУХУ
ЧОТИРЬОХКОЛІСНОЇ МАШИНИ.

4.1. Результат моделювання грушоподібного петлевого розвороту на
прикладі трактора МТЗ-80 з культиватором-рослинопідживлювачем
КРН-4,2 в лабораторних умовах. 136

4.1.1. Результат розрахунку окремих елементів розвороту. 136

4.1.2. Результат обґрунтування оптимальної траєкторії петлевидного
розвороту трактора МТЗ-80 з культиватором КРН-4,2. 144

4.2. Результат проведення польового експерименту відтворення
теоретичної траєкторії на тракторі МТЗ-80 на дослідних полях
Сумського НАУ. 146

4.3. Результат використання супутникової навігаційної системи при
відтворенні траєкторії повороту на чотирьохколійній машині з
передніми керованими колесами на прикладі автомобіля Renault
Logan. 148

4.3.1. Результати розрахунку та порівняльної оцінки траєкторій треку
1. Вхід в лівий поворот і вихід з лівого повороту. 149

4.3.2. Результати розрахунку та порівняльної оцінки траєкторій треку
2. Вхід в правий поворот і вихід з правого повороту. 151

4.3.3. Результати розрахунку та порівняльної оцінки траєкторій треку
3. Вхід в лівий поворот і вихід з лівого повороту. 153

4.4. Результат натурного експерименту по відтворенню грушоподібного
розвороту на тракторі New Holland T8050 з бороною Соломія БШН-17. 156

4.4.1. Результат розрахунку окремих елементів розвороту: вхід в лівий
та вихід з лівого повороту, вхід в правий поворот, правий
поворот, вихід з правого повороту, вхід та вихід з лівого
повороту. 156

4.4.2. Результат використання супутникової навігаційної системи при
відтворенні грушоподібного розвороту на тракторі New Holland
T8050 з бороною Соломія БШН-17 на сільськогосподарських
угіддях СТОВ «Вікторія» Краснопільського району Сумської
області. 160

Висновки по розділу 4. 162

Список використаних джерел 163

РОЗДІЛ 5. ЕФЕКТИВНІ ПРИЙОМИ ВИКОРИСТАННЯ ПОЛЬОВИХ АГРЕГАТИВ ТА НАРОДНО-ГОСПОДАРСЬКЕ ЗНАЧЕННЯ.	164
5.1. Аналіз відомих методик техніко-експлуатаційних показників використання польового агрегату.	164
5.2. Народного господарського значення на прикладі New Holland T8050 з бороною «Соломія» БШН-17.	168
5.3. Обґрунтування ефективності автоматичного водіння з урахуванням розроблених уточнених алгоритмів управління криволінійним рухом.	169
Висновки по розділу 5.	175
Список використаних джерел.	176
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	179
ДОДАТКИ	182
Додаток А.	183
Додаток Б.	185
Додаток В.	186
Додаток Г.	187
Додаток Д.	193
Додаток Е.	195
Додаток Ж.	196

ВСТУП

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ДИСЕРТАЦІЇ

Актуальність теми. Трактор – універсальна машина, яка користується широким попитом в усіх без винятку сферах господарчої діяльності. Саме колісні трактори набагато виграють порівняно з гусеничними тракторами в зв'язку з меншою їх металоємністю і простотою в обслуговуванні. Колісні трактори не руйнують доріг, як це роблять гусеничні машини. Умови роботи водіїв на них кращі. Але головне: вони дешевші від гусеничних тракторів на 10...25%, простіші в обслуговуванні і потребують менших трудовитрат на ремонтні роботи [1]. Гусеничний трактор значно важчий від колісного трактора однакової потужності. Але колісні трактори багато в чому й програють тракторам на гусеничному ході. У них менша прохідність, особливо під час польових робіт восени і ранньою весною. У них менша керованість на пересічній місцевості, менша продуктивність, маневреність і стійкість, а також і тяговий коефіцієнт корисної дії [2]. Але вони більш довговічні, можуть рухатися як транспортні засоби і виконувати роботи не тільки на полях, але й на будь-яких виробництвах та господарствах, незалежно від умов і пори року. Тому не випадково 90% світового обсягу виготовлення тракторів припадає на колісні машини, а в сільськогосподарських країнах їх кількість сягає понад 60% від загального тракторного парку.

Як бачимо, сучасний споживач віддає перевагу колісним тракторам, хоча попит залежить ще й від виду роботи, яку належить виконувати, і конкретних умов експлуатації машини. Але як колісні, так і гусеничні трактори не завжди відповідають вимогам, які ставляться перед ними саме в умовах експлуатації. Вони все ще далекі від досконалості.

Для машино-тракторних агрегатів (МТА) характерний складний рух на полі. При виконанні сільськогосподарських операцій та транспортних робіт МТА рухаються по прямолінійним та криволінійним траєкторіям, кривизна якої весь час змінюється. Прямолінійний рух можна розглянути як окремий випадок

криволінійного, коли кривизна траєкторії дорівнює нулю (радіус кривизни траєкторії дорівнює нескінченності) [3].

Криволінійний рух МТА суттєво відрізняється від його прямолінійного руху. Як правило, кінематичні і динамічні умови роботи значно ускладнюються, що потребує вивчення багатьох додаткових факторів, які впливають на керованість, стійкість і надійність руху машини. Тому дослідження умов криволінійного руху машино-тракторних агрегатів має важливе практичне значення.

Початок дослідженням криволінійного руху чотирьохколісної машини з керованими передніми колесами було покладено Н. Є. Жуковським у 1917 р. подальший розвиток теорії повороту колісних машин проводили Е.А. Чудаков та Я.М. Пензлер на прикладі двовісної машини з передніми керованими ведучими колесами [1928]. В основі їх моделі лежать уявлення про жорстке колесо, яке взаємодіє з опорною площадкою за законами сухого тертя без урахування відносного ковзання коліс. Простота моделі повороту машини з жорсткими керованими колесами зумовила її широке застосування на етапі початкового проектування. У моделі не враховується можливе проковзування коліс по ґрунту, пружні властивості шин, гакове навантаження, повздовжнє розташування центра мас тощо. Вона стала основою для подальшого розвитку теорії повороту машин з керованими колесами.

Питання криволінійного руху машин розглядалося в роботах В.І. Поддубного, В.Я. Аніловича, Ю.Т. Водолажченка, С.М. Григор'єва, І.Є. Кавчинського та багатьох інших вчених. В роботі [4] приводяться результати математичного моделювання руху транспортного засобу з метою встановлення оптимальних конструктивних параметрів при виконанні певних технічних операцій. В роботах [5; 6] вивчається кінематика довільно розташованої опори (колеса або гусениці) через визначення руху миттєвого центра швидкості. Відомі також спроби аналізу силової взаємодії колеса або гусениці з ґрунтом під час повороту [7, 8]. В роботі [6] приводиться загальна теорія руху колісних машин. В навчальній літературі [9] розглядаються методи графічного визначення траєкторії повороту. Незважаючи на значну кількість робіт, присвячених криволінійному руху машин, слід відмітити, що

це явище вивчене ще в недостатній мірі. Особливо відчувається потреба у вивченні траєкторії руху за допомогою аналітичних рівнянь, що дало б можливість створювати відповідні програми управління рухом машин, автотранспортних потягів і тракторних агрегатів.

Багато наукових праць містять фундаментальну постановку задачі з використанням диференціальних рівнянь механіки, які враховують всі можливі силові взаємодії машини з оточуючим середовищем, але до рішення тих рівнянь справа так і не доходить. Це дійсно не зовсім проста задача. Навіть отримані у деяких випадках траєкторії руху не мають належного обґрунтування [10], а частіше все закінчується складанням рівнянь без їх рішення. Наприклад, в роботі [11] приведені загальні рівняння руху трактора на основі теореми про зміну кількості руху тіла і моменту кількості руху в проекціях на осі рухомої системи координат з початком координат у центрі мас трактора. Результати математичного моделювання криволінійного руху трактора представлені у вигляді графіків зміни кутової швидкості обертання коліс, поздовжньої швидкості руху трактора в функції часу, а також і самі траєкторії руху, але без рішення початкових диференціальних рівнянь. Автор пропонує алгоритм роботи автоматизованої системи управління рухом колісного трактора на основі корегування зміни кутів повороту керованих коліс. Це дозволяє компенсувати відхилення від заданої траєкторії руху, викликані ковзанням, юзом і веденням коліс, які важко передбачити. В роботі [12] отримані формули для визначення деяких кінематичних параметрів, від яких залежить характер траєкторії криволінійного руху, що відтворюється поворотом передніх і задніх коліс трактора з ламаною віссю, але не сама траєкторія. Робота [13] присвячена дослідженню тягово-зчіпних властивостей трактора МТЗ-80 із спареними колесами під час криволінійного руху. Це один з поширених способів зменшити нормальний тиск рушіїв на ґрунт і одночасно покращити тягову здатність трактора, підвищити продуктивність агрегату і обмежити негативний вплив коліс на структуру і фізико-механічні властивості ґрунту. Математична модель криволінійного руху складена з метою визначення закономірності руху з використанням трьох диференціальних рівнянь Лагранжа, але такі параметри траєкторії як пройдений шлях, час досліду, а

також енергетичні показники (тягове навантаження, витрати палива та інші) з'ясовувалися тільки з експерименту.

Криволінійний рух трактора має свої особливості порівняно з умовами прямолінійного руху. По-перше, це непаралельне переміщення різних точок рухомого тіла і, як слідство, різні кінематичні і динамічні характеристики їх траєкторій. Збільшуються навантаження на всі частини машини, робота механізмів більш інтенсивна. З'являються додаткові зовнішні сили – бокові, поздовжні і вертикальні реакції, моменти опору повороту, а також сили випадкового характеру. Все це призводить до перевантаження деталей і механізмів систем керування і гальмування: педалей, важелів, передач і т. ін. В умовах розвороту тракторного агрегату різко зростають кути повороту керованих коліс, ускладнюється закон їх зміни у часі, знижуються стійкість і керованість, які залежать від здатності трактора здійснювати поворот із заданою кривизною траєкторії. Всі ці особливості проявляються в різній мірі ще й в залежності від кваліфікації водія та його здатності своєчасно оцінювати обставини і його реакції на випадкові фактори.

Показниками економічності криволінійного руху тракторного агрегату є мінімальний радіус кривизни траєкторії, відповідне йому значення швидкості, кількість витраченої енергії, сила тяги і час здійснення повороту на заданий кут. Відомо, що чим менше мінімальний радіус повороту, тим краще поворотність трактора, але його стійкість при цьому знижується і з'являється загроза втрати керованості. Керованість тим краща, чим менше енергії як у вигляді пального, так і енергії людини, витрачається на виконання повороту. Одним із важливих показників економічності роботи трактора є питома сила тяги – відношення дотичної сили тяги трактора до його маси. Чим менший цей показник, тим меншими будуть втрати потужності двигуна. При повороті важливо правильно використовувати силу зчеплення. Як відомо, відношення різниці можливої сили зчеплення і сумарної сили у місці контакту колеса з опорною поверхнею до можливої сили тяги по зчепленню називається коефіцієнтом використання сили зчеплення коліс при повороті. Чим вищий цей коефіцієнт, тим більші можливості трактора виконувати криволінійний рух і менша вірогідність втрати керованості і поворотності.

Зв'язок роботи з науковими темами та програмами. Дисертаційна робота виконана на базі Сумського національного аграрного університету в рамках науково-дослідної роботи кафедри тракторів та сільськогосподарських машин «Розробка і впровадження екологічнобезпечних енергоощадних технічних засобів та методів експлуатації в умовах лісостепу» (номер держреєстрації 0113U008229).

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

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі основні задачі:

- провести аналіз математичних моделей криволінійного руху машинно-тракторного агрегату з метою аналітичного вирішення рівнянь руху колісної машини на ділянках входу в поворот і виходу з повороту;
- розробити математичну модель криволінійного руху центра ваги чотириколісної машини з передніми керованими колесами у функції кута повороту остова машини з урахуванням інтенсивності повороту на ділянках входу в поворот і виходу з повороту, а також під час повороту з фіксованим положенням керма;
- розробити метод спряження складних траєкторій криволінійного руху для моделювання петлевидного розвороту машинно-тракторного агрегату;
- розробити методику та провести експериментальні дослідження в польових умовах для перевірки розробленої математичної моделі криволінійного руху на адекватність;
- здійснити впровадження та визначити економічних ефект використання запропонованих алгоритмів управління криволінійним рухом.

Об'єктом дослідження є процес криволінійного руху чотирьохколісної машини з передніми керованими колесами.

Предметом дослідження є математичні моделі криволінійного руху чотирьохколісної машини з передніми 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 і динаміки криволінійного руху. Експериментальні дослідження виконувалися 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 проводилась на персональному комп'ютері за допомогою систем комп'ютерної графіки та програми для роботи з електронними таблицями Microsoft Excel.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що розроблений вдосконалений процес формування траєкторії криволінійного руху машинно-тракторного агрегату:

вперше:

– на основі розробленої математичної моделі нелінійного руху отримано аналітичні залежності траєкторії руху чотирьохколісної машини з урахуванням інтенсивності повороту передніх коліс в параметричній формі у функції кута повороту остова машини, які дають можливість змодельовати траєкторію криволінійного руху машинно-тракторного агрегату;

– розроблений метод побудови складної траєкторії і спряження окремих її ділянок, аналітичні залежності руху по коловій траєкторії при фіксованому положенні керма, що дає можливість моделювання петлевидного розвороту для автоматизації управління криволінійним рухом машин.

удосконалено:

– аналітичні залежності траєкторії центра ваги чотирьохколісної машини з передніми керованими колесами нелінійного руху, які дозволяють отримати раціональну траєкторію розвороту машинно-тракторного агрегату та підвищити ефективність роботи машинно-тракторного агрегату.

отримало подальший розвиток:

– математична модель криволінійного руху центра ваги машинно-тракторного агрегату з передніми керованими колесами, яка враховує інтенсивність повороту передніх керованих коліс, дозволяє зменшити довжину петлі розвороту і ширину розвортної смуги та підвищити продуктивність машинно-тракторного агрегату;

– метод спряження складних траєкторій криволінійного руху для моделювання траєкторій розвороту машинно-тракторного агрегату, дає можливість вибирати раціональні траєкторії для збільшення продуктивності роботи агрегату за одиницю часу.

Практичне значення отриманих результатів.

Запропоновано нову методику відтворення траєкторії криволінійного руху центра ваги чотириколісної машини, шляхом урахування інтенсивності повороту передніх коліс, що дає можливість порівняти дійсні та теоретичні траєкторії руху машинно-тракторного агрегату.

Розроблений алгоритм побудови складної траєкторії руху центра ваги енергетичного засобу дозволить складання програм повної автоматизації при виконанні технологічних операцій машинно-тракторними агрегатами.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень та отриманих результатів забезпечується підтвердженням відтворених траєкторій несталоного руху на чотирьохколісній машині з передніми керованими колесами, отриманих за допомогою супутникової навігаційної системи. В результаті відповідність експериментальних і теоретичних координат достатня, і що теоретичні рівняння траєкторій криволінійного руху достатньо точно відображають рух.

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: XVII міжнародна наукова конференція, "Сучасні проблеми землеробської механіки", присвячена 116-річчю з дня народження академіка П.М. Василенка (м. Суми, 17–18 жовтня 2016 р.); міжнародна наукова конференції «Присвяченій 40-річчю університету» "Сучасні проблеми землеробської механіки", (м. Суми, 25-26 квітня 2017 р.); XVIII Міжнародна наукова конференція "Сучасні проблеми землеробської механіки" присвячена 117-річниці від дня народження академіка П.М. Василенка. (м. Кам'янець-Подільський, 16-18 жовтня 2017 р.); IV всеукраїнська науково-практична конференція «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь» (м. Житомир, 28-29 березня 2018 р.); міжнародна науково-практична конференція «Інноваційні розробки в аграрній сфері» (м. Харків, 28-29 листопада); XIX міжнародна наукова конференція "Сучасні проблеми землеробської механіки" присвяченій 120-й річниці з дня заснування кафедри сільськогосподарських машин та системотехніки імені академіка П. М. Василенка та 118 – й річниці з дня народження П. М. Василенка (м. Київ, 17-19 жовтня 2019 р.); міжнародна науково-практична конференція «Технічний прогрес в АПВ» (м. Харків, 21-22 березня 2019 р.); XX міжнародна наукова конференція, присвячена 119-й річниці з дня народження академіка П.М. Василенка, «Сучасні проблеми землеробської механіки» (м. Миколаїв, 17-19 жовтня 2019 р.), международная научно-практическая конференция «Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий сельском хозяйстве» (г. Минск, 24–25 октября 2019 года), VI Всеукраїнська науково-практична конференція «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь» (Житомир, 9-10 квітня 2020 р.).

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковані в 22 наукових працях: в 5 наукових статтях фахових видань; у 5 – закордонних виданнях; у 9 тезах доповідей.

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел з 109 найменувань і 6 додатків. Повний обсяг дисертації викладено на 197 сторінках комп'ютерного тексту (основна частина – 152 сторінок), в тому числі містить 50 рисунків, 29 таблиць.

Список використаних джерел.

1. Какой трактор выбрать – гусеничный или колесный [Электронный ресурс] // Агротехника. – 2014. – Режим доступа до ресурсу: http://pozhtehnika.ru/spacialnaya_tehnika/kakoy-tractor-vybrat.html.
2. Сравнение колесных и гусеничных тракторов [Электронный ресурс] // Техника и оборудование. – 2016. – Режим доступа до ресурсу: <https://agrovesti.net/lib/tech/machinery-and-equipment/sravnenie-kolesnykh-i-gusenichnykh-tractorov.html>.
3. Гуськов В.В., Велев Н.Н., Атаманов Ю.Е., Бочаров Н.Ф., Ксенович И.П., Солонский А.С. Тракторы. Теория. Учебник для студентов вузов по спец. “Автомобили и тракторы”, – М.: “Машиностроение”, 1988, 376 с.
4. Ненайденко А. С. Математическое моделирование движения колесной машины в горизонтальной плоскости / А. С. Ненайденко, В. И. Поддубный. // Вестник КрасГАУ. – 2018. – №3. – С. 72–77.
5. Позин Б.М., Трояновская И.П. Кинематические соотношения при взаимодействии движителя с грунтом при повороте/Вестник ЮурГУ, серия ”Машиностроение”, вып.7, №14(54), Челябинск, изд-во ЮурГУ, 2005, с.93-96.
6. Смирнов Г.А. Теория движения колёсных машин. – М. “Машиностроение”, 1990, 352с.
7. Трояновская И.П. Развитие и анализ взглядов на силовое взаимодействие колеса с грунтом при повороте машины / Сб. научных трудов ”Механика и процессы управления”, Труды 38 Уральского семинара, т.1, Екатеринбург, УрО РАН, 2008, с.230-237.
8. Трояновская И.П. Силовое взаимодействие гусеничного движителя с грунтом на повороте / Тракторы и с-хоз. Машины, №12, 2007, с. 19-20.
9. Савочкин В.А. Тяговая динамика колёсного трактора. – М. – Московский государственный технический университет “МАМИ”, 2005, 96 с.
10. Ягубова Е.В. Метод обеспечения устойчивости колёсного трактора, оснащенного автоматической системой управления движением, при работе на

склоне. – Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. М., 2016.

11. Емельянов А. М. Математическое моделирование исследования криволинейного движения трактора МТЗ-82 со сдвоенными колесами / А. М. Емельянов, С. В. Щитов, Г. Н. Фролова. // Научное обеспечение АПК. Механизация и электрофикация АПК. – 2007. – С. 101–110.

12. Беляев А.Н., Тришина Т.В. Исследование кинематики поворота колёсного трактора /А.Н. Беляев, Т.В. Тришина // Вестник Воронежского государственного университета. – 2016. - №1(48). – С.115-120.

13. Фролова Г. Н. Исследование тягово-сцепных свойств трактора МТЗ-82 со сдвоенными колесами при криволинейном движении в условиях Дальнего Востока: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд.: спец. 05.20.01 "Технологии и средства механизации сельского хозяйства" / Фролова Галина Николаевна – Благовещенск, 2004. – 131 с.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ: КІНЕМАТИКА І ДИНАМІКА КРИВОЛІНІЙНОГО РУХУ

1.1. Кінематика і динаміка криволінійного руху колісних машин.

Трактори при виконанні сільськогосподарських і транспортних робіт рухаються по прямолінійній або криволінійній траєкторії, кривизна якої безперервно змінюється.

Теорія криволінійного руху давно сформувалась як самостійний розділ теорії наземних безрейкових машин і розвивалась виключно як теорія керованого криволінійного руху. В роботі [1] до складу технологічного циклу будь-яких тракторних агрегатів входить криволінійний рух (поворот). Незалежно від частки часу повороту у робочому циклі характеристики криволінійного руху можуть бути визначальними при проектуванні базової машини. Технологічний цикл будь-якого транспортного агрегату включає в себе рух на робочій і транспортній швидкості. Криволінійний рух може здійснюватися на будь-якому з цих режимів. При складанні моделі повороту необхідно передбачити можливість опису кожної опори рушія з урахуванням її нормального навантаження, епюри тисків і розмірів площі контакту. При дослідженні активного повороту довільного транспортного засобу, як правило, вирішуються три основні задачі: оцінка повороткості, стійкості і керованості. Повороткість для колісних ТА оцінюється за мінімальним радіусом повороту. Складання рівнянь криволінійного руху є однією з основних задач моделювання повороту. Для побудови траєкторії руху використовується нерухома система координат. Принципово різні припущення, покладені в основу опису силової взаємодії колісного і гусеничного рушія з ґрунтом, призвели до формування різних методологічних підходів у дослідженні криволінійного руху машин. При вивченні силової взаємодії рушіїв з ґрунтом необхідно передбачити можливість опису кожної конкретної опори рушія індивідуально з урахуванням її форми і розмірів плями контакту з позиції єдиного наукового підходу, який полягає у розгляді контакту у вигляді плоских пар тертя із змінним коефіцієнтом зчеплення.

Найпростішим вважається програмний або координатний спосіб автоматичного управління, за яким положення МТА визначається відносно обраної нерухомої системи координат і порівнюється з тим, яким воно повинно бути згідно з заданою програмою руху. Задана програма містить відомості про необхідні траєкторії, які відтворюються у належній послідовності і які записані в тій же самій системі координат. Для цього можна скористатися двома радіодальномірами, які дозволяють знати поточні значення відстаней від монтованої на тракторі антени до двох нерухомих ретрансляторів. У такий спосіб, яким, до речі, користуються артилеристи, геологи, землеміри і багато інших фахівців, можна розраховувати і порівнювати з заданими поточними координатами МТА.

Останнім часом з'явилися пропозиції користуватися інформацією супутникових навігаційних систем. Але при цьому виникає потреба в дорогому наземному обладнанні. Це так званий метод копіювання сліду типу борозни або якогось штучно створеного сліду. Дорого - ось причина, за якої автоматизація управління трактором поки що залишається тільки в умах вчених та мріях землеробів. І саме за цих причин задача автоматичного керування тракторами поки що не відноситься до першочергових, хоча, без сумніву, вона залишиться однією з найважливіших задач у недалекому майбутньому, тому що «достеменно встановлено, що автоматизація водіння сільськогосподарських МТА забезпечує цілком вагомими ефектами», і це - поліпшення умов праці, якість роботи, підвищення продуктивності, скорочення витрат насіння і засобів хімізації. Нарешті, автоматизація управління – це база для роботизації тракторів [2]. За цих причин вчені продовжують пошуки напрямів розвитку цієї важливої сфери. Ведуться роботи з автоматизації управління навісним та причіпним обладнанням, механізмами самого трактора, тобто наступив час вирішувати проблему комплексної автоматизації МТА. Окрім того, мають місце багато випадків, коли сучасне суспільство не може обійтися хоча би без дистанційного управління машинами і механізмами, наприклад, на металургійних підприємствах, у гірничодобувній промисловості, геологічній розвідці або у надзвичайних ситуаціях,

таких як хімічне та радіоактивне забруднення, пожежа, наслідки природних катаклізмів.

Друга причина, з нашої точки зору, більш важлива у теперішні часи, за якої існує невідкладна потреба в дослідженні криволінійного руху трактора, пов'язана з розворотами агрегатів під час виконання польових робіт, які належить зробити найбільш раціональними і економічними, щоб обмежити непродуктивні витрати потужності і запобігти пошкодженню ділянок землі, на яких виконуються розвороти. Робота машини і обладнання в екстремальних умовах призводить до більш інтенсивного зношування деталей, механізмів і коліс. Підвищується негативний вплив рушіїв на ґрунт. Виникає необхідність у додаткових витратах на приведення у належний стан ділянок землі, на яких виконуються розвороти. Це вже суто економічні питання, і вирішення їх стає можливим тільки на основі детального аналізу кінематики і динаміки криволінійного руху МТА. Для цього необхідні рішення диференціальних рівнянь і отримання результату у вигляді рівнянь траєкторій та інших залежностей. До того ж, існуюча тенденція збільшення ваги транспортних засобів, використання тандемів і автодорожніх потягів в умовах сучасного стану доріг вимагають більш детального вивчення особливостей криволінійного руху машин.

Які питання розвитку тракторобудування хвилюють сучасну науку? Багато уваги приділяється підвищенню тягово-зчіпних властивостей тракторів, підвищенню прохідності МТА і зниженню ущільнюючої дії рушіїв на ґрунт. Рішення цих питань часто вимагають різних, навіть протилежних підходів. Наприклад, зчіпна сила на ведучих колесах тим більша, чим більші вертикальні реакції коліс, але нерівномірність питомого навантаження на колеса трактора негативно впливає на ущільнення ґрунту. Від перерозподілу навантаження на осі залежить також і можливість забезпечити максимальний коефіцієнт корисної дії трактора. Тому не існує загальноприйнятих рекомендацій з цього питання. Щоб обмежити ущільнення, треба прагнути досягнення рівномірного тиску всіх рушіїв, але к.к.д. трактора під час руху по м'якій основі залежить від опору коченню коліс, максимум якого для двовісних тракторів досягає при відношенні вертикального

навантаження на передню вісь до сумарного навантаження на обидві осі 0,48...0,50 [3]. Серед інших, на перший погляд, другорядних питань можна назвати такі як задача підвищення зносостійкості і обмеження пошкоджень шин, необхідність підтримки потрібного тиску в шинах, зниження рівня шуму в мостах, знос та поломки деталей і ланок ходової частини, обмеження коливань коліс під час руху і багато інших. Але однією з найважливіших сучасних проблем при виготовленні і експлуатації тракторів є раціональне використання енергоресурсів та їх економія. На думку більшості науковців паливну економічність слід забезпечувати за рахунок правильного режиму роботи двигуна в залежності від видів робіт. Пропонуються регулятори різних конструкцій, які підтримують відповідну швидкість руху. Ведуться роботи по створенню універсальних регуляторів [4]. Узагальнюючи, можна сказати, що всі вище перераховані напрямки досліджень прямо або опосередковано спрямовані на економію енергії.

1.2. Аналіз графічних способів визначення траєкторій криволінійного руху.

Кінематичний аналіз руху МТА, окрім інших задач, включає визначення траєкторій руху окремих точок, ланок і агрегату в цілому, а також визначення їх лінійних і кутових швидкостей і прискорень. Ця задача може вирішуватися аналітичними, графічними і графоаналітичними способами.

Графічні способи дозволяють отримати наближені рішення таких задач, аналітичні рішення яких викликають великі труднощі. Математичне вивчення руху тракторного агрегату зв'язане з необхідністю установлювати численні функціональні залежності, точне визначення яких не завжди можливе, а взаємодію елементів агрегату між собою і з середовищем важко описати точними аналітичними залежностями. У зв'язку з цим при складанні диференціальних рівнянь і їх рішенні приймаються різні спрощення, допущення, аналогії, які знижують точність результату. За деяких умов неточність може перевищувати похибки приблизних графічних побудов. Тому графічні методи визначення

траєкторій руху, особливо у двомірному просторі, залишаються простим і надійним засобом рішення подібних задач.

В літературі приводиться визначення траєкторії руху центра мас транспортного засобу при поворотах, а також вплив бічного відведення коліс, види відведення та його характеристики під час криволінійного руху [5]. При криволінійному русі на машину завжди діє бічна сила, яка викликається бічною складовою прискорення. При повороті колісних машин кути бічного відведення сумірні з кутами повороту керованих коліс, тому вони здійснюють суттєвий вплив на кінематику повороту, а також на деякі експлуатаційні властивості колісних машин.

В навчальній літературі описані технологічні схеми поворотів агрегатів на різних ділянках поля та види поворотів [6]. При всіх способах руху значну міру шляху агрегату складають повороти та заїзди. Невірно виконані повороти збільшують холостий шлях агрегату до десятків кілометрів за сезон, збільшують поворотні смуги, і за частіше знижують і якість роботи. При гонових (загінних) і деяких інших способах руху повороти здійснюються вхолосту, як правило, на 180° , при коловому (беззагонному) способі руху – при робочому ході або вхолосту – на 90° ; при діагональних способах (рух під кутом до сторони поля). Можливість застосування того чи іншого повороту залежить головним чином від траєкторії центра агрегату при змінному радіусі кривизни, а також від відстані між траєкторіями входу центра агрегату в поворотну смугу і виходу з неї.

Мають місце спроби отримання траєкторій криволінійного руху графоаналітичними методами [7]. Поворотливість колісного МТА оцінюється мінімальним радіусом повороту (відстанню від центра повороту до центра заднього мосту). Основним способом повороту колісного трактора є відхилення напрямку руху однієї пари коліс відносно іншої. При цьому можуть відхилитись одна пара або обидві одночасно. Коли відхиляються дві пари, зменшується радіус повороту, але задні колеса виїжджають в сторону протилежну повороту. Траєкторії відомих та ведучих точок трактора з передньою направляючою віссю будують графоаналітичним методом, запропонованим С.М. Григор'євим та І.Є. Кувчинським. Приводиться порядок побудови траєкторії: визначаються вихідні

дані для побудови входу в поворот, визначення основних характеристик повороту. Траєкторія виходу будується симетрично. Для побудови інших точок слід користуватися шаблоном – масштабною схемою трактора. Однак ці питання ще не можна вважати розробленими у повній мірі.

Як відомо, існує декілька способів здійснювати поворот колісної машини: поворотом керованих коліс однієї або кількох осей, гальмуванням некерованих коліс з одного борту, відносним поворотом частин остова машини. Предметом дослідження у даному випадку є чотирьохколісний трактор з передніми керованими колесами (колісна формула 4К2).

Прийнято розрізняти три ділянки (етапи) повороту машини: вхід в поворот, під час якого збільшується кут повороту керованих коліс; рівномірний поворот при фіксованому положенні керма і з постійною кривизною траєкторії, і вихід з повороту при зменшенні кута повороту керованих коліс.

1.3. Аналіз, недоліки відомих аналітичних рівнянь неусталеного руху.

1.3.1. Рівняння неусталеного криволінійного руху. Дослідженню криволінійного руху машин і особливо машино-тракторних агрегатів (МТА) присвячена велика кількість наукових робіт [8, 9, 10, 2]. Під траєкторією трактора розуміють траєкторію, яка описується центром ваги. Рух з кривизною траєкторії (яка не дорівнює нулю) прийнято називати поворотом.

В роботі Смірнова Г.А. [5] надана загальна теорія руху колісних машин. Однією з основних характеристик механічного руху, в тому числі і руху колісної машини, є траєкторія. Можна розглядати траєкторію руху однієї будь-якої точки та рух або положення інших точок машини по відношенню до центра ваги. Окрім руху проекції центра ваги розглядають рух повздовжньої вісі, яка проходить посередині колії машини та уявляє собою проекцію вертикальної повздовжньої площини, в якій знаходиться і центр ваги. Сили, які формують траєкторію руху, доцільно приймати прикладеними в місцях дійсного прикладання. Ознакою криволінійного руху є непаралельність переміщення будь-яких двох точок машини. В багатьох випадках

важливий не тільки сам факт повороту машини з певним радіусом, але і те, за який час та на який кут зможе повернутися машина. Для повороту машини с заданим радіусом необхідно забезпечити виконання двох умов: можливістю створення достатньої сили тяги ведучих коліс, здатну подолати силу опору руху; відсутність ковзання (буксування) коліс не менш двох осей машини, з яких хоч би одна повинна бути віссю керуючих коліс.

Беляєв О. М. [8] при проведенні досліджень кінематики повороту трактора і автомобіля за мету ставив отримання аналітичних виразів для визначення кінематичних параметрів криволінійного руху колісної машини та досліджував найбільш універсальний спосіб повороту трактора, при якому зміна напрямку криволінійного руху здійснюється поворотом передніх і задніх керованих коліс відносно його остова в різні боки. Він запропонував методики отримання формул для співвідношень між кутами поворотів передніх і задніх керованих коліс, середніми кутами повороту коліс мостів трактора, встановив залежність між початковими відомими конструктивними та експлуатаційними характеристиками для визначення кінематичних параметрів криволінійного руху колісного трактора.

В роботі Ємельянова О. М. [9] при вивченні криволінійного руху МТА основопологаючим є визначення моменту повороту та моменту опору повороту трактора. Дійсний радіус повороту машинно-тракторного агрегату залежить від співвідношення моменту повороту і моменту опору повороту трактора. Чим більше момент повороту і менше момент опору повороту, тим менше значення дійсного радіуса повороту, і він прагне до значення геометричного радіусу. Запропонована математична модель криволінійного руху МТА у вигляді системи диференціальних рівнянь Лагранжа другого роду з трьома невідомими, дозволяє описати закономірності руху машинно-тракторного агрегату в загальному вигляді. В науковій статті обґрунтовано підвищення ефективності використання колісного трактора на прикладі МТЗ-80 класу 1,4 при виконанні ранньовесняних польових робіт на перезволожених ґрунтах за рахунок здвоєння задніх коліс, збільшення продуктивності, покращення тягово-зчіпних властивостей. Дана математична

модель дозволяє описати закономірності руху МТА в загальному вигляді, але рішення відсутні.

В роботі Калініна Є. І. [10] на основі рівнянь Лагранжа 2 роду складені диференціальні рівняння руху навісного тракторного агрегату і отримана система неоднорідних рівнянь другого порядку, яка описує поздовжній рух орного агрегату. В поздовжньому русі навісний орний агрегат розглядається як система з трьома ступенями вільності. Узагальненими координатами агрегату в цьому русі будуть лінійні вертикальні переміщення та поздовжньо-кутові коливання трактора, а також кут повороту нижніх тяг зчипки навколо поперечної осі, яка проходить крізь центри приєднаних шарнірів. Однак рівняння самої траєкторії в статті не приводиться.

В роботі Висоцького [11] розроблена математична модель криволінійного руху m -колісної машини з n ведучими і k керуючими мостами представлена у вигляді рівнянь Апеля, яка основана на моделюванні нелінійного керуючого рульового впливу на рульове колесо, але, знов-таки, без їх вирішення.

В деяких роботах спостерігаються спроби отримати траєкторію повороту. Так, в роботі [12] створена імітаційна математична модель призначена для прогнозування характеристик криволінійного руху автопотягу у складі тягача з колісною формулою 8×8 та багатовісного причепу при різних законах керування поворотом коліс причепу, направлених на підвищення маневреності та забезпечення попадання в заданий коридор руху. Побудована траєкторія входу в поворот автопотягу на основі чисельного моделювання, тобто без аналітичного виразу.

Дослідженню траєкторій повороту або розвороту МТА, під час виконання польових робіт, або довільного транспортного засобу, присвячено також багато праць і світових науковців. Зокрема у праці Мінчжан Сонг [13] висвітлена спроба оптимізувати шляхові точки і продемонструвати створення запланованого шляху для автономних тракторів-косарок з урахуванням поворотів. На основі схем роботи був запропонований алгоритм планування шляху для автономної косарки-трактора. Дані польових випробувань показали деякий збіг, особливо в точках повороту. У роботі Аль-Хайята [14] пропонується для отримання траєкторії криволінійного руху

використовувати змінену траєкторію LSPB з оптимізацією рою частинок (PSO) для створення наскрізних точок на траєкторії. Швидкості отримані PSO, щоб змусити траєкторію LSPB проходити точно через зазначені точки шляху. Результати моделювання показують, що взаємодія зміненої траєкторії LSPB з PSO добре працює на перевірених випадках. Цей запропонований метод дуже простий, і його можна використовувати для оперативного планування шляху.

В статті Камбарова [15] наведені результати експериментальних досліджень з визначення параметрів траєкторії руху чотириколісного бавовницького трактора на базі трактора Кейс 4240X з шестирядним культиватором на поворотній смузі бавовняного поля. За допомогою приладу з маркерів, розміщених у кожного колеса і по осі трактора, відзначали на поверхні поля траєкторію руху. В результаті були отримані польові траєкторії рушіїв трактора, які перетворюються в табличну форму з координатами X і Y .

В роботі Булгакова [16] теоретично проаналізовано поворотну здатність асиметричного агрегатно-тракторного агрегату з урахуванням його швидкості руху і конструктивних параметрів. З урахуванням причіпного асиметричного косарки і тракторного агрегату отримані рівняння для чисельного моделювання оцінки швидкості повороту на поворотній смузі.

У багатьох із них зроблені спроби отримати рівняння траєкторії аналітичними, графічними і графоаналітичними методами. При цьому використовуються як наближені методи, так і точні математичні моделі, надто складні для використання їх на практиці.

В роботі [17] приводяться результати математичного моделювання руху транспортного засобу з метою встановлення оптимальних конструктивних і експлуатаційних параметрів при виконанні певних технічних операцій. Вихідними параметрами моделі являються кінематичні характеристики ободу колеса – координати лінійної та кутової швидкості на інерційні координатні вісі та рухливі вісі, які пов'язані з колесом. Ця модель дає можливість визначати як кінетичні характеристики тіл, так і величини сил, які взаємодіють між ними.

В роботах [18, 5] вивчається кінематика довільно розташованої опори (колеса або гусениці) через визначення руху миттєвого центра швидкості. Встановлені загальні кінематичні зв'язки при взаємодії колісного або гусеничного рушія з ґрунтом в керованому і некерованому повороті. Приведені основні теореми, які пов'язують положення центрів зрушування, а також миттєві центри ковзання опорних площадок коліс (гусениць) при стаціонарному та нестаціонарному русі з центром повороту машини.

Відомі також спроби аналізу силової взаємодії колеса з ґрунтом під час повороту [19]. Для дослідження поведінки машини на повороті використовуються рівняння руху, до яких входять реакції з боку ґрунту. В роботі запропонована модель силової взаємодії, яка заснована на законах механіки і математичної теорії тертя, і описує сили реакції ґрунту, як функції координат миттєвого ковзання плями контакту, що зводить силову задачу до кінематики руху колеса. Це дозволяє спільно вирішувати силове і кінематичне завдання, що підтверджує їх взаємозв'язок і взаємозалежність. Модель описує кожне колесо окремо, з урахуванням режиму руху колеса (ведуче, відоме та гальмівне), пружні властивості пневматичної шини і деформацію ґрунту.

Але є спроби отримати координати траєкторії експериментальним шляхом та за допомогою яких і відтворити траєкторію на поворотній смузі. В статті Камбарова [20] наведені результати експериментальних досліджень з визначення параметрів траєкторії руху чотириколісного бавовницького трактора на базі трактора Кейс 4240Х з шестирядним культиватором на поворотній смузі бавовняного поля. За допомогою приладу з маркерів, розміщених у кожного колеса і по осі трактора, відзначали на поверхні поля траєкторію руху. В результаті були отримані польові траєкторії рушіїв трактора, які перетворюються в табличну форму з координатами X і Y .

Час повороту займає значну частину операцій, що виконуються навісними і тракторними агрегатами, особливо на полях з короткими пробігами. Невірно виконані повороти збільшують ширину поворотних смуг, значно збільшуючи холостий хід агрегату навісного обладнання і трактора, що негативно позначається

на його ефективності. В науковій роботі Булгакова [21] було теоретично проаналізовано поворотну здатність асиметричного агрегатно-тракторного агрегату з урахуванням його швидкості руху і конструктивних параметрів. Беручи до уваги причіпну асиметричну валкову жатку і тракторний агрегат, отримані аналітичні рівняння дозволили провести чисельне моделювання, щоб оцінити маневреність повороту на поворотній смузі цього агрегатно-тракторного агрегату. Показник маневреності повинен підтримуватися на встановленому рівні під час поворотів агрегату навісного обладнання і трактора. Тому трактори повинні бути оснащені відповідними пристроями, які можуть автоматично регулювати швидкість руху трактора на поворотній смузі і або середню кутову швидкість повороту його ведучих коліс, щоб підтримувати значення показника маневреності стабільним.

1.3.2. Спосіб урахування впливу явища відведення коліс. Серйозним поштовхом у розвитку теорії повороту автомобіля послужило відкриття Г. Брюльє у 1925 р. явища бічного відведення коліс, обладнаних еластичними шинами. Як відомо, кут між вектором швидкості колеса і позитивним напрямом осі машини, який відповідає нейтральному положенню коліс, називається кутом відведення. Відомо також, що кути відведення, які виникають при криволінійному русі колісних машин внаслідок деформації шин, деформують траєкторію руху і спричиняють суттєвий вплив на керуваність машини. Тому не випадково дослідженню причин відведення та його залежності від різних факторів присвячена велика кількість робіт авторами В.П. Горячкін, В.В. Гуськов, А.С. Литвинов та багатьох інших. Теорія відведення коліс викладається в навчальній літературі з даного предмету, але, незважаючи на це, не можна вважати, що явище вивчено у достатній мірі, щоб його можна було правильно враховувати при визначенні траєкторій руху, що особливо важливо при розробці способів автоматичного керування транспортними засобами. Слід зазначити, що кути відведення коліс залежать від багатьох факторів, і ці залежності мають, як правило, досить складний характер. Так, наприклад, залежність між бічною силою і кутом відведення при постійному навантаженні на колесо може бути лінійною тільки при невеликих значеннях бічної сили і за умови,

що колесо котиться без ковзання [22]. Відхилення середньої площини колеса від напрямку руху викликається не тільки еластичністю шин, але й ковзанням плями контакту, а також піддатливістю ґрунту, що особливо важливо для тракторів під час руху при виконанні польових робіт. Відведення коліс супроводжується бічним ковзанням, яке стає переважаючим, коли бічна сила досягає значення сили зчеплення, при цьому кут відведення зростає навіть при постійній бічній силі. На коефіцієнт опору бічному відведенню впливають такі конструктивні і експлуатаційні фактори, як розміри і конструкція шини, тиск повітря в шині, характер і значення сил, що діють на колесо, стан опорної поверхні, кривизна траєкторії і особливо швидкість руху.

Д. А. Антонов на підставі теорії нелінійного відведення для отримання дійсного значення коефіцієнта опору відведенню запропонував множити деякі постійні величини цього коефіцієнта на додаткові коефіцієнти (що враховують вплив різних факторів на величину коефіцієнта опору бічного відведення): нормального навантаження, дотичної реакції, коефіцієнта зчеплення та інших - всього сім коефіцієнтів [22]. Він запропонував визначати значення коефіцієнта опору бічному відведенню в залежності від деякої сталої величини цього коефіцієнта і ряду змінних інших коефіцієнтів. Застосувати їх в теоретичних дослідженнях практично неможливо. Складно також використати для отримання рівнянь руху і формули для кутів відведення передніх і задніх коліс, наведені в [16], через їх громіздкість. Тому не випадково з'являються роботи, в яких вводяться спрощуючі припущення, якщо вони істотно не впливають на кінцевий результат. Наприклад, в роботі [23] бічна сила розподіляється між мостами пропорційно жорсткості їх підвісок, кути розвалу керованих коліс приймаються рівними нулю, кути бічного відведення коліс однієї осі вважаються однаковими, коефіцієнти опору відведенню коліс, швидкість руху машини і реакції на колеса – постійними. При таких припущеннях кути бічного відведення залишаються пропорційними бічним силам, які, в свою чергу, пропорційні квадрату швидкості руху машини і оберненопропорційні радіусу повороту. Автори стверджують, що отримані при таких припущеннях результати можуть бути використані тільки в попередніх розрахунках. Незважаючи на це,

використання навіть таких припущень не спрощує, наприклад, завдання знаходження рівняння траєкторії руху.

Відомо, що в реальних умовах експлуатації машин кути бічного відведення не перевищують $7...8^\circ$, в деяких випадках вони досягають $10...12^\circ$ [5]. При таких малих межах майже не має значення, як складно змінюються ці параметри. Завжди можна підібрати закономірність, яка не дуже відрізняється від реальної. Правда, лінійна залежність кутів бічного відведення від бічної сили часто переходить в нелінійну вже при кутах бічного відведення $2...4^\circ$, після чого мають переважний вплив не стільки пружні деформації шин, скільки їх ковзання. Однак ця нелінійність в межах реальних значень кутів відведення настільки незначна [24], що можна з невеликими похибками приймати пропорційну залежність між зміною курсового кута внаслідок відведення коліс і кутом повороту корпусу машини. Коли ж бічні реакції досягають сили зчеплення, відбувається повне ковзання колеса убік. Але і з цим явищем можна боротися відомими способами, з тим, щоб розширити межі прямої пропорційності.

1.4. Аналіз універсальних рівнянь траєкторій криволінійного руху чотирьохколісної машини.

Швидкість руху і значення сил, які діють на агрегат, безпосередньо не впливають на траєкторію криволінійного руху. При ідеальних умовах, коли відсутні ковзання, юз і відведення коліс, траєкторія залежить тільки від закономірності руху керма. Швидкість руху впливає на траєкторію не безпосередньо, а саме через ковзання, юз і відведення коліс, які у свою чергу залежать від стану шин, тиску в шинах і властивостей ґрунту чи дороги, по якій рухається транспорт. У будь-якому випадку траєкторію руху колісної машини створює кермо, а всі інші фактори можуть лише деформувати її.

Траєкторія криволінійного руху колісного трактора залежить, в основному, від інтенсивності повороту керма і ще, в деякій мірі, від кутів відведення коліс, які у свою чергу залежать від швидкості руху та розподілення рушійної потужності між ведучими осями у разі повнопривідної машини. Це основні фактори, пов'язані

безпосередньо з машиною, і які визначають кривизну траєкторії. Окрім цього, існує багато інших факторів, які залежать від властивостей ґрунту, рельєфу, характеру навантаження, виду причіпних чи навісних знарядь. Поворотливість машини і, відповідно, крутизна траєкторії у великій мірі залежать від кінематичної схеми ходової частини: з керованими колесами однієї осі чи обох осей, з усіма керованими колесами, або з шарнірною рамою, яка має можливість складатися, зламуватися у площині руху. Кут повороту корпусу машини φ є метою дослідження, і саме цей кут необхідно забезпечити під час керування рухом машини чи агрегату.

Важливість вирішення цієї задачі, перш за все, пов'язана з недостатнім використанням потужності двигунів сучасних тракторів, яке складає від 40 до 88 %, що призводить до втрат енергетичних ресурсів, збільшення трудомісткості ремонту та обслуговування. Суттєві недоліки управління тракторними агрегатами можна усунути в значній мірі за рахунок використання часткової або повної автоматизації. За таких обставин в умовах польових робіт необхідно визначати положення МТА відносно обраної системи координат і порівнювати їх з тими координатами, які мають бути під час виконання програми руху, що існує в пам'яті тієї ж системи координат. Тобто необхідно мати рівняння траєкторії руху в доступній для використання формі. Такі рівняння складаються, як правило, за принципом Д'Аламбера або на основі рівнянь Лагранжа. Але їх рішення поки що не існують.

1.5. Динаміка повороту тракторного агрегату.

1.5.1. Диференціальні рівняння руху агрегату. Динамічні задачі криволінійного руху колісних машин потребують складання диференціальних рівнянь другого порядку, які містять цілий ряд змінних величин, що мають досить складну і, як правило, невизначену залежність від багатьох факторів. В літературі є багато прикладів складання таких рівнянь, пропонуються математичні моделі, які описують динаміку повороту машин і шляхи їх рішення [22, 25]. В роботі [10] отримана система диференціальних рівнянь в узагальнених координатах, яка описує поздовжній рух орного агрегату. Часто використовуються наближені методи

рішення. Рівняння, які описують поведінку тракторного агрегату, враховують динамічні співвідношення по принципу Даламбера або на базі рівнянь Лагранжа другого роду. При цьому приймаються до уваги всі сили взаємодії трактора з ґрунтом і причіпним або навісним обладнанням. У зв'язку із складністю цієї силової гри виникає необхідність у багатьох допущеннях і спрощеннях. Наприклад, курсовий кут α вважається настільки малим, що можна прийняти $\sin \alpha \cong \alpha, \cos \alpha \cong 1$. Але у рівняннях проекцій сил на осі координат приходиться користатися сумами кутів $(\alpha + \varphi)$ або $(\alpha_1 + \varphi)$, або й просто кутом φ , який може змінюватися від 0° до 90° . Тоді рішення цих рівнянь значно ускладнюється. Тому наукова думка дійшла висновку, що поведінку трактора під час повороту можна описати диференціальним рівнянням виду [2]:

$$T \frac{d\omega}{dt} + \omega = k\alpha, \text{ де} \quad (1.1)$$

де T – постійна часу, ω – кутова швидкість повороту, k – коефіцієнт передачі, α – керуючий вплив.

Останній параметр для колісного трактора – це кут повороту передніх керованих коліс або кут зламу рами при шарнірній конструкції корпусу. Що ж до T і k , то ці величини залежать від параметрів трактора, ґрунту, виду обладнання, тощо. Для їх визначення треба знов скористатися якоюсь штучною схемою, що ще більше віддалить нас від можливості дослідити вплив реальних факторів на параметри криволінійного руху машини.

Як правило, вивчення криволінійного руху МТА обмежується оцінкою його стійкості і керованості, а динамічні характеристики агрегату та їх вплив на його рух при цьому не розкриваються, хоча існують спроби рішення цієї задачі. Так, наприклад, в роботі [26] запропоновані математичні моделі руху МТА, згідно з якими агрегат розглядається як багатоланковий об'єкт, складові частини якого визначаються за допомогою силових факторів з урахуванням режимів руху цих частин і їх взаємодії між собою і з ґрунтом. При цьому використовуються лінійні співвідношення між похідними вільних параметрів і узагальненими швидкостями. Рівняння руху агрегату враховують і бокове відведення еластичних шин та інші

взаємодії з опорною поверхнею, а також розміри причіпного знаряддя. Автор стверджує, що виявлені за допомогою розробленого методу закономірності дозволяють вибрати режими руху МТА, які забезпечують високу продуктивність, мінімальні енерговитрати на рух, екологічну сумісність з ґрунтом, а також виконання вимог щодо стійкості руху і керованості. Час повороту скорочується в 1,5 рази, середня швидкість збільшується на 4...5 %. Зменшується на 20...30 % площа взаємодії ходових механізмів з ґрунтом, а тяговий к.к.д. трактора підвищується на 4...7 %. Зменшуються також зусилля водія на кермі. Оцінка енерговитрат під час руху МТА виконувалася експериментальним вимірюванням роботи сил за певний проміжок часу.

Представлені у цій роботі математичні моделі руху МТА вирішувалися методами чисельного інтегрування, які дозволили запропонувати пакети прикладних програм для різних швидкостей. Наведений приклад наочно показує, що роботи у цьому напрямку мають велике практичне значення і їх необхідно продовжувати. Для поглиблення аналізу перерахованих вище питань необхідно отримати точні аналітичні рішення диференціальних рівнянь руху МТА.

В роботі Трухнова [27] спроба такого підходу зроблена за допомогою моделювання і аналізу повороту на горизонтальній поверхні з однорідним фоном трьохвісної шарнірно-з'єднаної машини БелАЗ-75281 з використанням методів віртуального моделювання в різних умовах руху. Багато-параметрична система рівнянь вирішувалася методом Рунге-Кутта; при цьому були отримані 18 рівнянь, в результаті рішення яких було визначено момент, необхідний для повороту, та інші параметри. Автор стверджує, що результатів такого роду досліджень у наш час ще не існує.

В роботі Фоміна [28] представлена динамічна математична модель сталого криволінійного руху для навантажувально-транспортного агрегату. За основу для моделювання взята просторова схема агрегату, яка дає можливість врахувати перерозподіл нормальних реакцій при криволінійному русі. Представлена сукупність розроблених математичних моделей для дослідження динаміки несталого криволінійного руху навісних навантажувальних маніпуляторів на базі

колісних тракторів, самохідних шасі, енергетичних модулів. Модель містить основні розділи: а) математична модель, що описує поступальний рух трактора вздовж осей X , Y , Z ; коливання трактора в горизонтальній, поздовжньо-вертикальній і поперечній площинах; б) математична модель, що описує поступальний рух маніпулятора, коливання маніпулятора в поздовжньо-вертикальній і горизонтальній площинах; в) математична модель моторно-силової установки, що описує обертальний рух махових мас двигуна, трансмісії і провідних коліс трактора. Моделі враховують піддатливості шин в бічному, нормальному і тангенціальному напрямках, змінний динамічний радіус кочення коліс, нерівності поверхні кочення, пружно-дисипативні і інерційні властивості трансмісії, характеристику двигуна, нелінійну модель відведення, що дозволяє досить детально дослідити динаміку криволінійного руху ПТА: «енергетичний модуль + навантажувальний маніпулятор»; на стадії проектування проводити порівняльні оцінки стійкості і керованості створюваних агрегатів, підбирати раціональні параметри маніпулятора і його раціональне розміщення в агрегаті з точки зору курсової стійкості, стійкості від перекидання і керованості. В результаті експериментально були отримані траєкторії руху з урахуванням відведення при максимальному положенні керованих коліс. В статті наведена велика кількість математичних рівнянь, але вони надто складні для застосування на практиці.

1.5.2. Кутова швидкість обертання корпусу машини в повороті. Однією з важливих задач сучасного тракторобудування є автоматизація управління агрегатами. Застосування технологій автоматичного керування надає можливість зменшити втомлюваність тракториста, а, відповідно, збільшити його працездатність і продуктивність, однак вартість таких послуг велика. В основному розробкою і виробництвом таких систем є закордонні компанії.

В деяких системах автоматичного керування, наприклад, в системі TrimbleAgGPSAutopilot (США), застосовуються технології компенсації нерівностей при роботі на нерівній опорній поверхні. Внутрішній датчик положення відслідковує рух агрегату в шести напрямках і виправляє всі відхилення від курсу

при крені машини. Фіксується поперечний кут і кут відхилення повздовжньої осі від курсу руху, а також швидкість зміни даних параметрів.

Слід зазначити, що автопілот, не заміняє механізатора. При виконанні технологічної операції механізатор виводить трактор на край поля, задає базову лінію автопілоту (пряма лінія відмічається трактором або крива лінія), проїжджає її. Після цього, перед заїздом на наступний ряд, обирає параметри автопілоту, включає його та продовжує рух в режимі розвертання. Тепер механізатор контролює тільки швидкість руху трактора, автопілот сам змінює курс в залежності від налаштувань. Але об'їзд перешкод контролює механізатор. При необхідності він має можливість втрутитися в маршрут – при будь-якому повороті руля автопілот вимикається, і керування передається людині. Включення автопілоту здійснюється повторним натиском на кнопку.

Але, одним з недоліків даної системи можна назвати необхідність установки по краям поля базових станцій, які будуть визначати місцеположення трактора на полі. Зв'язок здійснюється за допомогою супутникової системи GPS, і відповідно, ускладнюється робота в районах, де приймання сигналу може бути ускладненим.

Але ще залишаються невирішеними до кінця і такі класичні задачі, як кінематика і динаміка криволінійного руху з урахуванням різних факторів, які впливають на траєкторію руху і її параметри. Криволінійний рух (поворот) має місце під час роботи будь-якої транспортної або тягової машини. Теорія повороту нараховує численну кількість різних моделей руху. Рух МТА під час повороту завжди супроводжується ковзанням, часто має місце так званий пасивний поворот під дією зовнішніх сил (бокових, сил інерції та інших) без керуючої дії з боку водія. Ці специфічні особливості мають значення при проектуванні нових або дослідженні роботи існуючих машин. Тому вивчення криволінійного руху машин все ще залишається важливою темою наукових досліджень.

Динаміка криволінійного руху колісних машин – досить складна задача; вона пов'язана з урахуванням змінних у часі за невизначеними закономірностями силових і кінематичних факторів і необхідністю вирішувати диференціальні рівняння з багатьма аргументами. В літературі зустрічаються приклади складання

таких рівнянь і пропозиції математичних моделей, що описують динаміку повороту машин. Наприклад, Є. І. Калінін пропонує систему диференціальних рівнянь в узагальнених координатах [10].

Є. В. Ягубова [25] запропонувала рівняння руху МТА і метод забезпечення стійкості колісного трактора в умовах роботи на схилах. Зв'язок між кінематичними параметрами і зовнішніми збуреннями встановлюється диференціальними рівняннями. Система рівнянь руху трактора включає динамічні рівняння, які описують рух трактора, отримані на основі закону збереження кількості руху і моменту кількості руху. Кінематичні рівняння зв'язку кутових та лінійних швидкостей з кутовими і просторовими координатами отримані на основі рівнянь зв'язку між різними координатними системами. Якщо ввести стабілізуюче керування шляхом корекції кута повороту передніх коліс, то при цьому зона нестійкого руху зменшиться, а зона стійкого, відповідно, збільшиться. Введення підрулювання передніх коліс підвищує запас стійкості трактора.

О. В. Рославцев розробив математичну модель руху МТА з урахуванням характеристик причіпного знаряддя і отримав пакети прикладних програм, які забезпечують вимоги щодо стійкості руху і керованості при різних швидкостях [26]. Агрегат представлений багатоланковим матеріальним об'єктом, складові частини якого визначаються не тільки за допомогою силових факторів, але і з урахуванням масо-геометричних розмірів та режимів руху цих частин, особливостей взаємодії їх між собою та з ґрунтом. Розроблені моделі і засоби досліджень, які забезпечують вибір параметрів та режимів руху, при яких досягається висока ефективність і раціональне співвідношення між ростом ресурсів, продуктивністю та використанням енергетичного потенціалу агрегату.

Існують спроби аналізу повороту машин з використанням методів віртуального моделювання [27], при цьому для визначення основних параметрів криволінійного руху необхідно було вирішити 18 рівнянь. Майже всі ці дослідження ставлять за мету отримання математичних моделей руху у вигляді диференціальних рівнянь, які виявляються надто складними для використання їх на практиці.

1.6. Аналіз існуючих сучасних систем автоматичного керування агрегатами.

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].

Однією з найважливіших завдань сільськогосподарського виробництва є підвищення продуктивності праці на операціях по вирощуванню сільськогосподарських культур при одночасному збереженні високої якості виконуваних робіт.

При русі машинно-тракторних агрегатів (МТА) в складі колісного трактора і сільськогосподарських машин, які агрегуються з ним, відбувається відхилення від заданої траєкторії внаслідок збурень з боку опорної поверхні, дії сил інерції, нахилу опорної поверхні. При цьому утворюються огріхи, відбувається збільшення шляху і підвищується витрата палива, витрата насіння і добрив, збільшуються психомоторні витрати механізатора на управління. При обприскуванні відбувається перекриття зон запилення, що призводить до підвищеної витрати гербіцидів і отруєння рослин при передозуванні. При спробах підвищити швидкість руху водій не встигає реагувати на відхилення і змушений знижувати швидкість, що призводить до зниження продуктивності праці [29].

Одним з найбільш ефективних способів зниження впливу перерахованих вище негативних моментів на якісні та кількісні показники роботи МТА є використання систем прецизійного землеробства на основі супутникової навігації.

Точне землеробство докорінно змінило традиційні сільськогосподарські технології. Впровадження технологій точного землеробства в господарстві підвищує

ефективність і продуктивність на кожному етапі сільськогосподарських робіт – шляхом оптимізації використання добрив і засобів захисту рослин, скорочення витрат і поліпшення якості посівів. Завдяки яким фермери отримують можливість точного ведення своєї техніки в полі з одночасним зниженням стомлюваності операторів і скороченням витрат палива. Точне землеробство стає доступним і ефективним при земельному банку від 500-1000 га. Зараз на світовому ринку є п'ять провідних виробників спеціального устаткування для точного землеробства: Trimble, Raven, Hexagon, John Deere та Precision Planting. Виробники сільськогосподарської техніки мають партнерські угоди з цими спеціалізованими гігантами.

Майже 80% аграріїв у США впроваджують ті чи інші елементи точного землеробства – показник досить промовистий. Адже хто-хто, а американці вміють рахувати прибутковість. 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 [30].

В Україні подібної статистики не існує. Вірніше, її ніхто не збирав і не узагальнював. Лише в деяких компаніях, котрі просувають на ринку свої послуги та інструментарій, є свій сегментний погляд на ситуацію [31]. Але ринок технологій точного землеробства в світі до кінця року досягне \$3,3 млрд., а до 2025 року він зросте до \$10,2 млрд. Наразі в Україні точним землеробством охоплено лише 15% сільгоспземель. Однак, ця цифра швидкими темпами збільшується [32].

В даний час застосовуються в сільському господарстві прилади, пов'язані з космічними навігаційними системами, які підрозділяються на дві групи: системи паралельного водіння і автопілот. Автопілот призначений для автоматичного коректування напрямку руху трактора. Для цього до керма підключається спеціальний прилад - пристрій, що підрулює. Він може бути електричним і гідравлічним [33].

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.

Система паралельного водіння заснована на використанні сигналу супутникової навігації. При цьому, якщо використовувати безкоштовний GPS-сигнал, рух сільгосптехніки по полю здійснюється з точністю до 30 см. При роботі з платним сигналом точність доходить до 2,5 см. Використовуючи платний сигнал, можна радикально скоротити площу пропущених (необроблених) або двічі оброблених ділянок поля. Також скорочується довжина холостого ходу техніки і ширина розворотної смуги. В цілому сильно знижується (до 20%) питома кількість використовуваних ресурсів - палива, насіння, добрив [34].

Система паралельного водіння складається з встановлюваного на тракторі приймача сигналів системи глобального позиціонування GPS (Global Positioning System), контролера і курсовказувача – екрану, що відображає збіг або відхилення траєкторії руху трактора від заздалегідь заданої. При роботі механізаторові необхідно ввести ширину захвата і зафіксувати координати початку руху. А після першого проходу вказати точку завершення руху. Площа і форму поля можна визначити декількома способами, наприклад, заздалегідь обвести поле по контуру на супутникових знімках Гугла, Яндекс, або просто один раз об'їхати по контуру. У другому випадку можна навіть вказати, з зовнішньої, або з внутрішньої сторони кордону поля ви його об'їхали і відстань до краю поля при його об'їзді [35]. Прилад самостійно проаналізує дані, побудує паралельні лінії, збереже їх в пам'яті і виведе на монітор вказувача курсу. Система управління дозволяє запам'ятати курс і направляє трактор строго паралельно лінії, зафіксованої при першому проході агрегату. Техніка працює за допомогою систем супутникової навігації як прямолінійно, так і криволінійно.

Користуючись підказками курсовказувача, можна вести трактор по полю будь-хто, якої завгодно складної форми, без пропусків і перекриттів, з точністю до 20-40 см вдень і вночі, в будь-яку погоду. Значення такої можливості важко переоцінити, коли через несприятливі погодні умови для проведення польових робіт є невелике «вікно» в 2-3 дня, з яких не можна втрачати буквально жодної години. Курсовказувач ніяк не пов'язаний з трактором і може легко переставлятися з однієї одиниці техніки на іншу. Не знадобиться багато часу для настройки системи. Нескладно і з навчанням. [36]

Однак система паралельного водіння може не тільки підказувати, але і сама вести трактор, або комбайн. Для цього до курсовказувача підключається автопілот і підрулювач пристрою [35].

Електричний автопілот – автоматичний підрулювач. Електричний автопілот здійснює управління технікою без вбудовування в гідравлічну систему. Це більш економний варіант для непідготовленої розробником техніки. Комплектується підрулюючим механізмом з кріпленням на вал, навігаційним контролером, деталями для кріплення і кабелями для харчування.

Автопілот в залежності від моделі встановлюється без зняття рульового колеса (Raven Smartsteer, OnTrac3), або вимагає установки електричного керма (TopCon X25, AgGPS EZ-Pilot). Електричне кермо може встановлюватися на трактор будь-якого виробництва, в тому числі на необладнані моделі.

Електричні автопілоти обладнані вбудованим компасом, технологіями компенсації нерівностей, датчиками кута повороту, гіроскопами, акселерометрами. При управлінні електричним автопілотом обертальне зусилля передається безпосередньо на вал, що виключає вплив люфту на точність, за рахунок надійного зчеплення усувається ковзання.

Автопілот складається з електрогідравлічної системи автоматичного керування трактором, що забезпечує автопілотування агрегату на полі. Принцип роботи автопілоту досить простий. Трактор встановлюється на початку ділянки, і механізатор задає тип руху. Тут є кілька варіантів: рух прямими паралельними лініями, їзда по контуру поля або ручні настройки водіння. При пересуванні по

прямим досить вказати пункти початку і кінця. При непрямолінійності руху перший прохід здійснює оператор, після чого включає автопілот і трактор повторює рухи по заданій кривій. Система переходить в ручний режим при будь-якому повороті керма, а повторно включається при натисканні відповідної клавіші. На окремих моделях включення/вимикання може проводитися за допомогою спеціальної педалі або сенсорного дисплею. Тракторист допомагає процесу управління трактором тільки на поворотах, що дозволяє йому зосередити увагу на технологічному процесі і фізично менше втомлюватися. Електричний автопілот - це найдешевше рішення. Однак воно має деякі недоліки – діє з деяким запізненням [33].

Гідравлічний автопілот. Система гідравлічного автопілоту включає в себе гідравлічний керуючий блок, контролер з приймачем сигналу і датчик положення коліс. Забезпечує точність управління при роботі на полях з нахилами і перепадами висоти. Агресивність повернення на курс налаштовується оператором.

Ефект установки гідравлічного автопілоту – досягнення максимальної точності всіх видів робіт (суцільна культивування, передпосівна культивування, сівба, міжрядна культивування, обприскування, внесення добрив і ін.). Збільшення продуктивності за рахунок роботи в нічний час.

При багаторазовому проході техніки по одному і тому ж маршруту неминуче укочуються колії. При застосуванні менш точних систем автоматичного водіння колія має нерівності, з якими важко боротися при виконанні робіт в кінці сезону. Колія сільгосптехніки, яка обладнана гідравлічним автопілотом рівна і не впливає на виконання точності робіт. Це важливо при обробці просапних культур. Поліпшується точність міжрядної культивування, забезпечується захист рослин при внесенні гербіцидів.

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 слабе, 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 [37].

Час відновлення на курс відрізняється в залежності від потужності гідроблоку. При недостатній потужності (до 100 літрів за хвилину) на великих тракторах може спостерігатися пошук керма з плавним виходом на курс. Для усунення цього ефекту потужність гідроблоку автопілоту повинна бути відповідною до потужності гідравлічної системи агротехніки.

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.

У науковій роботі Ван та Ногучі [38] представлений адаптивний алгоритм повороту чотириколісного робототрактора на мисі з використанням кінематичної системи глобального позиціонування в режимі реального часу (GPS). Цільова функція, заснована на вагах, була використана для створення навігаційного шляху, що з'єднується за допомогою безперервних примітивів. Щоб точно слідувати траєкторії, враховували рух ковзання робота та швидкість рульового управління, оцінюючи радіус повороту в реальному часі. Крім того, модель автомобіля була налаштована на основі результатів кожного повороту. Тому алгоритм управління поворотом був оптимізований на основі конкретних умов на місцях. Польові експерименти показали, що робот-трактор наближався до наступного шляху із середнім поперечним відхиленням 3,9 см зі швидкістю 1,2 м / с під час повороту. Порівняно із звичайною схемою повороту, витрата часу та траєкторія повороту зменшились на 17% та 21% відповідно.

Наприклад, схема планування руху і динамічного перепланування на основі вибірки з одним запитом була теоретично досліджена в Ref. [39]; і динамічні обмеження були розглянуті і оцінені за допомогою розвідувального роботизованого транспортного засобу [40].

Перераховані вище системи недешеві. Наприклад, система автопілотування від фірми «Джон Дір» коштує близько 21000 євро для колісних і 16500 євро для гусеничних тракторів. Система паралельного водіння трохи дешевше і коштує від 5000 до 6000 євро.

З швидким розвитком безпілотних технологій в сучасному сільському господарстві автоматичне планування маршруту грає важливу роль в роботі сільськогосподарських полів, а розворот сільськогосподарських машин на поворотних смугах є важливою частиною цього процесу [41]. Поворот на розворотній смузі повинен виконуватися за мінімальний час і переміщатися в обмежених умовах бездоріжжя [42]. Оптимізація управління поворотом на поворотній смузі може допомогти стабільно скоротити час і витрата палива, а також максимізувати ефективність використання поля, а також може просто вплинути на створення запланованого шляху. Тому для підвищення ефективності використання

мобільної сільськогосподарської польовий техніки з автоматичним управлінням оптимізація траєкторії повороту на поворотній смузі представляє великий інтерес для виробників сільськогосподарської техніки.

З метою дослідження та обґрунтування ефективних методів використання польових агрегатів необхідно отримати універсальні рівняння неусталеного криволінійного руху чотирьохколісних машин з передніми керованими колесами.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішувати наступні задачі:

– отримання аналітичних рівнянь траєкторій руху чотирьохколісної машини на ділянках входу в поворот, виходу з повороту, а також під час повороту з фіксованим положенням керма при довільних значеннях початкових параметрів руху;

– розробка способу спряження траєкторій входу в поворот, повороту з фіксованим положенням керма і виходу з повороту;

– розробка програми побудови складних траєкторій;

– урахування явища відведення коліс, викликаного дією бічних сил.

Висновки по розділу 1.

З аналізу даних відомих літературних джерел встановлено, задача автоматичного керування трактора залишається однією з найважливіших в сучасному сільськогосподарському машинобудуванні.

Існує потреба в дослідженні траєкторії руху трактора, пов'язана з розворотами при виконанні технологічних операцій, що зв'язано з зменшенням непродуктивними витратами потужності та збереженням фізико-механічних властивостей ґрунту. Рациональні траєкторії руху агрегату впливають на економічність режимів роботи двигуна.

Непродуктивні витрати енергії можуть бути зменшені за рахунок оптимізації маневрів агрегату при розворотах при виконанні технологічних операцій.

Резервом економічно ефективності роботи агрегату є холостий шлях, який залежить від способу руху МТА, його кінематики і динаміки.

Кінематика руху МТА включає траєкторію руху окремих ланок і агрегату в цілому, а також визначення їх лінійної та кутової швидкостей та прискорень.

Список використаних джерел.

1. Трояновська І.П., Пожидаєв С.П. Моделювання криволінійного руху колісних і гусеничних тракторних агрегатів. Монографія / за ред. д.т.н. І.П. Трояновської. – Київ: АграрМедіаГруп, 2013. – 303 с.
2. Шипилевский Г.Б. Тракторная автоматика. Конспект лекцій по дисциплине “Автоматические системы колёсных и гусеничных тракторно-тяговых машин”. М.: МГТУ “МАМИ”, 2005. – 66 с.
3. Поляшенко С. О. Підвищення ефективності колісних тракторів шляхом перерозподілу нормальних реакцій ґрунту по осях/С. О. Поляшенко, О. В. Єсіпов, О. В. Погорєлов, О. А. Роляк // Вісник Харк. нац. техн. ун-ту сіл. госп-ва ім. П. Василенка. Технічні науки. -Харків: ХНТУСГ, 2012. т. Вип. 124: Механізація с.-г. вир-ва, N Т. 2.-С.55-61.
4. Головчук А. Ф. Експлуатаційні дослідження колісного трактора з універсальним регулятором швидкості. [Електронний ресурс] / А. Ф. Головчук, Р. М. Харак // Technology audit and production reserves — № 1(1). – 2011. – Режим доступу до ресурсу: https://www.researchgate.net/publication/312250136_Operational_research_wheeled_tractors_with_universal_controller_speed/fulltext/587ba4fa08ae9275d4e00893/Operational-research-wheeled-tractors-with-universal-controller-speed.pdf
5. Смирнов Г.А. Теория движения колёсных машин. – М. “Машиностроение”, 1990, 352 с.
6. Иофинов С.А., Лышко Г.П. Эксплуатация машино-тракторного парка. – М.: Колос, - 1984, 351с.
7. Анилович В.Я., Водолажченко Ю.Т. Конструирование и расчёт сельскохозяйственных тракторов. Справочное пособие. Изд. 2-е, переработ. и доп. М., «Машиностроение», 1976, 456 с.
8. Беляев А. Н. Исследование кинематики поворота колёсного трактора / А. Н. Беляев, Т. В. Тришина // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2016. – № 1 (48). – С. 115-120.

9. Емельянов А. М. Математическое моделирование исследования криволинейного движения трактора МТЗ-82 со сдвоенными колёсами / А.М. Емельянов, С. В. Щитов, Г.Н. Фролова [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.vestnik.dalgau.ru/images/gurnal/vipusk_2007/nomer_1/emelyanov.pdf.

10. Калинин Е. И. Уравнение движения навесного пахотного агрегата [Электронный ресурс] / Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко. — Загл. с экрана. – Режим доступа: http://www.rusnauka.com/27_NII_2008/Agricole/35330.doc.htm

11. Высоцкий, М. С. Математическое моделирование криволинейного движения колесных машин [Текст] / М. С. Высоцкий, Д. А. Дубовик // [Вестник Белорусско-Российского университета](#). – 2008. – №2. – С. 6-15.

12. Горелов, В. А. Математическая модель криволинейного движения автопоезда по недеформируемому опорному основанию [Текст] / В. А. Горелов, С.Л. Тропин // Журнал автомобильных инженеров. – 2011. – №5. – С. 18-22.

13. Song, MZ., Kang, SW., Chung, SO., Kim, KD., Chae, YS., Lee, DH., Kim, YJ., Yu, SH. & Lee, KH. (2013, August 27-30). Development of Path Planning Algorithm for an Autonomous Mower Tractor [4th IFAC Conference on Modelling and Control in Agriculture] Horticulture and Post Harvest Industry. (pp.154-158). Espoo [in Finland]. doi: <https://doi.org/10.7744/cnujas.2015.42.1.063>.

14. Al-khayyt, SZS. (2018, March). Creating Through Points in Linear Function with Parabolic Blends Path by Optimization Method. *Al-Khwarizmi Engineering Journal*, 14, 1, 77-89. doi: <https://doi.org/10.22153/kej.2018.10.005>.

15. 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].

15. Bulgakov, V., Pascuzzi, S. & Beloev, H. (2019, October). Theoretical Investigations of the Headland Turning Agility of a Trailed Asymmetric Implement-and-

Tractor Aggregate. *Agriculture, MDPI, Open Access Journal*, 9(10), 1-11. doi: <https://doi.org/10.3390/agriculture9100224>

16. Поддубный В. И. Математическая модель движения колесного трактора / В. И. Поддубный // Ползуновский альманах. – 2005. – №3. – С.73-76.

17. Позин Б. М. Кинематические соотношения при взаимодействии движителя с грунтом при повороте / Б. М. Позин, И. П. Трояновская // Вестник ЮурГУ. Серия «Машиностроение». – Челябинск: изд-во ЮурГУ, 2005. – Вып. 7. – №14 (54). – С. 93-96.

18. Трояновская И. П. Математическая модель силового взаимодействия колеса с грунтом при повороте машины / Н. К. Носков, И. П. Трояновская, С. А. Титов // Вестник ЮурГУ. Серия «Машиностроение». – Челябинск: изд-во ЮурГУ, 2017. – Вып. 17. – №3. – С. 5-15.

19. Камбаров Б. А. Экспериментальное определение параметров траектории движения культиваторного машинно-тракторного агрегата на поворотной полосе хлопкового поля [Электронный ресурс] / Б. А. Камбаров // TECHNICAL SCIENCES. – 2016. – Режим доступа до ресурсу: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnoe-opredelenie-parametrov-traektorii-dvizheniya-kultivatornogo-mashinno-traktornogo-agregata-na-povorotnoy-polose/pdf>.

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

21. Гуськов В.В., Велев Н.Н., Атаманов Ю.Е., Бочаров Н.Ф., Ксенович И.П., Солонский А.С. Тракторы. Теория. Учебник для студентов вузов по спец. «Автомобили и тракторы», – М.: «Машиностроение», 1988, 376 с.

22. Любимов И. И. Исследование связи увода колес автомобиля с жёсткостью подвески / И. И. Любимов, Ю. А. Буйлов // Весник СГТУ. – 2013. – №2(70). – С. 192-195.

23. Подригайло М.А., Шелудченко В.В. Нове в теорії експлуатаційних властивостей автомобілів та тракторів. Навч. Посібник / Суми.: Сумський національний аграрний університет, 2015. -213 с.

24. Ягубова Е.В. Метод обеспечения устойчивости колёсного трактора, оснащенного автоматической системой управления движением, при работе на склоне. – Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. М., 2016.

25. Рославцев А.В. Разработка методов и средств исследования движения машино-тракторных агрегатов. Автореферат диссертации на соискание учёной степени доктора технических наук. - [Электронный ресурс]. – Режим доступа: tekhnosfera.com > ... metodov-i ... dvizhenniya ... traktornyh. М., 1996

26. Трухнов, А. Л. Три оси [Электронный ресурс] / А. Л. Трухнов, Е. Л. Карташевич. – Режим доступа: <http://www.studfiles.ru/preview/4307305>

27. Фомин С. Д. Математическая модель для исследования неустановившегося криволинейного движения погрузочно-транспортного агрегата / С. Д. Фомин. // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. Направление. Технические науки. – 2017. – №1(45). – С. 226-234.

28. Системи автоматичного паралельного керування (автопілот) [Електронний ресурс]. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://store.frendt.com.ua/g59436450-sistemi-avtomatichnogo-paralelnogo.>]

29. Пенюшкин А. С. Управление движением колесного трактора с использованием спутниковых радионавигационных систем [Электронный ресурс] / А. С. Пенюшкин, В. И. Поддубный // Ползуновский альманах, №4/2. – 2011. – Режим доступа до ресурсу: http://elib.altstu.ru/journals/Files/pa2011_4_2/pdf/292penushkin.pdf.

30. Точне землеробство по-американськи: впроваджувати інновації - (не)дорого? [Електронний ресурс]. – 2018. – Режим доступу до ресурсу:

[http://agroportal.ua/ua/views/blogs/tochnoe-zemledelie-poamerikanski-vnedryat-innovatsii-ne-dorogo/.](http://agroportal.ua/ua/views/blogs/tochnoe-zemledelie-poamerikanski-vnedryat-innovatsii-ne-dorogo/)]

31. Precision farming – відсікання зайвого. [Електронний ресурс] // Зерно - журнал сучасного агропромисловця. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.zerno-ua.com/journals/2019/yanvar-2019-god>.

32. Точне землеробство та управління землею онлайн: Agrohub оприлюднив масштабний звіт про інновації в агросекторі [Електронний ресурс]. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://landlord.ua/news/tochne-zemlerobstvo-ta-upravlinnia-zemleiu-onlain-agrohub-opryliudnyv-masshtabnyi-zvit-pro-innovatsii-v-ahrosektori/>.

33. Точность – 2 сантиметра на поле в 100 га [Електронний ресурс] // Журнал сучасного агропромисловця "Зерно" – Режим доступу до ресурсу: <https://www.zerno-ua.com/journals/2011/fevral-2011-god/tochnost-2-santimetra-na-pole-v-100-ga>.

34. Точное земледелие: принцип работы и перспективы [Електронний ресурс] // Статьи и материалы. Технологии. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <https://xn--80ajgpcpbhkds4a4g.xn--p1ai/articles/tochnoe-zemledelie/>.

35. Точное земледелие. Часть 1. Системы параллельного вождения. [Електронний ресурс]. – 2014. – Режим доступу до ресурсу: <https://gps-monitoring.com.ua/precision-farming-news-1.html>.

36. Гид по системам параллельного и автоматического вождения [Електронний ресурс]. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <https://aggeek.net/ru-blog/gid-po-sistemam-parallelnogo-i-avtomaticheskogo-vozhdeniya?fbclid=IwAR3SE482B6CkQ1c3dJsRNrhVCwisJN9G5YcrSyD6qDwMHioDofeBix4VI>.

37. Тест-драйв системы автоматического вождения AgLeader [Електронний ресурс]. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <http://polymya-agro.by/news/test-drayv-sistemy-avtomaticheskogo-vozhdeniya-agleader>

38. 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>

39. M. Otte, E. Frazzoli. (2016) RRTX: Asymptotically optimal single-query sampling-based motion planning with quick replanning. *Int. J. Robot. Res.*, 35 (7). 797-822.
40. C. Cariou, Z. Gobor, B. Seiferth (2017). Mobile robot trajectory planning under kinematic and dynamic constraints for partial and full field coverage. *J. Field Robot.*, (2016). 34(7). 1297-1312//
41. 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>.
42. J. Jin, L.Tang. (2011). Coverage path planning on three-dimensional terrain for arable farming *J. Field Robot.*, 28 (3), 424-440.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ НЕЛІНІЙНОГО РУХУ ЧОТИРЬОХКОЛІСНОЇ МАШИНИ З ПЕРЕДНІМИ КЕРОВАНИМИ КОЛЕСАМИ

2.1. Адаптація відомих графоаналітичних способів визначення траєкторій 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 МТА 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 окружності 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 [1].

Відомо два види найпростішого криволінійного руху чотирьохколійної машини: коловий рух по колу з постійним радіусом і незмінним положенням центра кривизни i , 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.

На рисунку 2.1 зображена схема руху чотирьохколійної машини з передніми керованими колесами в одному з проміжних положень корпусу і наведені основні кінематичні параметри траєкторії. На рисунку показані також деякі динамічні фактори у вигляді сил, які будуть використані у подальших розділах даної роботи.

Прийmemo наступні позначення: v – абсолютна швидкість руху центра мас C машини в горизонтальній площині; v_η і v_ξ – проекції швидкості v на осі рухомої системи координат $\eta C \xi$; v_x і v_y – проекції швидкості v на осі нерухомої інерційної системи координат xOy ; v_1 і v_2 – середні швидкості центрів передньої і задньої

осей – точок A і B ; α_1 і α_2 – кути між векторами швидкостей v_1 і v_2 і повздовжньою віссю машини (у даному випадку $\alpha_2 = 0$); α_{1s} і α_{2e} – кути повороту в горизонтальній площині відповідно зовнішнього і внутрішнього коліс передньої осі; α – кут між напрямом швидкості v , дотичної до траєкторії в точці C , і повздовжньою віссю машини, так званий, курсовий кут; ω – кутова швидкість обертання корпусу машини в горизонтальній площині; R – радіус повороту машини, найкоротша відстань від миттєвого центра повороту O_T до повздовжньої осі корпусу; у даному випадку це теоретичний радіус, визначений без урахування явища відведення коліс. У разі машини з передніми керованими колесами $R = R_2$ – радіусу повороту центра задньої осі B ; R_1 – радіус повороту центра передньої осі; R_C – радіус кривизни траєкторії в точці C ; φ – кут повороту корпусу машини відносно осі Ox нерухомої системи координат; L – база машини; ℓ_1 і ℓ_2 відстані від центра мас C , відповідно, до передньої і задньої осей; B_1 і B_2 – відстані між колесами передньої і задньої осей.

Решта параметрів, наведених на рисунку 2.1, – динамічні величини, такі як сили і моменти сил, будуть введені для розгляду і вирішення таких задач, як визначення реакцій коліс з боку опорної поверхні та закономірностей зміни швидкості v і кутової швидкості ω під дією сил.

Дослідження закономірностей колового руху і отримання аналітичних залежностей, які дозволяють визначити координати x і y центра C та кути φ і α , необхідно для визначення умов переходу від несталого руху до колового або навпаки при вивченні і дослідженні розворотів машин і особливо машинно-тракторних агрегатів (МТА) на полі під час сільськогосподарських робіт. Ця задача була розглянута в роботі [5].

При несталому русі майже всі кінематичні і динамічні параметри змінюються у часі. Графо-аналітичні методи побудови відповідних траєкторій дозволяють визначити напрямки для отримання математичних рівнянь траєкторій. Як відомо, ця задача ще не вирішена, а її вирішення має велике значення у питаннях автоматизації руху машин або керування машинами в особливих умовах руху.

Розглянемо випадок, коли кут повороту керованих коліс і курсовий кут змінні під час руху трактора по криволінійній траєкторії. Ділянка, на якій вони зростають від якогось початкового значення до кінцевого в кінці маневру, – це вхід в поворот, а ділянка, на якій вони зменшуються під дією керма, – вихід з повороту.

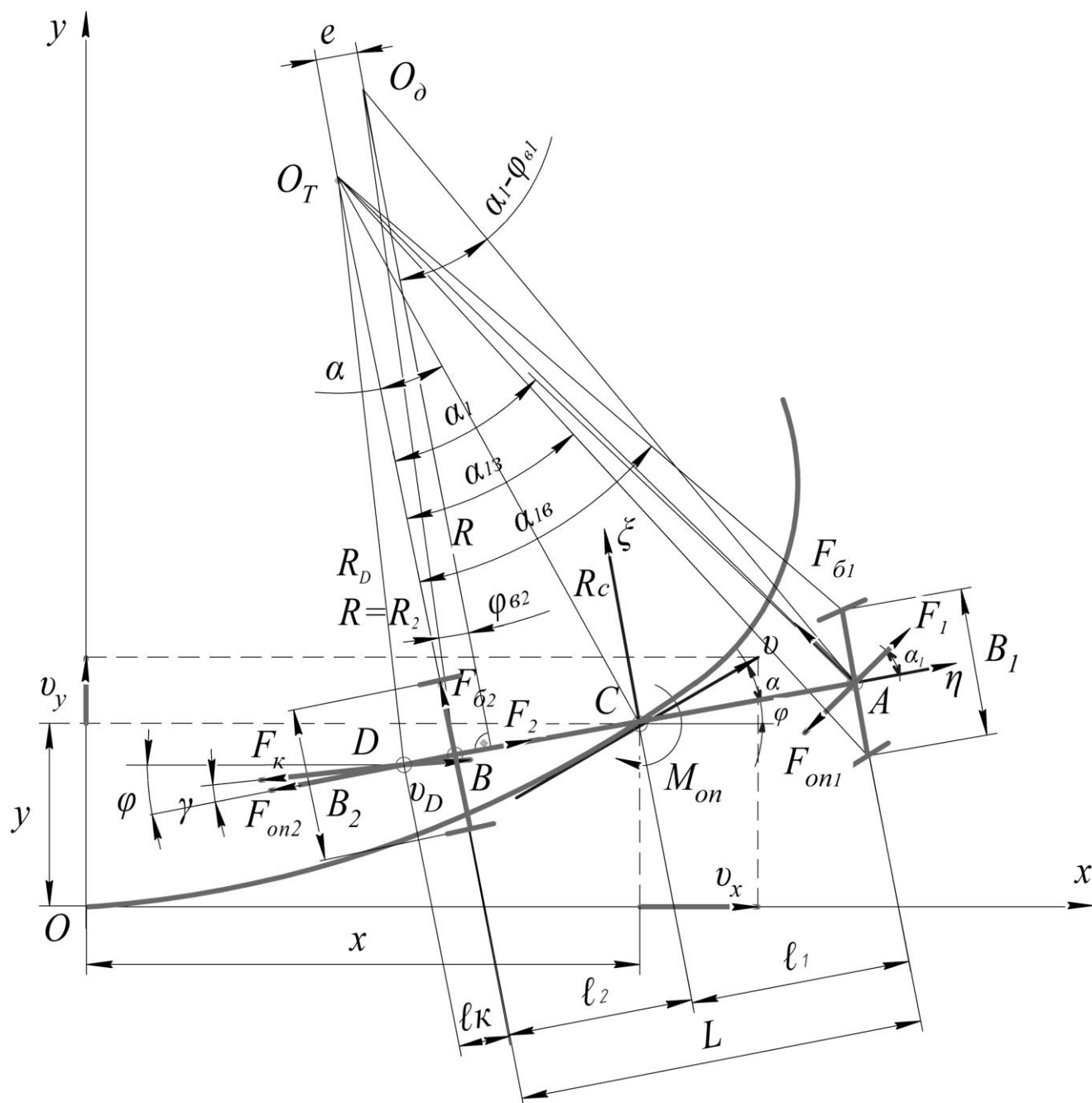


Рисунок 2.1 – Схема повороту колісного трактора з передніми керованими колесами

В разі ступінчастої зміни кутів α_1 і α всю дугу входу, наприклад, в лівий поворот необхідно поділити на бажану кількість частин (ступеней) і визначитися із

вхідними параметрами: при яких значеннях кутів α_1 і α буде здійснюватися поворот у межах кожної ступені. Відповідні радіуси повороту знаходяться за формулою:

$$R_C = \frac{R}{\cos \alpha} = \frac{L}{\tan \alpha_1 \cos \alpha} = \frac{\ell_2}{\sin \alpha}.$$

В кінці кожної ділянки визначається новий радіус повороту R_C і знаходиться центр кривизни на лінії під кутом:

$$\Delta \alpha = \frac{\ell_2}{L} \arctan \Delta \alpha_1,$$

який при вході в поворот в правій системі координат відкладається проти годинникової стрілки від перпендикуляру до напрямку швидкості v в кінці попередньої ділянки, а при виході з повороту – за годинниковою стрілкою.

На рисунку 2.2 побудована траєкторія руху трактора МТЗ-80 під час входу в поворот на 90° і виходу із повороту при 4-разовій ступінчатій зміні кутів α_1 і α . При цьому дуги постійного радіусу кривизни траєкторії однакові і складають $\Delta \varphi = 22,5^\circ$, кут α_1 ступінчасто рівними частками змінюється від 0 до 40° ($\Delta \alpha_1 = 10^\circ$), а кут α – від $3^\circ 54'$ до $18^\circ 12'$ ($\Delta \alpha = 3^\circ 36'$).

Тепер можна визначити порядок побудови траєкторій для будь-якої заданої програми руху. Виходячи із заданих кута повороту φ і мінімального радіусу кривизни траєкторії $R_{C_{\min}}$, знаходимо максимальне значення кута $\alpha_{\max} = \ell_2 / R_{C_{\min}}$ і, прийнявши кількість поділок n , визначаємо центральний кут дуги кожної ступені $\Delta \alpha = \alpha_{\max} / n$. Радіуси кривизни кожної ступені будуть: $R_{C_1} = \ell_2 / \sin \Delta \alpha = \ell_2 / \Delta \alpha$; $R_{C_2} = \ell_2 / 2\Delta \alpha \dots R_{C_n} = \ell_2 / n\Delta \alpha$. Радіуси R_{C_i} відкладаються під кутом $\Delta \alpha$ до нормалі траєкторії руху на початку кожної ступені. При вході в поворот кут $\Delta \alpha$ відкладається у напрямку повороту, а при виході із повороту – в протилежному напрямку. Наближення траєкторії руху, побудованої у такий спосіб, до істинної траєкторії буде тим більшим, чим більше ступеней n . При необхідності можна передбачати ділянки колового руху з постійними радіусами кривизни.

Виконані побудови для конкретних випадків несталої руху реальної машини дозволяють зробити деякі висновки, корисні при визначенні шляхів пошуку аналітичних рівнянь траєкторії нелінійного руху машини. По-перше, це складна задача, тому що рівняння траєкторії повинні враховувати багато факторів: кути α і φ , радіуси кривизни, час t і швидкість руху v . У наступному розділі наведена спроба отримання параметричних рівнянь траєкторії на ділянках входу і виходу з повороту в функції кута φ .

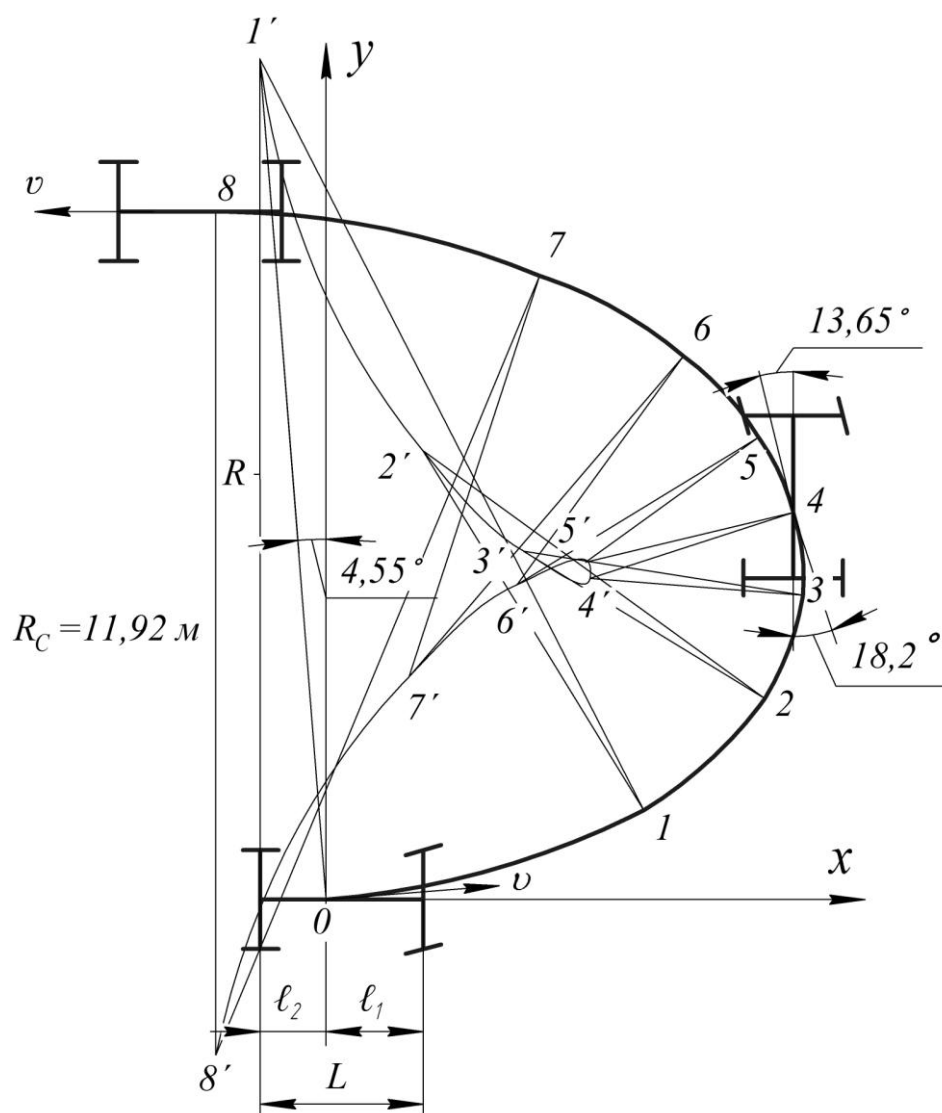


Рисунок 2.2 – Траєкторія входу в поворот на 90° і виходу із повороту трактора МТЗ-80 при чотирьох - ступінчастій зміні кута α від $4,55^\circ$ до $18,2^\circ$ з однаковими дугами постійного радіусу кривизни $\Delta\varphi = 22,5^\circ$

2.2. Отримання рівнянь колових траєкторій.

Розглянемо найпростіший випадок руху трактора при постійному середньому значенні кута повороту α_1 керованих коліс і відповідному йому значенні курсового кута α , кута між вектором швидкості v центра ваги трактора C і віссю $C\eta$ рухомої системи координат $\eta C\xi$ (рис. 2.1), не приймаючи до уваги вплив кутів відведення коліс, обумовлених дією бокових сил, що виникають під час криволінійного руху.

Проекції швидкості центра мас трактора на осі рухомої системи координат $\eta C\xi$: $v_\eta = v \cos \alpha$, $v_\xi = v \sin \alpha$.

При постійній колівій швидкості v і фіксованих кутах α_1 і α трактор буде рухатися по колу радіусом $R_c = \frac{R}{\cos \alpha}$ із кутовою швидкістю $\omega = \frac{v}{R}$, обертаючись у часі t на кут $\varphi = \omega t$. Кут α у цьому випадку обчислюється за формулою:

$$\tan \alpha = \frac{\ell_2}{L} \tan \alpha_1 . \quad (2.1)$$

Проекції складових швидкості v на осі нерухомої системи координат xOy з урахуванням кута φ відносного повороту остова трактора і відповідної зміни координат точки C будуть:

$$v_x = v_\eta \cos \varphi - v_\xi \sin \varphi = v_\eta (\cos \omega t - \tan \alpha \sin \omega t). \quad (2.2)$$

$$v_y = v_\eta \sin \varphi + v_\xi \cos \varphi = v_\eta (\sin \omega t + \tan \alpha \cos \omega t). \quad (2.3)$$

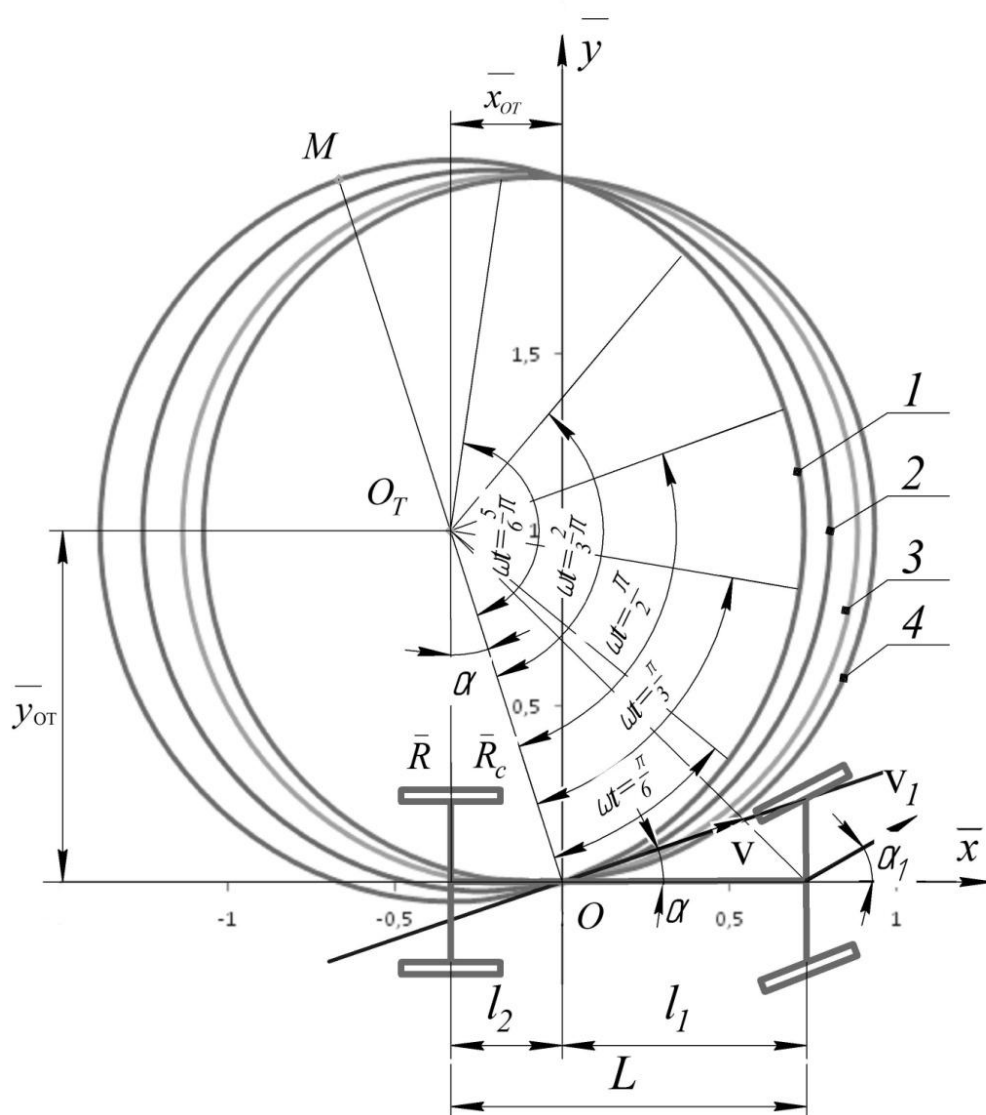
Тоді координати центра C у нерухомій системі координат можна знайти як $x = \int v_x dt$; $y = \int v_y dt$, а після визначення постійних інтегрування з умов ($t=0$, $x=0$, $y=0$) і враховуючи, що $v/R_c = \omega$ і $R_c \cos \alpha = R$, отримаємо рівняння траєкторії руху, виражені координатним способом:

$$x = R[\sin \omega t - \tan \alpha(1 + \cos \omega t)]; \quad (2.4)$$

$$y = R(\tan \alpha \sin \omega t - \cos \omega t + 1). \quad (2.5)$$

На рисунку 2.3 показані траєкторії руху центра ваги трактора у відносних координатах при різних значеннях кута повороту керованих коліс α_1 і відповідних

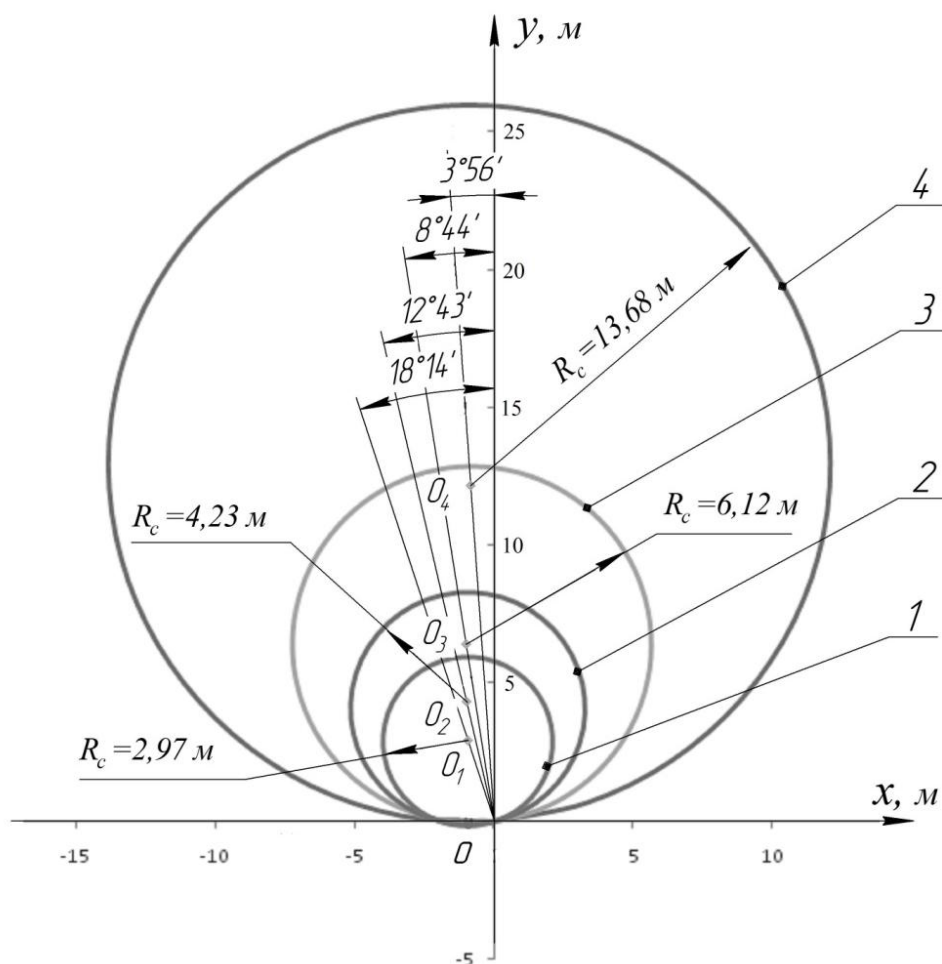
їм значеннях кута α , які уявляють собою віяло кіл, повернутих відносно осі x/R на невеликі кути в залежності від вихідних параметрів α_1 і α . Перераховуючи відносні координати $\bar{x} = x/R$ і $\bar{y} = y/R$ за формулами $x = R\bar{x} = \ell_2 \bar{x} / \tan \alpha$; $y = R\bar{y} = \ell_2 \bar{y} / \tan \alpha$, отримаємо реальні траєкторії колового руху трактора при різних кутах повороту керованих коліс. На рисунку 2.4 такі траєкторії побудовані для трактора МТЗ-80.



1. $\alpha_1 = 40^\circ$, $\alpha = 18^\circ 14'$; 2. $\alpha_1 = 30^\circ$, $\alpha = 12^\circ 43'$;
3. $\alpha_1 = 20^\circ$, $\alpha = 8^\circ 44'$; 4. $\alpha_1 = 10^\circ$, $\alpha = 3^\circ 56'$.

Рисунок 2.3 – Траєкторія руху центра ваги трактора у відносних координатах

Така ідеальна картина мала б місце, якщо не враховувати наявності бокових сил і сил опору коченню коліс, що викликають появу кутів відведення $\Delta\varphi_1$ і $\Delta\varphi_2$, які залежать не тільки від змінних у загальному випадку кутів α_1 і α , а також від швидкості руху трактора і багатьох інших факторів. Побудовані колові діаграми можна використати як інструменти графічного дослідження кінематики криволінійного руху трактора у загальному випадку, тобто при змінних в часі швидкості і кута повороту керованих коліс. Рівняння (2.4) і (2.5) дозволяють визначити координати x і y центра ваги машини як у функції часу t , так і в залежності від кута повороту корпусу $\varphi = \omega t$, що буде використано при спряженні ділянок колового руху з іншими ділянками складної траєкторії.



1. $\alpha_1 = 40^\circ$, $\alpha = 18^\circ 14'$; 2. $\alpha_1 = 30^\circ$, $\alpha = 12^\circ 43'$;

3. $\alpha_1 = 20^\circ$, $\alpha = 8^\circ 44'$; 4. $\alpha_1 = 10^\circ$, $\alpha = 3^\circ 56'$.

Рисунок 2.4 – Реальні траєкторії колового руху трактора МТЗ-80:

2.3. Виведення аналітичних рівнянь траєкторій несталого криволінійного руху.

2.3.1. Виведення аналітичних рівнянь для входу в лівий поворот. Для визначення теоретичних функцій траєкторії криволінійного руху центра ваги C чотирьохколійної машини з передніми керованими колесами на ділянці входу в поворот запишемо проєкції швидкості v на осі x і y нерухомої системи координат xOy (рис. 2.5):

$$v_x = v \cos(\varphi + \alpha); \quad v_y = v \sin(\varphi + \alpha), \quad (2.8)$$

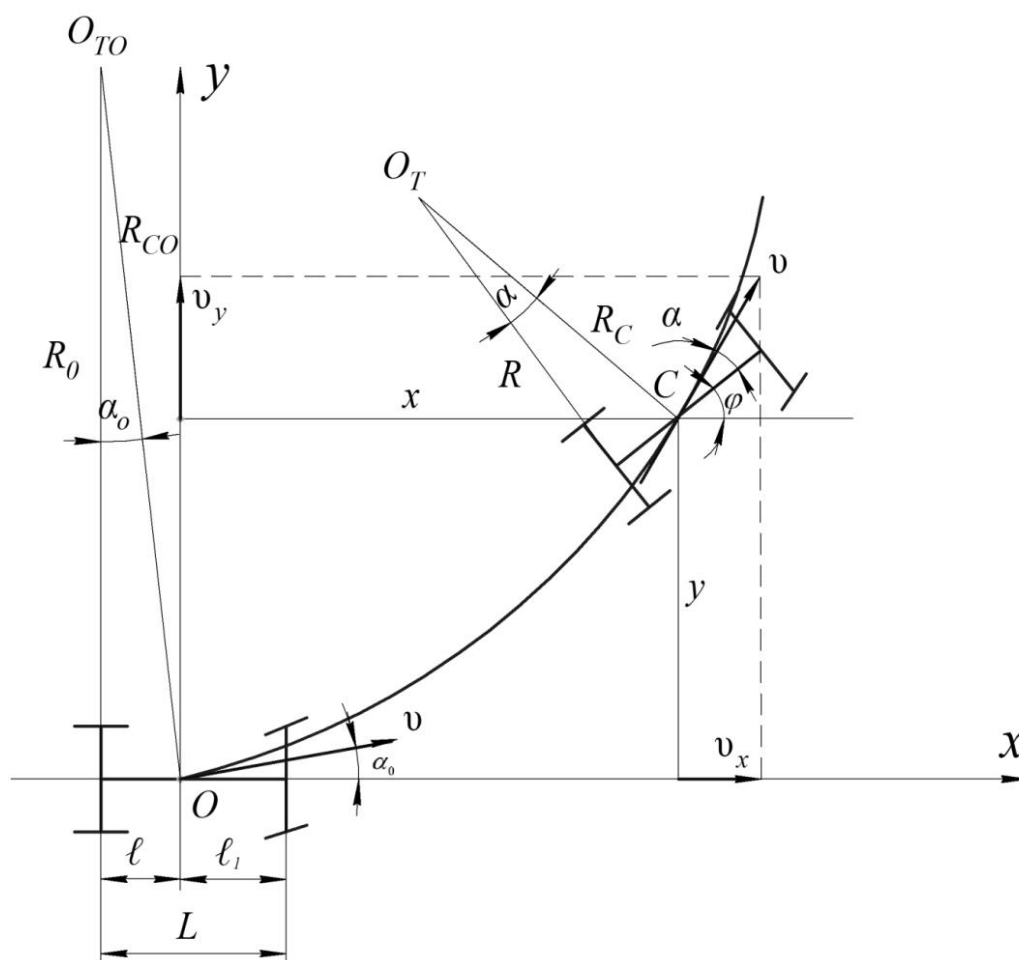


Рисунок 2.5 – Схема руху чотирьохколійної машини по криволінійній траєкторії при змінних значеннях курсового кута

Виходячи із диференціального співвідношення між швидкістю v і часом t , координати центра C в довільній точці нерухомої системи координат xOy будуть:

$$x = \int v_x dt = \int v \cos(\varphi + \alpha) dt ;$$

$$y = \int v_y dt = \int v \sin(\varphi + \alpha) dt . \quad (2.9)$$

У підінтегральній функції маємо три незалежні змінні величини: φ , α , t і, окрім цього, невизначену швидкість v . Функція кута α цілком залежить від волі водія і може бути виражена в залежності від кута φ . Прийmemo лінійну залежність у вигляді $\alpha = \alpha_0 + k\varphi$, де k – коефіцієнт пропорційності, або коефіцієнт інтенсивності зміни кута α , який у загальному випадку залежить від інтенсивності повороту і границь зміни кута φ , у яких здійснюється поворот; α_0 – початкове значення кута α при $\varphi = 0$. У кожному конкретному випадку рішення буде справедливим в обумовлених межах.

Корпус машини здійснює складний плоский рух. За час руху Δt центр ваги переміститься з точки C_1 до точки C_2 (рис. 2.6), кут α зміниться на $\Delta\alpha$, кут φ – на $\Delta\varphi$, а радіус кривизни – на $\Delta R_C = R_{C_2} - R_{C_1}$.

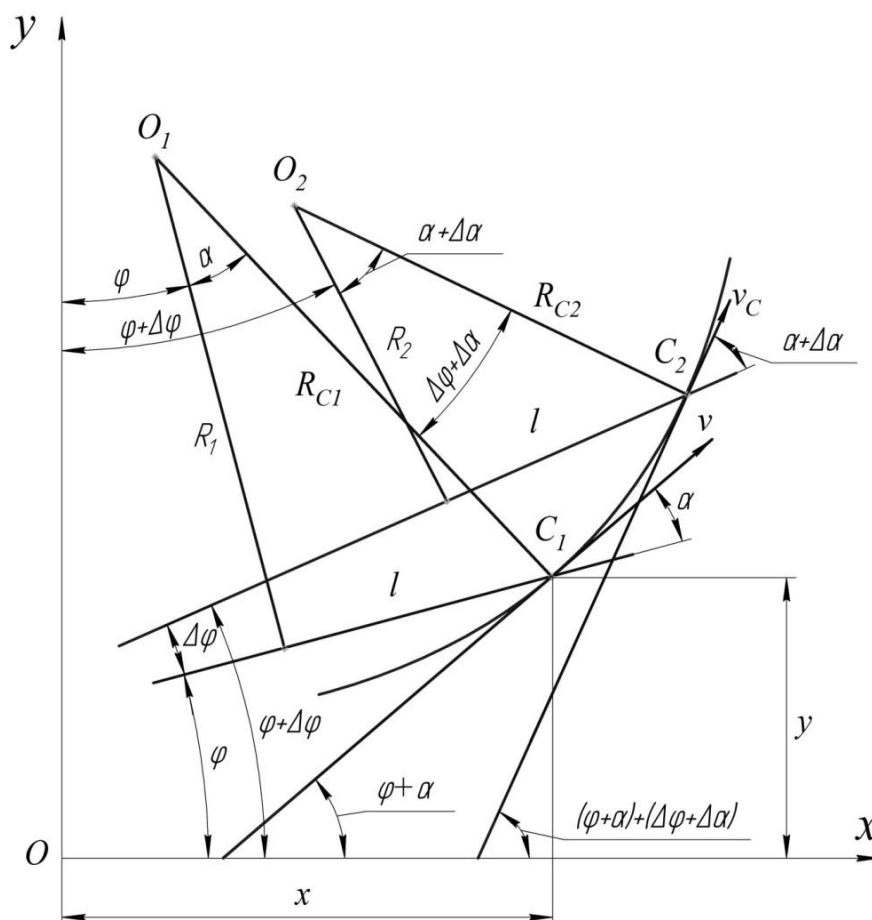


Рисунок 2.6 – До заміни диференціала dt на $d\varphi$

При цьому центр кривизни переміститься з точки O_1 в точку O_2 . Кут між радіусами R_{C_1} і R_{C_2} буде $(\Delta\varphi + \Delta\alpha)$. Для того, щоб виразити диференціал dt через $d\varphi$, запишемо миттєве значення кутової швидкості повороту корпусу машини: $\omega = d\varphi/dt = v/R_C$, звідки $dt = R_C d\varphi/v$. З урахуванням, що $R_C = \ell/\sin\alpha$, і приймаючи до уваги, що максимальне значення кута α , яке залежить від кута повороту керованих коліс α_1 , може змінюватись в межах, для яких $\sin\alpha \approx \alpha$, отримаємо:

$$dt = \frac{\ell}{v} \cdot \frac{1}{\alpha} d\varphi = \frac{\ell}{v} \cdot \frac{d\varphi}{\alpha_o + k\varphi}. \quad (2.10)$$

Тоді

$$\begin{aligned} x &= \ell \int \frac{\cos(\alpha + \varphi)}{\alpha} d\varphi = \ell \int \frac{\cos[\alpha_o + (1+k)\varphi]}{\alpha_o + k\varphi} d\varphi; \\ y &= \ell \int \frac{\sin(\alpha + \varphi)}{\alpha} d\varphi = \ell \int \frac{\sin[\alpha_o + (1+k)\varphi]}{\alpha_o + k\varphi} d\varphi. \end{aligned} \quad (2.11)$$

Необхідність введення початкового значення кута $\alpha_o \neq 0$ обумовлена невизначеністю при знаходженні постійних інтегрування, якщо $\alpha_o = 0$. Але отримані інтеграли і в такому вигляді не мають рішення, тому що у підінтегральних виразах маємо тригонометричні функції синуса і косинуса, інтеграли яких не вирішуються в квадратурах. Але можна скористатися наближеними первинними функціями, розкладаючи $\cos[\alpha_o + (1+k)\varphi]$ і $\sin[\alpha_o + (1+k)\varphi]$ в ряди Маклорена і беручи для косинуса перші два члени ряду, а для синуса можна обмежитися одним. Тоді остаточні шукані інтеграли приймають вигляд:

$$\begin{aligned} x &= \ell \left[\int \frac{d\varphi}{\alpha_o + k\varphi} - \int \frac{[\alpha_o + (1+k)\varphi]^2}{2(\alpha_o + k\varphi)} d\varphi \right]; \\ y &= \ell \int \frac{\alpha_o + (1+k)\varphi}{\alpha_o + k\varphi} d\varphi. \end{aligned} \quad (2.12)$$

Рішення цих інтегралів знаходимо у вигляді:

$$x = \frac{\ell}{k} \left[-\frac{(1+k)^2}{4} \varphi^2 + \frac{\alpha_o(1-k^2)}{2k} \varphi - \frac{\alpha_o^2 - 2k^2}{2k^2} \ln|\alpha_o + k\varphi| \right] + C;$$

$$y = \frac{\ell}{k} \left[(1+k)\varphi - \frac{\alpha_o}{k} \ln |\alpha_o + k\varphi| \right] + D. \quad (2.13)$$

Після визначення постійних C і D з умов $(x=0; \varphi=0)$ і $(y=0; \varphi=0)$ отримаємо рівняння траєкторії руху машини з передніми керованими колесами на ділянці входу в лівий поворот зі змінним кутом повороту керма:

$$\begin{aligned} x &= \frac{\ell}{k} \left[-\frac{(1+k)^2}{4} \varphi^2 + \frac{\alpha_o(1-k^2)}{2k} \varphi - \frac{\alpha_o^2 - 2k^2}{2k^2} \ln \left| \frac{\alpha_o + k\varphi}{\alpha_o} \right| \right]; \\ y &= \frac{\ell}{k} \left[(1+k)\varphi - \frac{\alpha_o}{k} \ln \left| \frac{\alpha_o + k\varphi}{\alpha_o} \right| \right]. \end{aligned} \quad (2.14)$$

Запропонований тут спосіб інтегрування рівнянь (2.11) криволінійного руху з підстановкою (2.10) можна використати і для інтегрування диференціальних рівнянь Д'Аламбера. Це було зроблено в роботі [8], щоб отримати загальні рівняння швидкості машини в повороті. Під дією прикладених до неї сил при повторному інтегруванні рівнянь швидкості з використанням підстановки (2.10) будемо мати той же результат – рівняння (2.14).

2.3.2. Виведення аналітичних рівнянь для виходу з лівого повороту. Аналогічно отримаємо рівняння траєкторії руху машини з передніми керованими колесами на ділянці виходу з лівого повороту, прийнявши $\alpha = \alpha_o - k\varphi$:

$$\begin{aligned} x &= \frac{\ell}{k} \left[\frac{(1-k)^2}{4} \varphi^2 + \frac{\alpha_o(1-k^2)}{2k} \varphi + \frac{\alpha_o^2 - 2k^2}{2k^2} \ln \left| \frac{\alpha_o - k\varphi}{\alpha_o} \right| \right]; \\ y &= \frac{\ell}{k} \left[-(1-k)\varphi - \frac{\alpha_o}{k} \ln \left| \frac{\alpha_o - k\varphi}{\alpha_o} \right| \right]. \end{aligned} \quad (2.15)$$

Тут α_o – початковий кут на ділянці виходу з повороту, який дорівнює останньому значенню кута α на ділянці входу в поворот. Отримані рівняння придатні для будь-якої чотирьохколійної машини з передніми керованими колесами.

На рисунку 2.7 побудовані ділянки траєкторії лівого повороту трактора МТЗ-80 ($\ell = 0,93$ м; $L = 2,45$ м) для таких вихідних даних: $k = 0,2$; $\varphi = 0 \dots 90^\circ$ і $\alpha_o = 5^\circ$ – на

ділянці входу в поворот; $\varphi = 0..90^\circ$ і $k = -0,2$, $\alpha_o = 23^\circ$ – на ділянці виходу з повороту. Спрощені рівняння траєкторії руху для цих випадків будуть:

$$\begin{aligned} \text{Вхід в поворот:} \\ x = 4,65(-0,36\varphi^2 + 0,209\varphi + 0,905 \ln|1 + 2,29\varphi|); \\ y = 4,65(1,2\varphi - 0,436 \ln|1 + 2,29\varphi|). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Вихід з повороту:} \\ x = 4,65(0,16\varphi^2 + 0,96\varphi + \ln|1 - 0,5\varphi|); \\ y = 4,65(-0,8\varphi - 2 \ln|1 - 0,5\varphi|). \end{aligned}$$

Результати розрахунків наведені в таблицях 2.1 і 2.2.

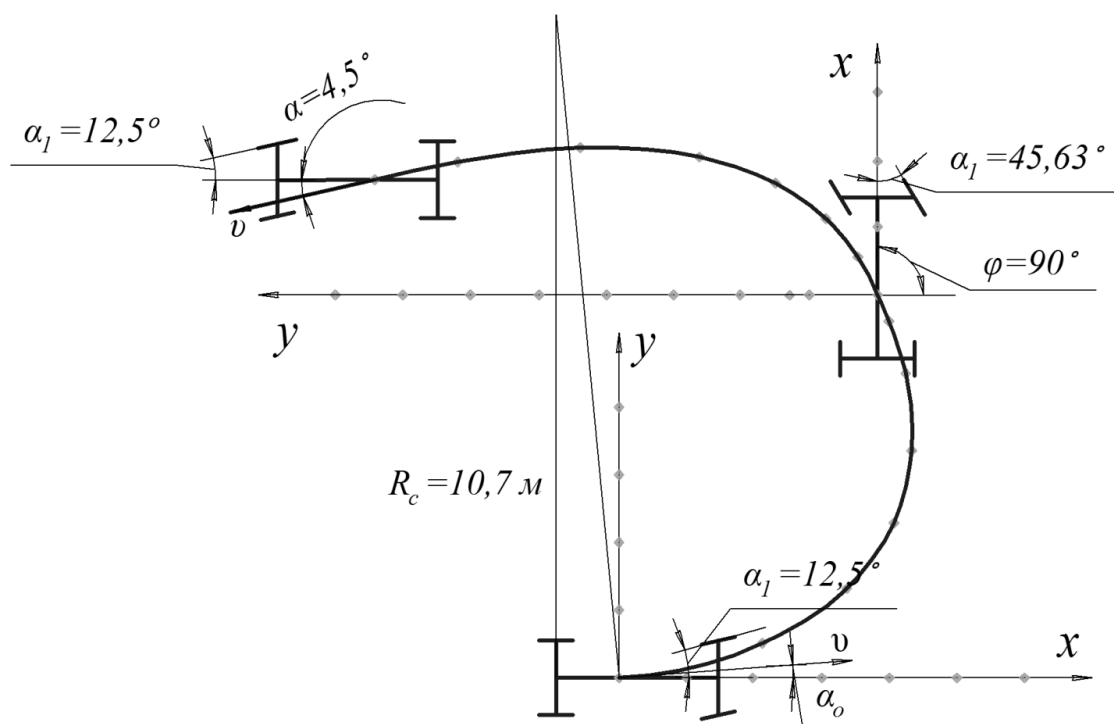


Рисунок 2.7 – Траєкторії входу в поворот і виходу з повороту на 90° трактора МТЗ-80 при зміні кута повороту керованих коліс від $12,5^\circ$ до $45,63^\circ$

Таблиця 2.1 – Вхід в лівий поворот: $\alpha_o = 4,5^\circ = 0,0785$ рад

№	φ		α		α_1		R_c , м	ω , 1/с	x, м	y, м
	град	рад	град	рад	град	рад				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	0	4,5	0,0785	12,5	0,218	10,7	0,654	0	0
2	15	0,262	7	0,122	17,25	0,301	7,62	0,92	2,12	0,51
3	30	0,523	11	0,192	26,08	0,455	4,84	1,45	3,37	1,32
4	45	0,785	14	0,244	31,87	0,556	3,81	1,84	4,07	2,38
5	60	1,047	17	0,297	37,15	0,648	3,13	2,24	4,33	3,36

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
6	75	1,308	20	0,349	41,68	0,727	2,66	2,63	4,24	4,50
7	85	1,483	22	0,384	44,37	0,774	2,42	2,89	3,99	5,27
8	90	1,570	23	0,401	45,63	0,796	2,32	3,02	3,83	5,66

Таблиця 2.2 – Вихід з лівого повороту: $\alpha_o = 23^\circ = 0,401$ рад

№	φ		α		α_1		R_C , м	ω , 1/с	x, м	y, м
	град	рад	град	рад	град	рад				
1	0	0	23	0,401	45,63	0,796	2,32	3,02	0	0
2	15	0,262	20	0,349	41,60	0,726	2,66	2,63	0,56	0,29
3	30	0,523	17	0,297	37,13	0,648	3,13	2,24	1,13	0,76
4	45	0,785	14	0,244	31,86	0,556	3,81	1,84	1,65	1,51
5	60	1,047	11	0,192	26,07	0,455	4,84	1,45	2,04	2,64
6	75	1,308	8	0,140	19,65	0,343	6,64	1,05	2,18	4,40
7	85	1,483	6	0,105	14,95	0,261	8,86	0,79	1,96	6,21
8	90	1,570	4,5	0,0785	12,49	0,218	10,69	0,65	1,70	7,44

2.3.3. Виведення аналітичних рівнянь для входу в правий поворот і виходу з правого повороту. Рівняння (2.14) і (2.15) траєкторій руху під час входу в поворот і виходу з повороту можна використовувати як для лівого так і для правого поворотів. В останньому випадку кут φ від'ємний.

Методами теорії механізмів і машин можна побудувати графіки зміни радіуса кривизни R_C , кутів α і α_1 , кутової швидкості обертання корпусу трактора $\omega = v/R_C$ та інших параметрів руху. На рисунках 2.8 - 2.10 наведені графіки зміни кутів α і α_1 , радіуса R_C і кутової швидкості при постійній швидкості трактора МТЗ-80 $v \approx 2$ м/с під час його входу в лівий поворот.

Час входу в поворот і час виходу з повороту при постійній швидкості v можна визначити, скориставшись приведеною формулою (2.10) для dt , враховуючи, що $R_C = \ell/\alpha$ і $d\varphi = d\alpha/k$. Тоді:

$$t = \int_0^{\varphi} \frac{R_C}{v} d\varphi = \frac{\ell}{v} \cdot \frac{1}{k} \int_{\alpha_o}^{\alpha_x} \frac{d\alpha}{\alpha} = \frac{\ell}{v} \cdot \frac{1}{k} \ln \left| \frac{\alpha_{\max}}{\alpha_o} \right|. \quad (2.16)$$

Тут α_k – значення курсового кута вкінці ділянки входу в поворот або виходу з повороту. В цій формулі коефіцієнт інтенсивності k треба брати зі знаком «плюс» для ділянки входу в поворот і зі знаком «мінус» при виході з повороту. Тоді час руху буде визначений з точністю до знаку. Для наведеного прикладу ($v = 7$ км/год ≈ 2 м/с; $t_{ex} = t_{eux} = 3,55$ с). Тоді довжини ділянок траєкторій входу в лівий поворот і виходу з повороту, відповідно, будуть $S_{ex} = vt_{ex} = S_{eux} = 2 \cdot 3,55 = 7,1$ м.

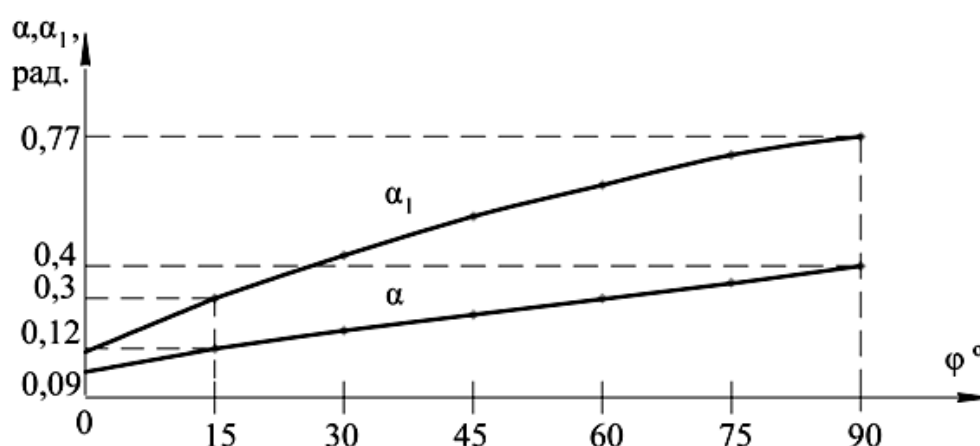


Рисунок 2.8 – Графіки зміни кута повороту керованих коліс і курсового кута

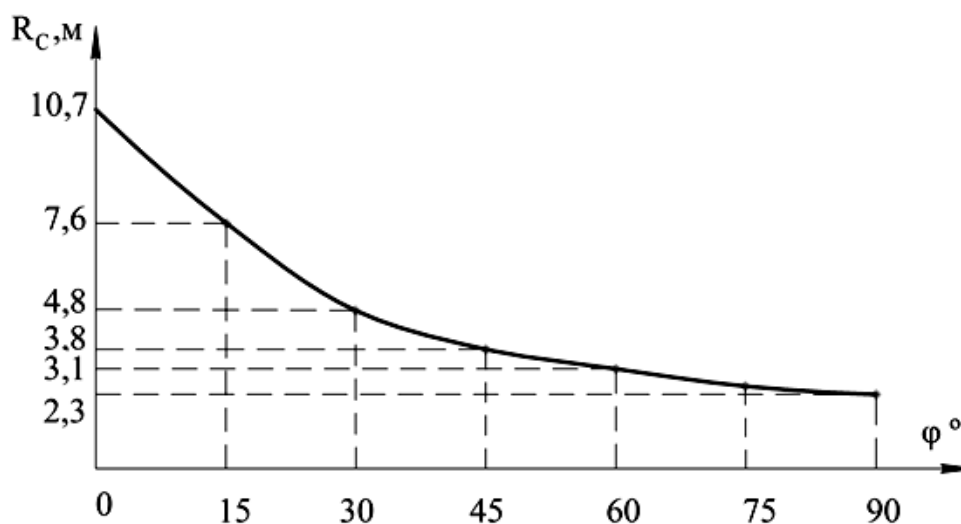


Рисунок 2.9 – Графік зміни радіуса кривизни

Рівняння (2.14) і (2.15) не містять у собі швидкості v . Це означає, що вони дійсні при будь-якій закономірності зміни швидкості v як під час входу в поворот, так і під час виходу з повороту. Але це не означає, що швидкість v не впливає на

результат. Вона тут врахована, але не безпосередньо, а через кут φ – основний аргумент цих рівнянь.

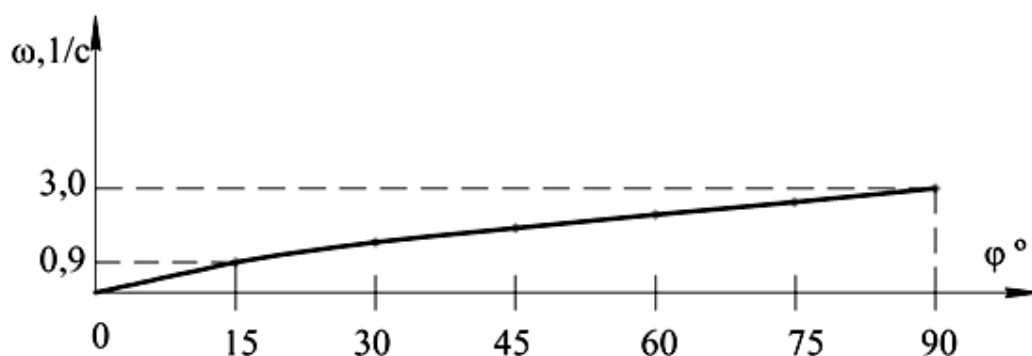


Рисунок 2.10 – Графік зміни кутової швидкості

2.4. Пошук способу урахування впливу відведення передніх коліс при визначенні траєкторії.

Під час криволінійного руху колісної машини виникають бічні сили, що діють на колеса у напрямку, перпендикулярному площині їх обертання: ці сили змінюють кути α_1 і α_2 , які мали б місце при відсутності відведення коліс, відповідно на величини α_1'' і α_2'' . Очевидно, що це явище призводить до зміни курсового кута α . Наприклад, при вході в лівий поворот курсовий кут α і кут α_1 від відведення передніх коліс зменшуються. В результаті центр кривизни O_δ зміщується на величину e (рис. 2.1), змінюється радіус кривизни R та інші параметри, що викликає відповідну деформацію траєкторії руху центра C . Окрім того, додаткове відхилення вектора ν від осі машини викликається поворотом самих коліс, тобто поворот керма.

Розглянемо спосіб теоретичного визначення траєкторії руху центра мас машини C на прикладі чотириколісного трактора з передніми керованими колесами з урахуванням змінного кута їх повороту і явища відведення передніх коліс.

Як відомо, у формулах (2.8) для проєкцій швидкості центра C на нерухомі осі координат кут α у загальному випадку може бути визначений з виразу $\tan \alpha = [\ell \tan(\alpha_1 - \alpha_1'') + \ell_1 \tan \alpha_2''] / L$. Тут ℓ і ℓ_1 – відстані від центра мас, відповідно,

до заднього і переднього мостів; α_1'' і α_2'' – кути відхилення вектора ν від осі трактора, викликані явищем відведення коліс, відповідно, передньої і задньої осей.

Функцію курсового кута на ділянці входу в поворот представимо в залежності від кута повороту корпусу машини φ :

$$\alpha = \alpha' - \alpha'' = (\alpha'_o + k_1\varphi) - (\alpha''_o + k_2\varphi) = \alpha_o + k\varphi, \quad (2.17)$$

де α' і α'' – кути відхилення вектора швидкості ν від осі трактора, викликані, відповідно, поворотом передніх коліс або поворотом керма і бічним відведенням передніх коліс, які змінюються в процесі повороту; α'_i і α''_i – початкові значення кутів α' і α'' , які залежать від повороту керма в момент початку входу в поворот або в момент початку виходу з повороту; k_1 і k_2 – коефіцієнти, які визначають інтенсивність зміни кутів α' і α'' , і приймаються в залежності від меж кутів, в яких здійснюється поворот. Відведення передніх коліс зменшує кривизну траєкторії, а отже, і величину курсового кута, знижуючи поворотність машини. Відведення задніх коліс спричиняє зворотний ефект. Це слід враховувати, приймаючи знаки для кутів α' і α'' і коефіцієнтів інтенсивності їх зміни k_1 і k_2 . Таким чином, для ділянки входу в поворот з урахуванням впливу відведення передніх коліс маємо очевидні співвідношення:

$$\alpha_o = \alpha'_o - \alpha''_o; \quad k = k_1 - k_2. \quad (2.18)$$

В інтегральних рівняннях (2.9) для x і y маємо чотири незалежні змінні: ν , α , φ і час t . З метою зведення підінтегральної функції до однієї змінної величини замінимо, як це робилося раніше, диференціал dt на $d\varphi$. Але на цей раз з метою уточнення результату скористуємося планом швидкостей. Для цього виразимо елементарну дугу – переміщення точки B відносно точки C (рис. 2.11) – через швидкість $\nu = \nu_C$ і відстань ℓ від центра ваги машини до задньої осі: $dS = \ell d\varphi = \nu_{BC} dt$, де ν_{BC} – швидкість точки B відносно точки C . З плану швидкостей на рисунку 12 маємо: $\nu_{BC} = \nu \sin \alpha \approx \nu \alpha = \nu(\alpha_o + k\varphi)$. Тут також прийнято до уваги, що максимальне значення кута α , яке залежить від кута

повороту керованих коліс α_1 , може змінюватись в межах, для яких $\sin \alpha \approx \alpha$. [2]
кути α_1 і α пов'язані залежністю $\tan \alpha = \ell \tan(\alpha_1 - \alpha_1'') / (\ell + \ell_1)$, згідно якої при
робочих значеннях кута $\alpha_1 = 50 \dots 55^\circ$ кут $\alpha = 25 \dots 30^\circ$.

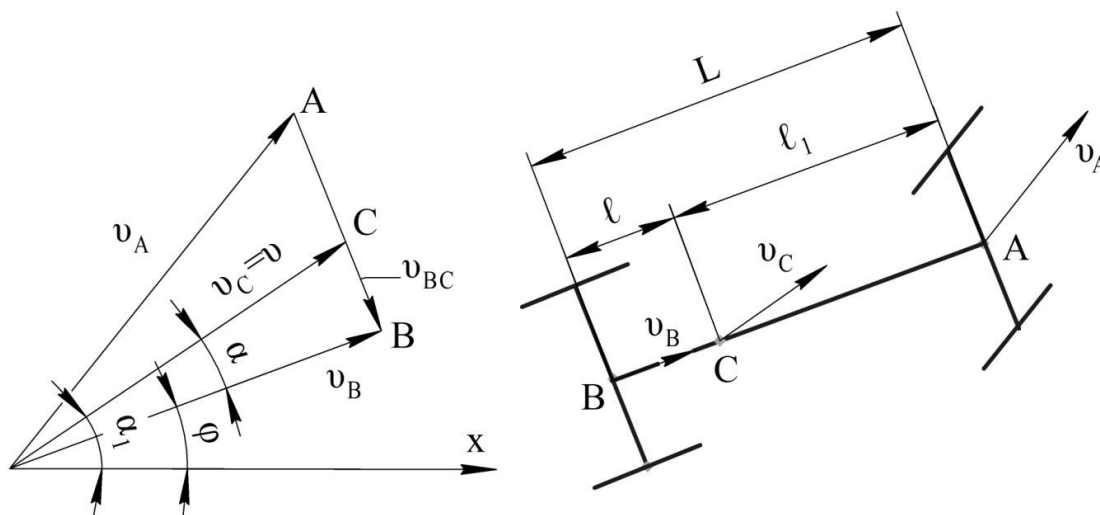


Рисунок 2.11 – План швидкостей для характерних точок остова трактора

Згідно (8) швидкість v можна виразити через її проекції на осі координат (рис. 5):

$$v = \frac{v_x}{\cos(\alpha + \varphi)} = \frac{v_x}{\cos[\alpha_o + (1+k)\varphi]};$$

$$v = \frac{v_y}{\sin(\alpha + \varphi)} = \frac{v_y}{\sin[\alpha_o + (1+k)\varphi]}. \quad (2.19)$$

Тоді остаточні рівняння криволінійного руху в інтегральній формі будуть приведені до рівнянь (2.11), а їх рішення будуть рівняння (2.14) і (2.15).

Застосовуючи рівняння (2.14) і (2.15) при побудові конкретної траєкторії, необхідно задатися коефіцієнтами k_1 і k_2 , початковими кутами α_o' і α_o'' , а також значеннями кута φ , які визначають межі ділянки входу в поворот або ділянки виходу з повороту. Рівняння справедливі тільки в межах розглянутих ділянок. У рівняннях (2.15) коефіцієнт k береться за модулем, тому що його знак врахований при виведенні цих рівнянь.

Розглянемо конкретний випадок на прикладі трактора МТЗ-80 ($\ell = 0,93$ м, $L = 2,45$ м). Нехай необхідно розрахувати основні параметри ділянок

входу в поворот на 90° і подальшого виходу з повороту на 90° . В результаті трактор повинен розвернутися на 180° . Приймаємо вихідні дані на ділянці входу в поворот: $\alpha'_o = 5^\circ$; $\alpha''_o = 0,05^\circ$; $k_1 = 0,2$ і $k_2 = -0,05$, знаходимо значення курсового кута, викликаного поворотом керованих коліс, в кінці ділянки: $\alpha'_k = \alpha'_o + k_1\varphi = 5 + 0,2 \cdot 90 = 23^\circ$, що відповідає середньому куту повороту керованих коліс $\alpha'_{1к} = 48,2^\circ$, і значення курсового кута, викликаного відведенням коліс $\alpha''_k = \alpha''_o + k_2\varphi = 0,5 + 0,05 \cdot 90 = 5^\circ = 0,0872$ рад. Курсовий кут в кінці ділянки входу в поворот $\alpha_k = \alpha'_k - \alpha''_k = 23 - 5 = 18^\circ$. Для врахування явища відведення коліс слід виходити з конкретних умов, використовуючи наявні відомості про тип коліс, стан ґрунту і передбачувану швидкість руху під час повороту. В даному прикладі $k = 0,2 - 0,05 = 0,15$; $\alpha_o = 5 - 0,5 = 4,5^\circ = 0,0785$ рад. Спрощені рівняння траєкторії руху на ділянці входу в поворот для розглянутого прикладу будуть:

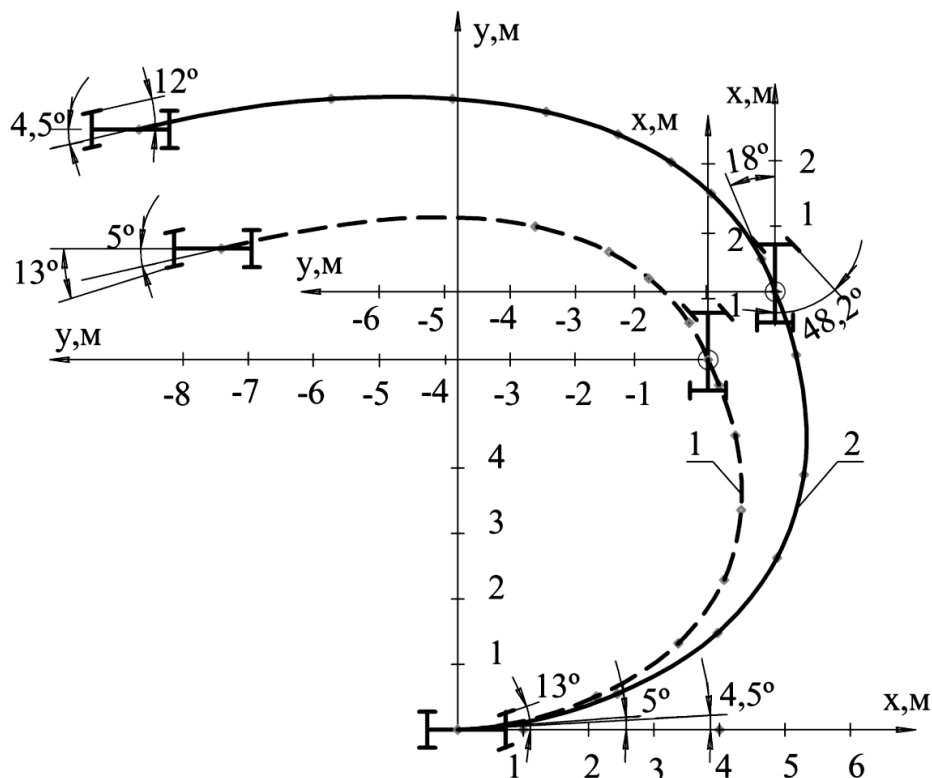
$$\begin{aligned} x &= 6,2(-0,33\varphi^2 + 0,226\varphi + 0,863\ln|1 + 1,91\varphi|); \\ y &= 6,2(1,15\varphi - 1,523\ln|1 + 1,91\varphi|). \end{aligned} \quad (2.20)$$

На ділянці виходу з повороту початок системи координат слід помістити в кінцеву точку траєкторії входу в поворот і прийняти такі вихідні дані: $\varphi = 90^\circ \dots 0^\circ$; $\alpha'_o = 23^\circ$; $\alpha''_o = 5,0^\circ$. На початку цієї ділянки передні колеса повернені на кут $\alpha_{1o} = 48,2^\circ$. Бічні сили як при вході в поворот, так і під час виходу з повороту зберігають напрямок і інтенсивність зміни однаковими, тому $\alpha_o = \alpha'_o + \alpha''_o = 23 - 5 = 18^\circ = 0,314$ рад і $k_2 = -0,05$. Нехай в кінці виходу з повороту необхідно витримати умову $\alpha_k = \alpha'_k - \alpha''_k = 5 - 0,5 = 4,5^\circ$, де кут $\alpha''_k = \alpha''_o - k_2\varphi = 5 - 0,05 \cdot 90 = 0,5^\circ$. Тоді $k_1 = (\alpha'_k - \alpha''_k) / \varphi = (5 - 23) / 90 = -0,2$ і загальний коефіцієнт інтенсивності зміни курсового кута на ділянці виходу з повороту $k = k_1 - k_2 = -0,2 - (-0,05) = -0,15$, або $k = (\alpha_k - \alpha_o) / \varphi = (4,5 - 18) / 90 = -0,15$. Рівняння траєкторії на ділянці виходу з повороту у даному випадку будуть:

$$x = 6,2(0,18\varphi^2 + 1,023\varphi + 1,191\ln|1 - 0,478\varphi|);$$

$$y = 6,2(-0,85\varphi - 2,093\ln|1 - 0,478\varphi|). \quad (2.21)$$

На рисунку 2.12 зображені траєкторії входу в поворот і виходу з повороту для наведених вище умов як з урахуванням впливу відведення передніх коліс (крива 2), так і без урахуванням впливу відведення коліс (крива 1).



1 – без урахування відведення коліс; 2 – з урахуванням відведення коліс.

Рисунок 2.12 – Траєкторії входу в поворот і виходу з повороту трактора МТЗ-80

Очевидно, що за прийнятими середніми значеннями коефіцієнта k_2 має місце істотна розбіжність траєкторій, побудованих з урахуванням і без урахування впливу відведення передніх коліс, як на ділянці входу в поворот, так і на ділянці виходу з повороту. Відведення передніх коліс завжди знижує інтенсивність входу в поворот і виходу з повороту.

Час руху трактора на ділянках входу в поворот і виходу з повороту при постійній швидкості v можна визначити, скориставшись формулою (2.10) для dt приймаючи до уваги, що $R_C = \ell / \alpha$ і $d\varphi = d\alpha / k$:

$$t = \int_0^{\varphi} \frac{R_C}{v} d\varphi = \frac{\ell}{v} \cdot \frac{1}{k} \int_{\alpha_0}^{\alpha_k} \frac{d\alpha}{\alpha} = \frac{\ell}{v} \cdot \frac{1}{k} \ln \left| \frac{\alpha_k}{\alpha_0} \right|. \quad (2.22)$$

Тут α_k – значення кута α в кінці ділянки входу в поворот, яке в розглянутому прикладі при відсутності відведення коліс дорівнює $5+0,2 \cdot 90=23^\circ$, а з урахуванням відведення коліс $23-5=18^\circ$. На ділянці виходу з повороту при відсутності відведення коліс $\alpha_k = 5^\circ$, а з урахуванням відведення коліс $\alpha_k = 5 - 0,5 = 4,5^\circ$.

Результати розрахунків для наведеного прикладу при постійній швидкості $v = 7$ км/год, без урахування впливу явища відведення коліс такі: $t_{ex} = t_{eux} = 3,55$ с. Довжини ділянок траєкторій, відповідно, будуть $S_{ex} = vt_{ex} = S_{eux} = 7,1$ м.

Оскільки відведення передніх коліс уповільнює вхід в поворот і вихід з повороту, а відведення задніх коліс спричиняє зворотний ефект, то це треба враховувати, приймаючи знаки відповідних коефіцієнтів інтенсивності зміни курсового кута.

З урахуванням впливу відведення передніх коліс час руху на ділянках входу в поворот і виходу з повороту згідно (2.22) буде: $t_{ex} = t_{eux} = 4,3$ с. Довжини цих ділянок: $S_{ex} = S_{eux} = 8,6$ м.

2.5. Узагальнення рівнянь траєкторій криволінійного руху в функції кута повороту корпусу машини.

2.5.1. Побудова рівняння без урахування впливу явища відведення коліс. Прийемо наступні визначення ділянок траєкторії криволінійного руху:

- вхід в лівий (правий) поворот – обертання корпусу машини проти годинникової стрілки (за годинниковою стрілкою) при змінному положенні керма і зміні кута φ від 0 до φ_k ;

- вихід з лівого (правого) повороту – обертання корпусу машини проти годинникової стрілки (за годинниковою стрілкою) за рахунок вирівнювання керованих коліс до початкового положення;

- лівий (правий) поворот – рух машини проти годинникової стрілки (за годинниковою стрілкою) при фіксованому положенні керма, відповідно, після входу в лівий (правий) поворот.

Вище були отриманні рівняння (2.14) для траєкторії руху на ділянці входу в лівий поворот. Потім незалежно були виведені рівняння (2.15) для ділянки виходу з лівого повороту. Аналіз цих рішень показує, що якщо у рівняннях (2.15) прийняти коефіцієнт інтенсивності зміни курсового кута k від'ємним, як це має місце при виході із лівого повороту, то рівняння (2.15) приймають форму рівнянь (2.14). Це означає, що рівняння (2.14) придатні як для ділянок входу в лівий поворот, так і для ділянок виходу із лівого повороту. Такий висновок було зроблено в роботі [5], де показано, що рівняння в параметричній формі (2.14) для траєкторії руху чотирьохколісної машини з передніми керованими колесами у функції кута повороту остова машини з урахуванням інтенсивності повороту керованих коліс або керма придатні як для ділянок входу в лівий поворот, так і для ділянок виходу із повороту.

Подальші дослідження показали, що рівняння (2.14) адекватно описують також і траєкторії входу в правий поворот і виходу з правого повороту. При вході в правий поворот кут повороту корпусу машини φ слід приймати від'ємним, тому що машина обертається відносно осей правої системи координат за годинниковою стрілкою, а коефіцієнт інтенсивності k – додатнім, тому що курсовий кут α під час входу в поворот зростає. При виході із правого повороту як кут повороту φ , так і коефіцієнт k – обидва від'ємні. Інтерпретація цих правил показана на рисунку 2.13.

Таким чином, рівняння, записані у формі (2.14), можна вважати узагальненими рівняннями траєкторії руху чотирьохколісної машини, придатними для обох видів входу в поворот і виходу із повороту:

$$\begin{aligned}
 x &= \int v \cos(\alpha + \varphi) dt = \ell \int \frac{\cos[\alpha_o + (1 + k_\alpha)\varphi]}{\alpha_o + k_\alpha \varphi} d\varphi = \\
 &= \ell \left[-\frac{(1+k)^2}{4k} \varphi^2 + \frac{\alpha_o(1-k^2)}{2k^2} \varphi - \frac{\alpha_o^2 - 2k^2}{2k^3} \ln \left| \frac{\alpha_o + k\varphi}{\alpha_o} \right| \right]; \quad (2.23)
 \end{aligned}$$

$$y = \int v \sin(\alpha + \varphi) dt = \ell \int \frac{\sin[\alpha_o + (1+k_\alpha)\varphi]}{\alpha_o + k_\alpha \varphi} d\varphi = \ell \left[\frac{(1+k)\varphi}{k} - \frac{\alpha_o}{k^2} \ln \left| \frac{\alpha_o + k\varphi}{\alpha_o} \right| \right]. \quad (2.24)$$

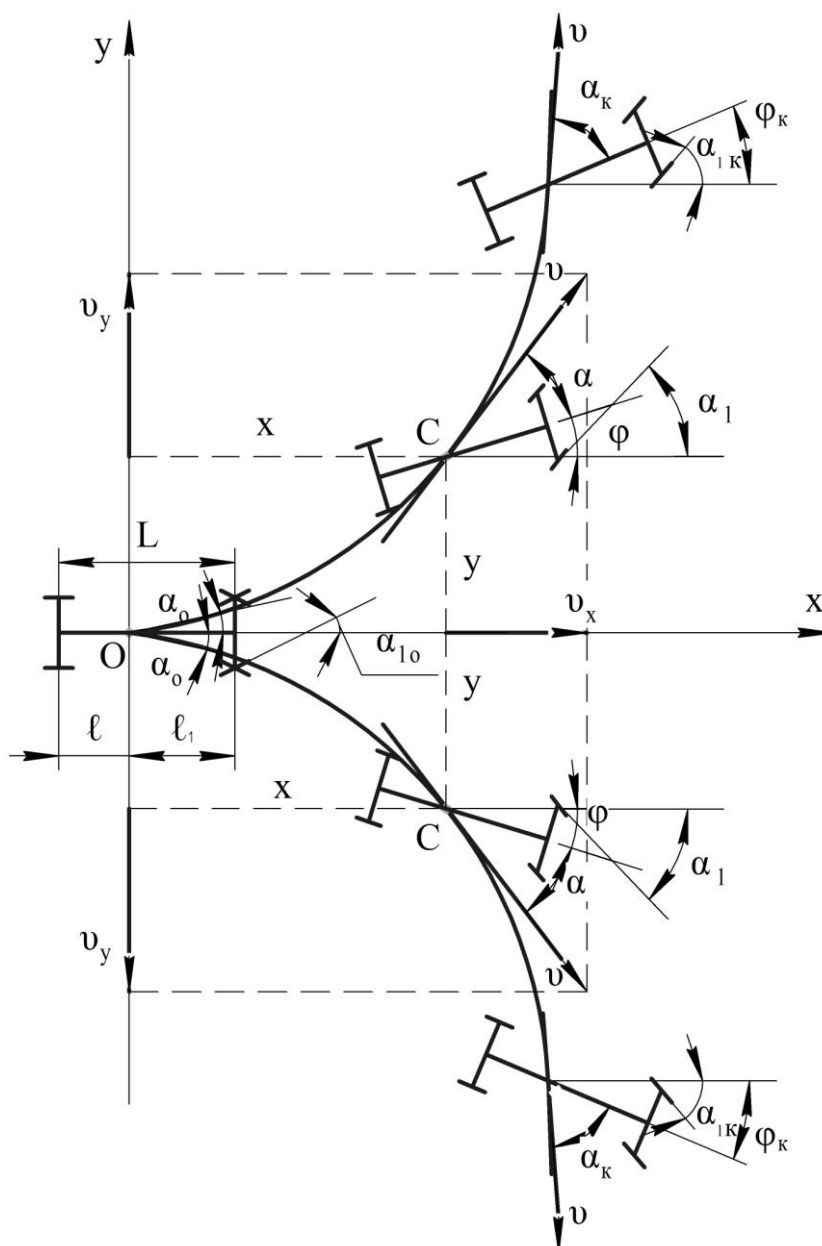


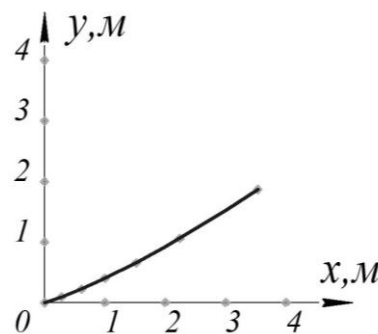
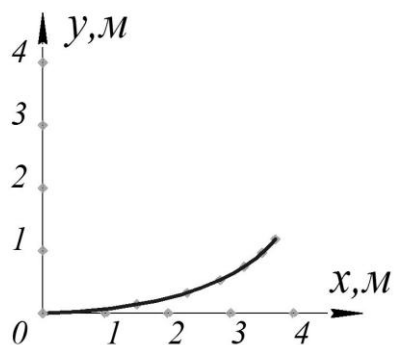
Рисунок 2.13 – Схема ділянок траєкторії входу в лівий і правий повороти

На рисунку 2.14 представлені траєкторії входу в поворот і виходу з повороту, як для лівого, так і для правого поворотів.

Траєкторії побудовані за допомогою рівнянь (2.23) і (2.24) без урахування відведення коліс для чотирьохколісного трактора МТЗ-80 з передніми керованими колесами ($l = 0,93$ м, $L = 2,45$ м).

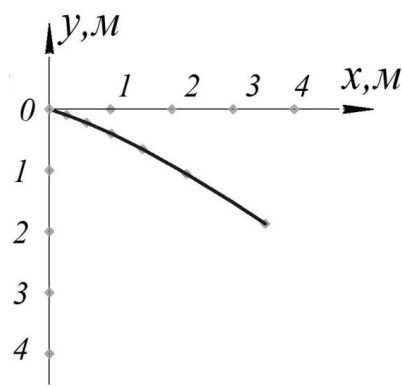
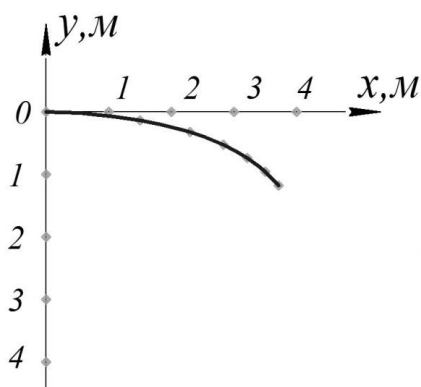
1) $\alpha_o = 2^\circ; \alpha_k = 17^\circ; \varphi_k = 30^\circ; k_\alpha = 0,5$

2) $\alpha_o = 17^\circ; \alpha_k = 2^\circ; \varphi_k = 30^\circ; k_\alpha = -0,5$



3) $\alpha_o = -2^\circ; \alpha_k = -17^\circ; \varphi_k = -30^\circ; k_\alpha = 0,5$

4) $\alpha_o = -17^\circ; \alpha_k = -2^\circ; \varphi_k = -30^\circ; k_\alpha = -0,5$



1 – вхід в лівий поворот, 2 – вихід з лівого повороту,

3 – вхід в правий поворот, 4 – вихід з правого повороту

Рисунок 2.14 – Окремі ділянки траєкторії криволінійного руху машини:

2.5.2. Побудова рівнянь з урахуванням впливу явища відведення всіх коліс машини. Узагальнені рівняння (2.23) і (2.24) дозволяють побудувати траєкторії також із урахуванням явища відведення як задніх, так і передніх коліс, викликаного дією бічних сил. У цьому випадку коефіцієнт $k_\alpha = k_1 + k_2 + k_3$, де складові k_1 , k_2 , k_3 – коефіцієнти інтенсивності зміни кута α , які враховують, відповідно, кут повороту передніх коліс від обертання керма, кут відведення передніх коліс і кут відведення задніх коліс. Коефіцієнт k_1 на ділянці входу в поворот додатний, а на ділянці виходу з повороту від'ємний. Коефіцієнт k_2 завжди має знак, протилежний знаку коефіцієнта k_1 , оскільки відведення передніх коліс зменшує курсовий кут, обумовлений поворотом керма. Коефіцієнт k_3 завжди співпадає із знаком з коефіцієнтом k_1 .

Початкове значення курсового кута α_o на ділянці входу в поворот, як було сказано вище, введене штучно, щоб запобігти невизначеності натурального логарифму, що входить до рівнянь траєкторії. Його можна приймати довільно, окрім нульового значення, що відповідає реальній ситуації, коли на початку входу в поворот водій здійснює миттєвий поворот керованих коліс і далі рівномірно збільшує кут α_1 протягом усього періоду входу в поворот. Значення курсового кута в кінці входу в поворот з урахуванням відведення коліс можна визначити за формулою [2]:

$$\tan \alpha_k = [\ell \tan(\alpha_{1k} - \alpha'_{1k}) + \ell_1 \tan \alpha'_{2k}] / L, \quad (2.25)$$

де ℓ_1 – відстань від центра ваги машини до передньої осі; α'_{1k} і α'_{2k} – кути відведення в кінці ділянки входу в поворот, викликані відведенням, відповідно, передніх і задніх коліс:

$$\alpha'_{1k} = \alpha'_{1o} + k_2 \varphi_k; \quad \alpha'_{2k} = \alpha'_{2o} + k_3 \varphi_k.$$

Тут початкові значення кутів відведення передніх і задніх коліс α'_{1o} і α'_{2o} приймаються в залежності від кута α_o .

На ділянці виходу з повороту початкове значення курсового кута дорівнює його значенню в кінці ділянки входу в поворот.

2.5.3. Узагальнення рівнянь траєкторії з фіксованим положенням керма. Остаточні рівняння (2.23) і (2.24) неможливо використати для розрахунку траєкторії руху машини з фіксованим положенням керма, оскільки у цьому випадку треба прийняти $k_\alpha = 0$. Тоді можна скористатися інтегральними формами цих рівнянь (2.9) або (2.11). Після визначення постійних інтегрування з умов ($x = y = 0; \varphi = 0$) отримаємо рівняння колової траєкторії:

На рисунку 2.15 представлена колова траєкторія правого повороту чотирьохколісного трактора МТЗ-80 на кут $\varphi = 240^\circ$, яка відповідає курсовому куту $\alpha = -17^\circ$.

$$x = \frac{\ell}{\alpha_o} [\sin(\alpha_o + \varphi) - \sin \alpha_o], \quad (2.26)$$

$$y = -\frac{\ell}{\alpha_o} [\cos(\alpha_o + \varphi) - \cos \alpha_o]. \quad (2.27)$$

Для побудови всіх ділянок траєкторії використана програма Microsoft Excel.

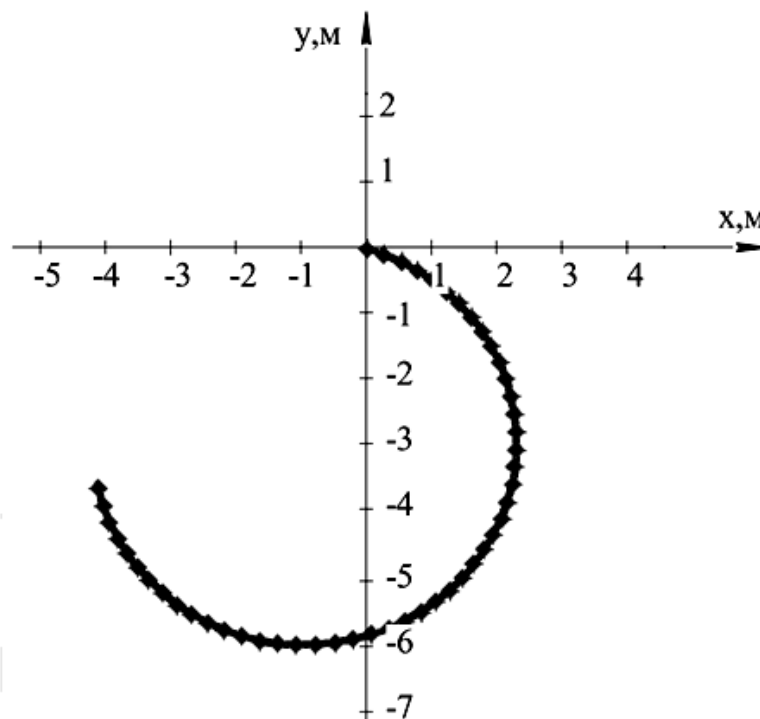


Рисунок 2.15 – Колова траєкторія правого повороту чотирьохколісного трактора МТЗ-80 ($\alpha_o = -17^\circ$, $\varphi_k = -240^\circ$, $\ell = 0,93\text{м}$)

З метою побудови траєкторії, яка складається із спряжених криволінійних ділянок, введемо наступні позначення: α_{1o} – початкове середнє значення кута повороту керованих коліс; $k_\alpha = (\alpha_k - \alpha_o) / (\varphi_k - \varphi_o)$ – коефіцієнт інтенсивності зміни курсового кута α під час виконання повороту; φ_o і φ_k – значення кута φ на початку і в кінці ділянки повороту; α_o і α_k – значення кута α на початку і в кінці ділянки входу в поворот або виходу із повороту.

Початкове значення курсового кута α_o на ділянці входу в поворот можна приймати довільним, окрім нульового значення. Останнє відповідає реальній ситуації, коли на початку входу в поворот водій здійснює миттєвий поворот

керуваних коліс. Далі кут α_1 рівномірно збільшується протягом усього періоду входу в поворот.

2.6. Побудова складної траєкторії руху та спряження ділянок.

Для побудови складної траєкторії руху машини необхідно спряження окремих її ділянок. Для цього в програмі Microsoft Excel використана єдина система координат x_1y_1 для всіх ділянок. Формули для перерахування координат (x_i, y_i) i -ої системи координат в систему координат x_1y_1 (рис. 2.16) у даному випадку будуть:

$$x_{i1} = x_{(i-1)n} + x_i \cos \theta_{i1} - y_i \sin \theta_{i1}; \quad (2.28)$$

$$y_{i1} = y_{(i-1)n} + x_i \sin \theta_{i1} + y_i \cos \theta_{i1}; \quad (2.29)$$

де θ_{i1} – кут повороту i -ої системи координат відносно системи координат x_1y_1 ; $x_{(i-1)n}$ і $y_{(i-1)n}$ – координати точки в кінці траєкторії попередньої ділянки.

На рисунку 2.17 побудована траєкторія розвороту машини на 180° , яка складається із приведених на рисунках 2.15 і 2.16 ділянок, спряжених за допомогою формул (2.28) і (2.29).

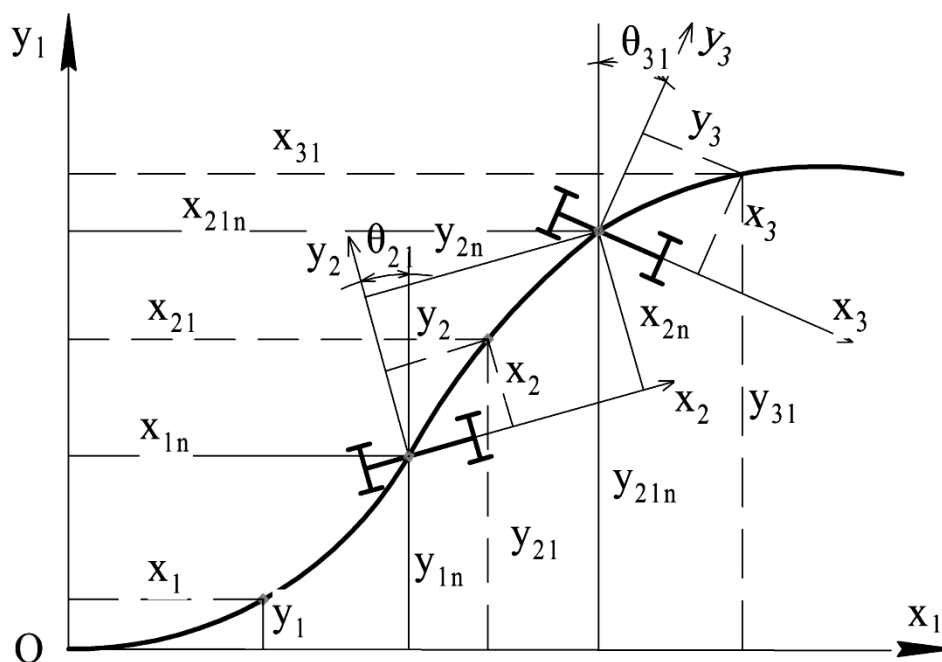
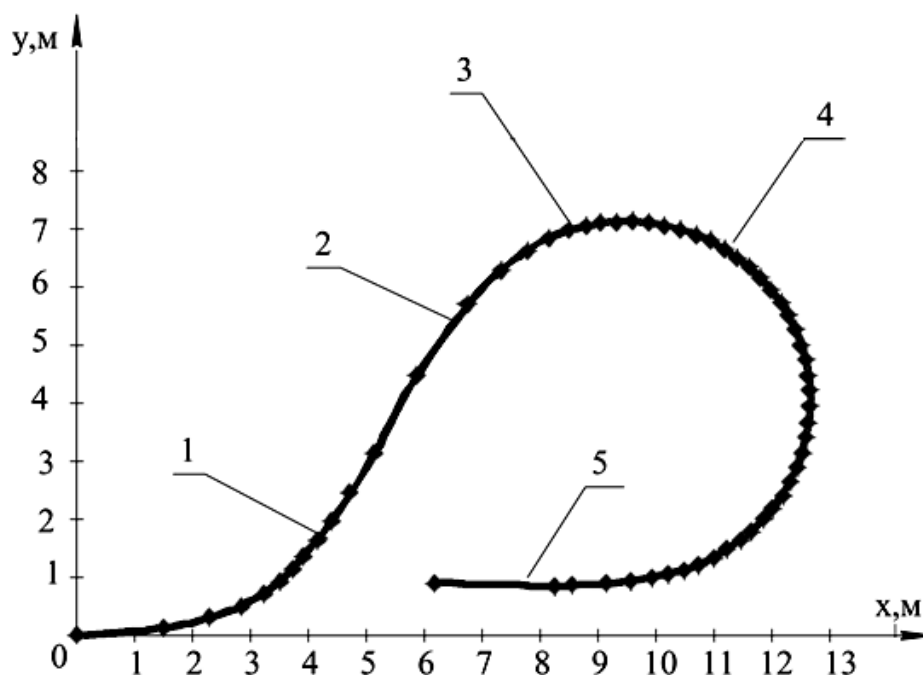


Рисунок 2.16 – До перерахування координат окремих ділянок траєкторії в єдину систему координат x_1y_1 .

Де θ_{i1} – кут повороту i -ої системи координат відносно системи координат x_1y_1 ; $x_{(i-1)n}$ і $y_{(i-1)n}$ – координати точки в кінці траєкторії попередньої ділянки.



1 – вхід в лівий поворот; 2 – вихід з лівого повороту; 3 – вхід в правий поворот;
4 – правий поворот; 5 – вихід з правого повороту.

Рисунок 2.17 – Траєкторія розвороту чотирьохколісної машини на 180°

2.7. Отримання узагальнених рівнянь траєкторії неусталеного руху в функції часу.

2.7.1. Дослідження рівнянь траєкторій в функції кута повороту корпусу машини та виявлення недоліків. У попередніх розділах і в роботі [11] отримані рівняння в параметричній формі для траєкторії неусталеного руху чотирьохколісної машини з передніми керованими колесами у функції кута повороту корпусу машини φ , які описують вхід в поворот і вихід з повороту обох напрямків. В правій декартовій системі координат рівняння для центра мас машини C наведені у вигляді:

$$x = \ell \left[-\frac{(1+k)^2}{4k} \varphi^2 + \frac{\alpha_o(1-k^2)}{2k^2} \varphi - \frac{\alpha_o^2 - 2k^2}{2k^3} \ln \left| \frac{\alpha_o + k\varphi}{\alpha_o} \right| \right];$$

$$y = \ell \left[\frac{(1+k)}{k} \varphi - \frac{\alpha_o}{k^2} \ln \left| \frac{\alpha_o + k\varphi}{\alpha_o} \right| \right].$$
(2.30)

При виводі цих рівнянь було прийнято лінійний закон зміни курсового кута:

$$\alpha = \alpha_o + k\varphi, \quad (2.31)$$

де k – коефіцієнт інтенсивності зміни курсового кута, який показує, на який кут зміниться курсовий кут, якщо корпус машини повернеться на одну кутову одиницю, наприклад, на один градус. У даному випадку це безрозмірна величина.

Очевидною перевагою цих рівнянь є те, що вони описують будь-яку траєкторію несталого руху, незалежно від швидкості руху центра мас машини. Швидкість вже врахована кутом φ . Але це викликає труднощі при відтворенні траєкторії на практиці. Нам не відомий закон зміни кута φ в часі. Хоча після інтегрування рівняння (2.10) залежність часу t від кута φ визначається, але очевидно, що вона складна, бо виражається через логарифмічну функцію.

Спосіб інтегрування рівнянь руху з використанням підстановок $\alpha = \alpha_o + k\varphi$ і $dt = \frac{\ell}{v\ell} d\varphi$ спростив вирішення задачі, але у цьому разі виникають труднощі при створенні програм обертання керма.

Дійсно, з рівняння (2.32) маємо:

$$t = \frac{\ell}{kv} \ln \left| \frac{\alpha}{\alpha_o} \right|, \text{ звідки } \alpha = \alpha_o \exp^{\frac{kv}{\ell} t}. \quad (2.32)$$

Із графіків (рис. 2.18), побудованих згідно (2.32), видно, що експоненти кута α у значній мірі залежать від початкового значення α_o , а кут φ змінюється по закону параболи. Відтворення траєкторій, таким чином, ускладнюється, тому що складним стає узгодження цих параметрів, якщо прийняти залежність $\alpha = \alpha_o + k\varphi$. Якщо ж прийняти залежність $\alpha = \alpha_o + kt$, то графіки зміни курсового кута стають лінійними (рис. 2.19), і необхідну інтенсивність повороту корпусу машини можна забезпечити рівномірним обертанням керма.

Другим суттєвим недоліком рівнянь (2.30) є невизначеність результатів на початку входу в поворот, якщо початковий курсовий кут $\alpha_o = 0$. Тому використання цих рівнянь стає можливим після введення кута α_o , який не дорівнює нулю. На практиці дуже часто водій робить деякий поворот керованих коліс ще до початку

руху, тому прийняття $\alpha_0 \neq 0$ можна вважати не тільки доцільним, а й обґрунтованим. Тим більше, що величина α_0 не має особливого значення, вона лише прискорює обертання корпусу машини.

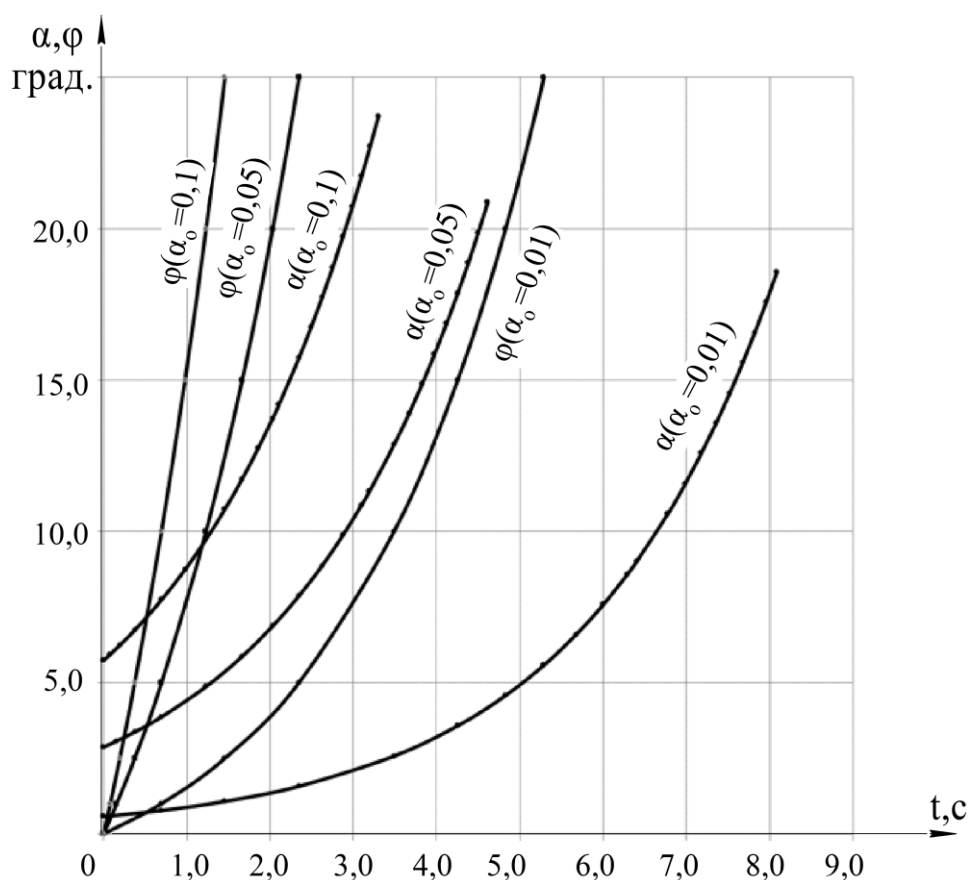


Рисунок 2.18 – Графіки зміни курсового кута α і кута повороту корпусу машини φ при різних значеннях α_0 , якщо $\alpha = \alpha_0 + k\varphi$ ($k = 0,2; v = 2$ м/с; $\ell = 0,93$ м)

Більш природно і зручніше вивчати різні процеси, а особливо рух, в функції часу. Це можна зробити, наприклад, у такий спосіб. При постійній швидкості v елементарна дуга $dS = R d\varphi = v dt$, де R – радіус кривизни траєкторії. Після інтегрування цього рівняння і визначення постійної з умови ($\varphi = 0, t = 0$) з урахуванням (2.31) отримаємо:

$$t = \frac{\ell}{vk} \ln \left| \frac{\alpha_0 + k\varphi}{\alpha_0} \right| \text{ або } \varphi = \frac{\alpha_0}{k} \left(\exp \frac{kv t}{\ell} - 1 \right). \quad (2.33)$$

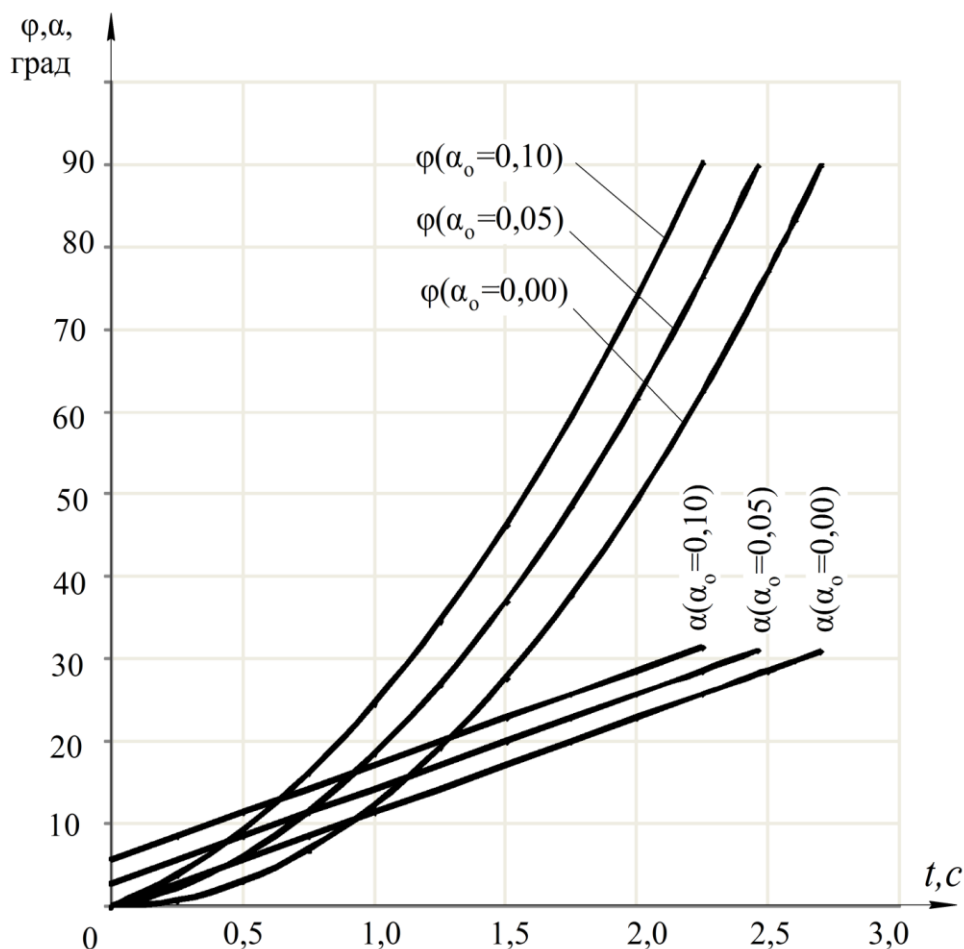


Рисунок 2.19 – Графіки зміни курсового кута α і кута повороту корпусу машини φ при різних значеннях α_0 , якщо $\alpha = \alpha_0 + kt$ ($k = 0,2 \text{ с}^{-1}$; $v = 2 \text{ м/с}$; $\ell = 0,93 \text{ м}$).

2.7.2. Дослідження рівнянь траєкторії в функції часу. Тоді, скориставшись отриманою залежністю (2.32), рівняння (2.30) можна записати через аргумент t :

$$x = \ell \left[-\frac{\alpha_0^2 (1+k)^2}{4k^3} \left(\exp^{\frac{kv t}{\ell}} - 1 \right)^2 + \frac{\alpha_0^2 (1-k^2)}{2k^3} \left(\exp^{\frac{kv t}{\ell}} - 1 \right) - \frac{\alpha_0^2 - 2k^2}{2k^2 \ell} vt \right]; \quad (2.34)$$

$$y = \ell \left[\frac{\alpha_0 (1+k)}{k^2} \left(\exp^{\frac{kv t}{\ell}} - 1 \right) - \frac{\alpha_0}{k} \cdot \frac{vt}{\ell} \right].$$

Рівняння (2.30) і (2.34) абсолютно ідентичні, лише записані у функції різних аргументів. Коефіцієнт k в рівняннях (2.30) і (2.34) абсолютно однаковий як за фізичним змістом, так і за значенням. Рівняння (2.34) дозволяють досліджувати повороти і розвороти машин і агрегатів у функції часу і отримувати всі параметри

руху (координати x і y , кути α і φ , радіус кривизни R , шлях $S = vt$) відповідно до кута повороту керма або керованих коліс. При використанні рівнянь (2.34) траєкторія визначається в системі координат, початок якої міститься у початковій точці руху ($t = 0$). Для перерахування координат системи x_1y_1 в систему координат x_2y_2 використовувалися формули:

$$\begin{aligned} x &= x_o + x_1 \cos \theta - y_1 \sin \theta; \\ y &= y_o + y_1 \cos \theta + x_1 \sin \theta, \end{aligned} \quad (2.35)$$

де x_o, y_o – координати кінцевої точки траєкторії входу в поворот; θ – кут повороту осей системи координат x_1y_1 відносно системи координат x_2y_2 .

На рисунку 2.20 наведені траєкторії входу в лівий поворот і виходу з повороту трактора МТЗ-80 ($\ell = 0,93$ м; $v = 1$ м/с): вхід в поворот ($\alpha_o = 2^\circ$, $\alpha_k = 17^\circ$, $\varphi_o = 0^\circ$, $\varphi_k = 30^\circ$, $k = 0,5$) і вихід з повороту ($\alpha_o = 17^\circ$, $\alpha_k = 2^\circ$, $\varphi_o = 0^\circ$, $\varphi_k = 30^\circ$, $k = -0,5$) в системі координат x_2y_2 .

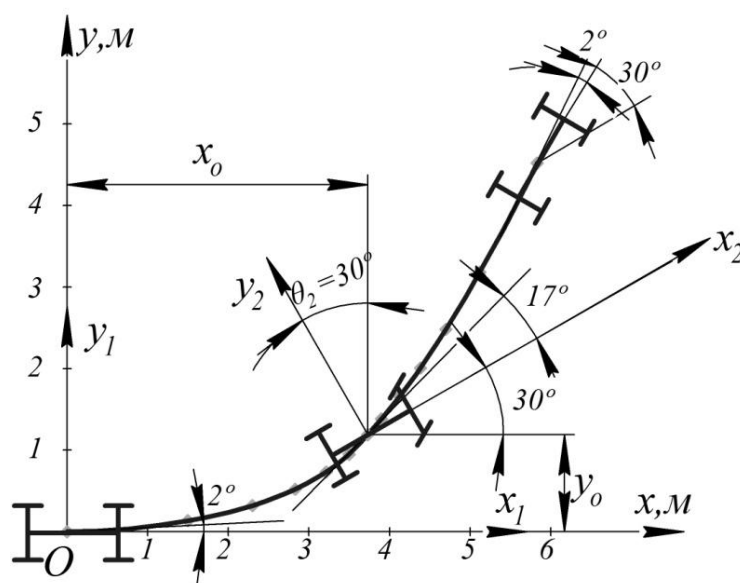


Рисунок 2.20 – Траєкторії входу в лівий поворот і виходу з повороту

2.8. Отримання універсальних рівнянь траєкторій неусталеного руху колісної машини.

2.8.1. Обґрунтування необхідності універсальних рівнянь. Якщо в якості вихідних рівнянь прийняти інтегральні рівняння (2.9), але виразити кут α не через

раніш прийняту залежність $\alpha = \alpha_o + k\varphi$, а прийняти кут α , лінійно змінним по відношенню до часу, а саме:

$$\alpha = \alpha_o + kt, \quad (2.36)$$

де коефіцієнт інтенсивності k зміни курсового кута α тут має розмірність с^{-1} , а співвідношення між φ і t із виразу для елементарної дуги $dS = \ell d\varphi = \nu(\alpha_o + kt)dt$, то після інтегрування цього рівняння з урахуванням початкової умови ($t=0, \varphi=0$) отримаємо:

$$\varphi = \frac{\nu}{\ell} \left(\alpha_o t + \frac{1}{2} k t^2 \right); \quad t = -\frac{\alpha_o}{k} + \sqrt{\left(\frac{\alpha_o}{k} \right)^2 + \frac{2\ell}{\nu k} \varphi}. \quad (2.37)$$

Підстановкою (2.37) в (2.9) незалежна змінна φ тепер замінюється її виразом через час t . Далі, як і при виводі попередніх рівнянь, підінтегральні функції в рівняннях (2.9) розкладемо в ряди Маклорена, беручи для косинуса перші два члени ряду, а для синуса один. В результаті маємо інтегральні рівняння:

$$x = \nu \int \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left[\alpha_o + \left(k + \frac{\nu}{\ell} \alpha_o \right) t + \frac{\nu k}{2\ell} t^2 \right]^2 \right\} dt;$$

$$y = \nu \int \left[\alpha_o + \left(k + \frac{\nu}{\ell} \alpha_o \right) t + \frac{\nu k}{2\ell} t^2 \right] dt.$$

Після інтегрування цих рівнянь і визначення постійних інтегрування з умов ($x=0; y=0; t=0$) отримаємо нові рівняння для траєкторії неусталеного руху чотирьохколісної машини з передніми керованими колесами:

$$x = \nu t \left[\left(1 - \frac{1}{2} \alpha_o^2 \right) - \frac{1}{2} \alpha_o \left(k + \alpha_o \frac{\nu}{\ell} \right) t - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{3} k^2 + \alpha_o k \frac{\nu}{\ell} + \frac{1}{3} \alpha_o^2 \frac{\nu^2}{\ell^2} \right) t^2 - \right. \\ \left. - \frac{1}{8} k \frac{\nu}{\ell} \left(k + \alpha_o \frac{\nu}{\ell} \right) t^3 - \frac{1}{40} k^2 \frac{\nu^2}{\ell^2} t^4 \right]; \quad (2.38)$$

$$y = \nu t \left[\alpha_o + \frac{1}{2} \left(k + \alpha_o \frac{\nu}{\ell} \right) t + \frac{1}{6} k \frac{\nu}{\ell} t^2 \right].$$

Само собою очевидно, що ці рівняння є природними функціями залежності координат траєкторії від часу. Вони дійсні при будь-яких значеннях аргументу t , легко програмується, бо являють собою алгебраїчні поліноми третього і п'ятого

ступеня, а головне, ці траєкторії дуже просто відтворити на практиці, визначаючи координати через деякі відрізки часу t . Таким чином, отримані рівняння можна вважати універсальними рівняннями криволінійного руху чотирьохколісної машини з передніми керованими колесами. Звичайно, що саме рівняння (2.38) будуть прийняті за основу при виконанні експериментальної частини даної роботи.

Можливими маневрами як лівого, так і правого поворотів є: вхід в поворот, рух по коловій траєкторії з фіксованим положенням керма і вихід з повороту. Ми розглянули вхід в лівий поворот. Для виходу з лівого повороту при отриманні траєкторії в правій системі координат треба прийняти $\alpha + \varphi = \alpha_o - kt - \frac{k\nu}{2\ell}t^2$. Після вирішення інтегралів (2.9) у запропонованій послідовності отримаємо рівняння, які виходять із рівнянь (2.38), якщо прийняти k від'ємним. Для знаходження рівнянь траєкторії входу в правий поворот маємо $\alpha + \varphi = -\alpha_o - kt - \frac{k\nu}{2\ell}t^2$. Це означає, що в рівняннях (2.38) треба прийняти α_o і k від'ємними. Нарешті, рівняннями траєкторії виходу з правого повороту теж є рівняння (2.38), якщо в них прийняти $\alpha + \varphi = -\alpha_o + kt + \frac{k\nu}{2\ell}t^2$, тобто α_o – від'ємним, а k – додатнім. Таким чином, рівняння (2.38) дійсно можна вважати універсальними рівняннями траєкторії руху чотирьохколісної машини на будь-яких ділянках неусталеного руху.

2.8.2. Приклади траєкторій входу в поворот при різних вихідних параметрах. На рисунку 2.21 наведені траєкторії входу в лівий поворот трактора МТЗ-80, визначені за допомогою рівнянь (2.38). Тут 1, 2 і 5 – колові траєкторії з радіусом кола 3,55 м; 5,33 м і 26,66 м відповідно. Крива 3 – вхід в поворот із змінними курсовим кутом і радіусом кривизни траєкторії, а лінія 6 означає прямолінійний рух з постійною швидкістю $\nu = 1$ м/с.

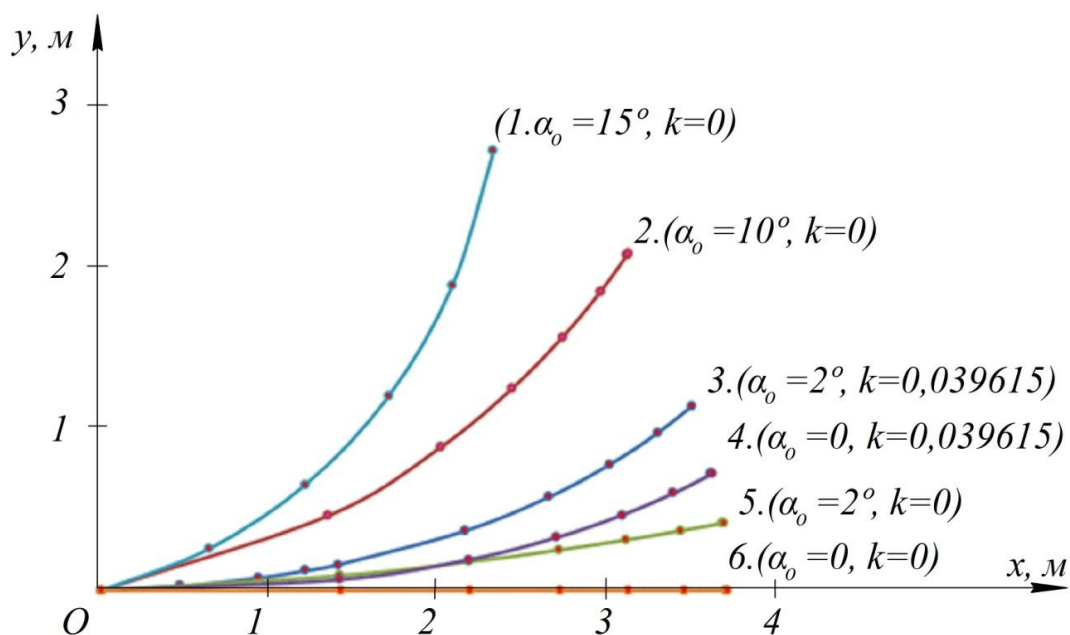


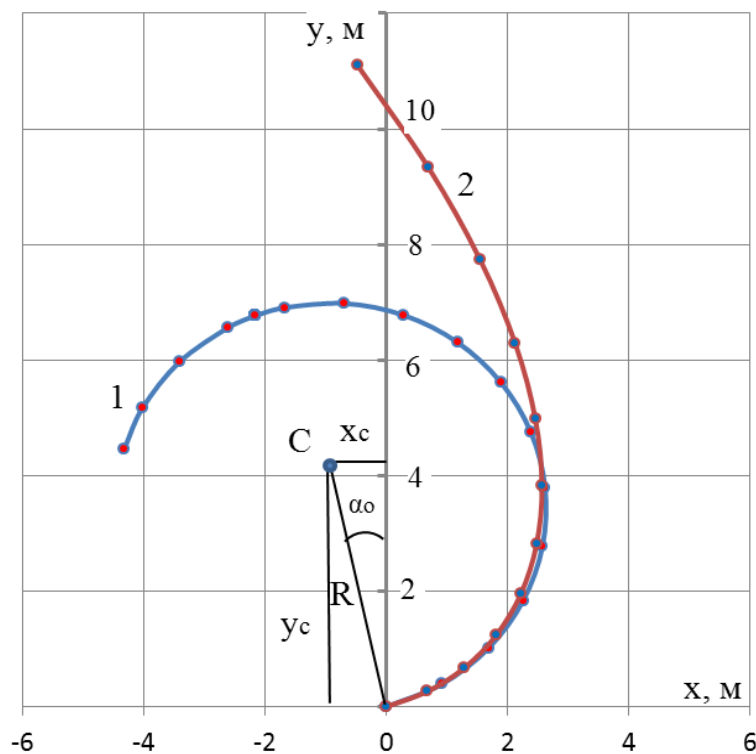
Рисунок 2.21 – Траєкторії входу в лівий поворот, побудовані за рівняннями (2.38) при різних значеннях основних параметрів

2.8.3. Обґрунтування необхідності окремих рівнянь для колових траєкторій. Як видно, рівняння (2.38) придатні для визначення всіх можливих маневрів колісної машини і при будь-яких значеннях вихідних параметрів. Єдине обмеження при використанні цих рівнянь обумовлене припущенням $\sin \alpha = \alpha$, яке допустиме наближено при $\alpha < 30^\circ$, і яке впливає на траєкторію колового руху при значеннях курсового кута за означеною межею. У цих межах рівняння (2.38) з достатньою точністю відображують і колову траєкторію. Для прикладу на рисунку 2.23 побудовані дві траєкторії при $\alpha_o = 15^\circ$ і $k = 0$. Траєкторія 1 розрахована за рівняннями, отриманими в роботі [11] спеціально для колового руху колісної машини:

$$\begin{aligned}
 x &= \frac{\ell}{\alpha_o} [\sin(\alpha_o + \varphi) - \sin \alpha_o]; \\
 y &= -\frac{\ell}{\alpha_o} [\cos(\alpha_o + \varphi) - \cos \alpha_o].
 \end{aligned}
 \tag{2.39}$$

Без урахування відведення коліс це ідеальне коло радіусом $R = 3,55$ м ($\alpha_o = 15^\circ$) з координатами центра $x_c = R \sin \alpha_o$; $y_c = R \cos \alpha_o$. Траєкторія 2 на

рисунку 2.22 побудована за рівняннями (2.38). Вона з достатньою точністю співпадає з кривою 1 в означених вище межах параметрів α і φ .



1 – за рівняннями (2.39); 2 – за рівняннями (2.38).

Рисунок 2.22 – Траєкторії колового руху:

2.9. Одержання уточненого рівняння для параметра y – координати центра ваги машини.

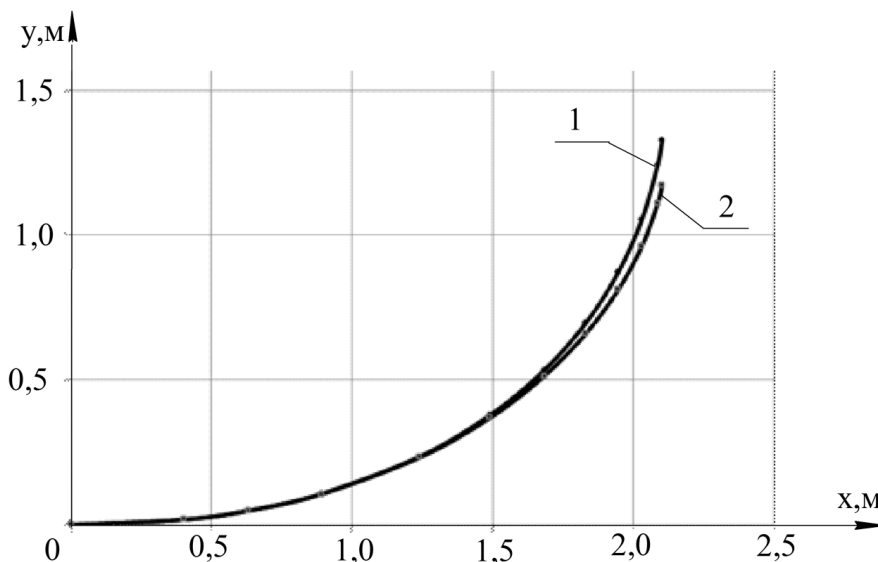
Маємо суттєву різницю між виразами для x і y , тому що для останнього при інтегруванні вихідних рівнянь (2.9) було взято лише один член ряду Маклорена, у той час як для x – два члени. Звичайно, що це вплинуло на точність розрахунків.

Якщо при визначенні рівняння для ординати y взяти два члени ряду Маклорена, отримаємо уточнене рівняння (у даному випадку $\alpha_0 = 0$):

$$y = \frac{kvt^2}{2} \left(1 + \frac{1}{3} \frac{v}{\ell} t \right) - \frac{k^3 vt^4}{12} \left(\frac{1}{2} + \frac{3}{5} \frac{v}{\ell} t + \frac{1}{4} \frac{v^2}{\ell^2} t^2 + \frac{1}{28} \frac{v^3}{\ell^3} t^3 \right). \quad (2.40)$$

На рисунку 2.23 побудовані траєкторії входу в лівий поворот трактора МТЗ-80 із вхідними даними: ($k = 0,2 \text{ с}^{-1}$; $v = 1 \text{ м/с}$; $\ell = 0,93 \text{ м}$). При повороті корпусу

трактора на кут $\varphi = 42,2^\circ$ розбіжність значень ординати y , визначених за рівняннями (2.37) і (2.38), не перевищує 1,5%. Запропонований метод складання рівнянь руху дозволяє створювати траєкторії з будь-якою точністю, в залежності від кількості взятих членів ряду Маклорена для тригонометричних підінтегральних функцій рівнянь (2.9).



1 – за рівняннями (2.38); 2 – з уточненою ординатою за рівняннями (2.40)

Рисунок 2.23 – Траєкторії входу в лівий поворот ($k = 0,2 \text{ с}^{-1}$; $v = 1 \text{ м/с}$; $\ell = 0,93 \text{ м}$):

Тепер про межі використання рівнянь (2.38). Ці рівняння призначені тільки для траєкторій входу в поворот і виходу з поворотів. Вони дають адекватний результат, за умови $\alpha + \varphi < \pi/2$, тому межі застосування цих рівнянь будуть $0 \leq \alpha + \varphi \leq \pi/2$. Рівняння (2.38) не описують колові траєкторії, для яких вхідні дані будуть: $k = 0$; $\alpha = \text{const}$. Для отримання рівнянь колового руху скористаємося співвідношенням (2.10):

$$d\varphi = \frac{\alpha v}{\ell} dt = \frac{v}{R_C} dt, \text{ або } \varphi = \frac{vt}{R_C}, \text{ де } R_C = \frac{\ell}{\sin \alpha} = \frac{\ell}{\alpha}. \quad (2.41)$$

Тоді для лівого повороту (рис. 2.24) після інтегрування рівнянь (2.9) отримаємо:

$$x = \frac{\ell}{\alpha_o} \left\{ \sin \left[\alpha_o \left(1 + \frac{v}{\ell} t \right) \right] - \sin \alpha_o \right\}; \quad y = \frac{\ell}{\alpha_o} \left\{ \cos \alpha_o - \cos \left[\alpha_o \left(1 + \frac{v}{\ell} t \right) \right] \right\}. \quad (2.42)$$

У разі правого повороту кут α в цих рівняннях від'ємний.

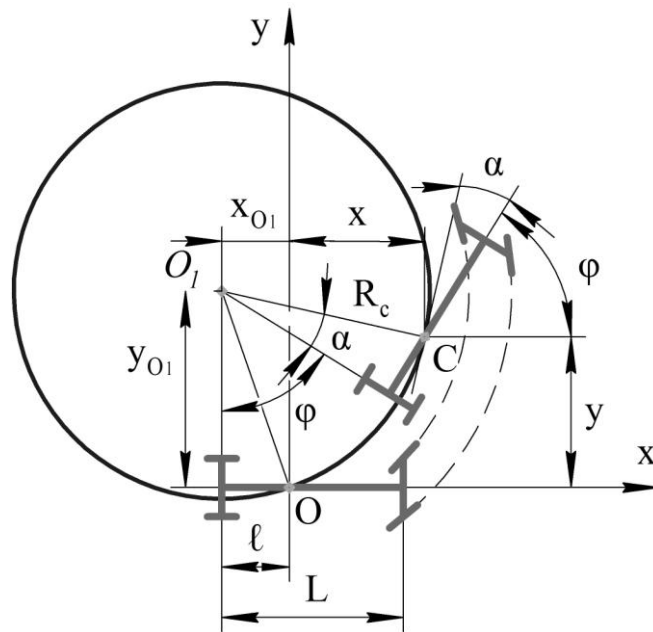


Рисунок 2.24 – Колова траєкторія лівого повороту

2.10. Дослідження додаткових умов при використанні рівнянь криволінійного руху.

Для побудови траєкторії будь-якої ділянки руху машини, перш за все, необхідно визначити початкові параметри. Деякі з них, наприклад, такі як швидкість v , час руху t , початкові значення кутів α і α_1 , кінцеве значення кута φ_k , мінімальний радіус кривизни траєкторії R_{\min} можна прийняти, виходячи з конкретних умов. Решту величин, необхідних для визначення координат траєкторії, таких як коефіцієнт k та інші, можна обчислити. Наприклад, треба забезпечити мінімальний радіус R_{\min} . Приймаючи v , α_o і час входу в поворот t , можна знайти $\alpha_k = l/R_{\min}$, коефіцієнт $k = (\alpha_k - \alpha_o)/t$ і кут $\varphi_k = v(\alpha_o t + 0,5kt^2)/l$. Потім, поділивши час t на інтервали, обчислюємо для кожного значення t координати x і y , і відповідні їм значення кутів α і φ та інші параметри. Другий можливий варіант: відомі значення α_o , α_k і час входу в поворот або виходу з повороту t . Тоді відразу знаходиться коефіцієнт k і кут φ_k . Якщо прийняти v , t і коефіцієнт k , то можна обчислити $\alpha_k = \alpha_o + kt$.

А якщо треба вийти в кінці ділянки на певний кут φ_k , то при відомих α_o , k і ν можна знайти час маневру $t = -\alpha_o/k + \sqrt{(\alpha_o/k)^2 - 2\ell\varphi/\nu k}$.

2.10.1. Пошук розташування центру колової траєкторії. Дослідження складних криволінійних траєкторій, наприклад, розворотів машин і агрегатів, потребує вирішення деяких спеціальних задач. Так, при переході від входу в поворот до руху по коловій траєкторії необхідно визначити радіус кола і правильно розташувати його центр. На рисунку 2.25 побудована лінія центрів кривизни траєкторії входу в лівий поворот, координати якої в системі координат $x_i y_i$ можна визначити за формулами (2.43), а перерахунки їх у загальну систему координат $x y$ виконати за формулами (2.44):

$$\begin{cases} x_{ui} = x_i - R \sin(\alpha + \varphi) = x_i - \frac{\ell}{\alpha} \sin(\alpha + \varphi); \\ y_{ui} = y_i + R \cos(\alpha + \varphi) = y_i + \frac{\ell}{\alpha} \cos(\alpha + \varphi). \end{cases} \quad (2.43)$$

$$\begin{cases} x_u = x_{oi} + x_{ui} \cos \theta - y_{ui} \sin \theta; \\ y_u = y_{oi} + y_{ui} \cos \theta + x_{ui} \sin \theta. \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_u = x_{oi} + \left[x_i - \frac{\ell}{\alpha} \sin(\alpha + \varphi) \right] \cos \theta - \left[y_i + \frac{\ell}{\alpha} \cos(\alpha + \varphi) \right] \sin \theta; \\ y_u = y_{oi} + \left[y_i + \frac{\ell}{\alpha} \cos(\alpha + \varphi) \right] \cos \theta + \left[x_i - \frac{\ell}{\alpha} \sin(\alpha + \varphi) \right] \sin \theta. \end{cases} \quad (2.44)$$

Ці формули справедливі для ділянок входу і виходу як лівого, так і правого поворотів. Всі величини підставляються сюди з урахуванням їх знаків: x_i , y_i – поточні координати точок траєкторії входу в правий поворот і відповідні їм радіуси кривизни; θ – кут повороту системи координат, в якій побудована траєкторія, відносно початкової системи координат $x y$; φ і α – поточний кут повороту корпуса трактора в системі $x_i y_i$ і відповідний йому курсовий кут; x_{oi} , y_{oi} – координати початку системи координат $x_i y_i$ (точка O_i) в системі координат $x O y$.

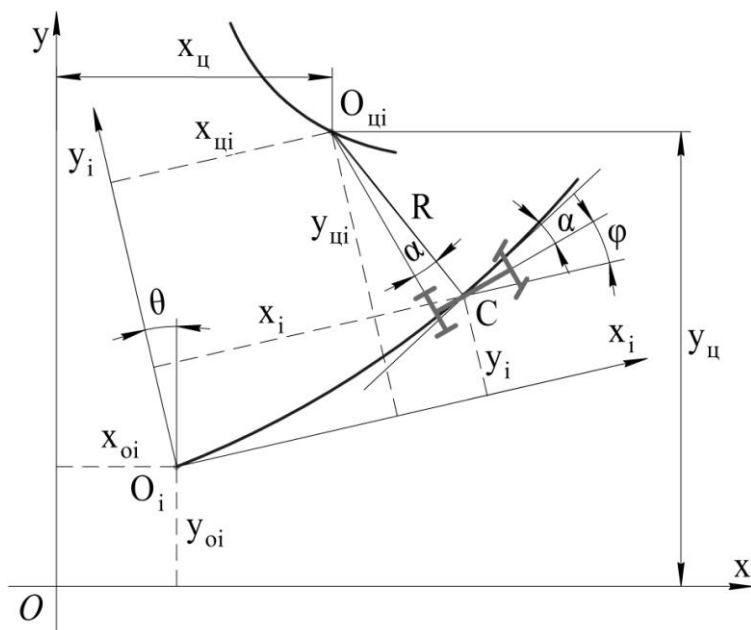


Рисунок 2.25 – До визначення координат лінії миттєвих центрів кривизни траєкторії входу в поворот

2.10.2. Визначення аналітичним способом координат центру кривизни. Визначити координати центра кривизни колової траєкторії можна також аналітичним способом. Для цього треба прирівняти нулю друге рівняння системи (2.44), що означає $y_c = 0$ (рис. 2.26) і знайти час t , який відповідає положенню миттєвого центра кривизни на осі Ox . Потім підставити знайдене значення t в перше рівняння системи (2.44) і визначити абсцису x_c .

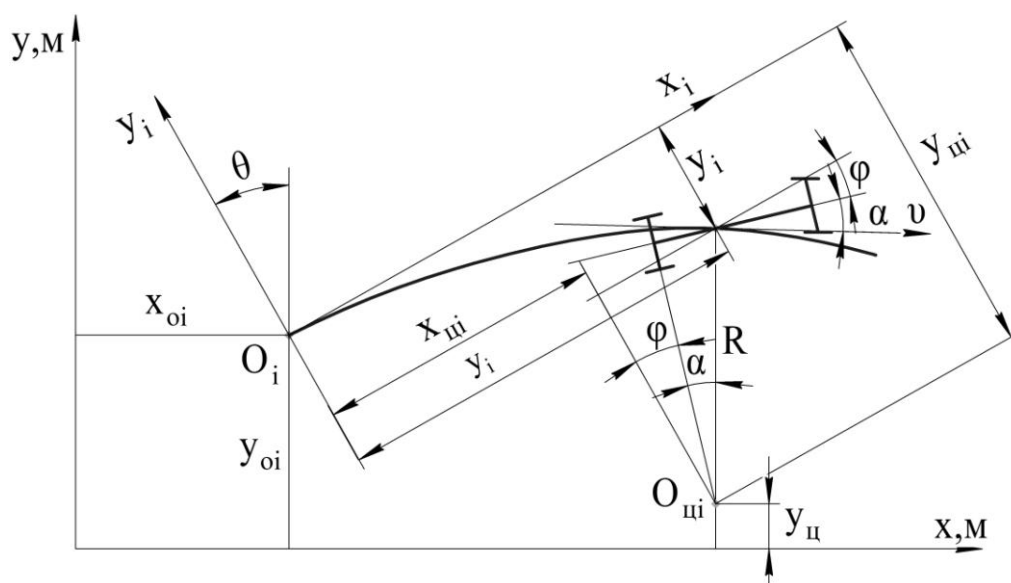


Рисунок. 2.26 – До визначення положення миттєвого центра кривизни колової траєкторії

2.10.3. Розрахунок виходу агрегату в точку за попередньо заданими координатами. При спряженні траєкторії входу в правий поворот з коловою траєкторією бажано забезпечити в кінці входу в правий поворот вихід в точку з наперед заданими координатами. У нашому випадку це координати $x_k = 7,95$ м і $y_k = 5,15$ м, при яких центр колової траєкторії буде знаходитися на осі Ox , чого потребує вимога симетрії розвороту. Для вирішення цієї задачі у загальному випадку необхідно підставити координати x_k і y_k у рівняння (2.38) і перерахувати поточні координати (x_i, y_i) довільної системи координат $x_i y_i$ у загальну систему координат $x y$ за формулами (2.43). В результаті отримаємо по відношенню до коефіцієнтів k два квадратні рівняння:

$$\begin{aligned} x_{oi} - x_k + \left(vt - \frac{1}{2} \alpha_o^2 vt - \frac{1}{2\ell} \alpha_o^2 v^2 t^2 - \frac{1}{6\ell^2} \alpha_o^2 v^3 t^3 \right) \cos \theta_i - \left(\alpha_o vt + \frac{1}{2\ell} \alpha_o v^2 t^2 \right) \sin \theta_i - \\ - \left[\left(\frac{1}{2} \alpha_o vt^2 + \frac{1}{3\ell} \alpha_o v^2 t^3 + \frac{1}{6\ell} \alpha_o v^2 t^3 + \frac{1}{8\ell^2} \alpha_o v^3 t^4 \right) \cos \theta_i + \left(\frac{1}{2} vt^2 + \frac{1}{6\ell} v^2 t^3 \right) \sin \theta_i \right] k_x - \\ - \left[\left(\frac{1}{6} vt^3 + \frac{1}{8\ell} v^2 t^4 + \frac{1}{40\ell^2} v^3 t^5 \right) \cos \theta_i \right] k_x^2 = 0; \end{aligned} \quad (2.45)$$

$$\begin{aligned} y_{oi} - y_k + \left(\alpha_o vt + \frac{1}{2\ell} \alpha_o v^2 t^2 \right) \cos \theta_i + \left(vt - \frac{1}{2} \alpha_o^2 vt - \frac{1}{2\ell} \alpha_o^2 v^2 t^2 - \frac{1}{6\ell^2} \alpha_o^2 v^3 t^3 \right) \sin \theta_i + \\ + \left[\left(\frac{1}{2} vt^2 + \frac{1}{6\ell} v^2 t^3 \right) \cos \theta_i - \left(\frac{1}{2} \alpha_o vt^2 + \frac{1}{3\ell} \alpha_o v^2 t^3 + \frac{1}{6\ell} \alpha_o v^2 t^3 + \frac{1}{8\ell^2} \alpha_o v^3 t^4 \right) \sin \theta_i \right] k_y - \\ - \left[\left(\frac{1}{6} vt^3 + \frac{1}{8\ell} v^2 t^4 + \frac{1}{40\ell^2} v^3 t^5 \right) \sin \theta_i \right] k_y^2 = 0, \end{aligned}$$

які можна записати у вигляді:

$$a_1 k_x^2 + b_1 k_x + c_1 = 0; \quad a_2 k_y^2 + b_2 k_y + c_2 = 0, \quad (2.46)$$

де $a_1 = -m \cos \theta_i$; $b_1 = -n \sin \theta_i - p \cos \theta_i$; $c_1 = x_{oi} - x_k + q \cos \theta_i - r \sin \theta_i$;

$a_2 = -m \cos \theta_i$; $b_2 = n \cos \theta_i - p \sin \theta_i$; $c_2 = y_{oi} - y_k - q \sin \theta_i + r \cos \theta_i$;

$$m = \frac{1}{6} vt^3 + \frac{1}{8\ell} v^2 t^4 + \frac{1}{40\ell^2} v^3 t^5 = \frac{1}{2} vt^3 \left[\frac{1}{3} + \frac{1}{4} vt \left(1 + \frac{vt}{5\ell^2} \right) \right];$$

$$n = \frac{1}{2} vt^2 + \frac{1}{6\ell} v^2 t^3 = \frac{1}{2} vt^2 \left(1 + \frac{vt}{3\ell} \right);$$

$$\begin{aligned}
p &= \frac{1}{2}\alpha_o vt^2 + \frac{1}{3\ell}\alpha_o v^2 t^3 + \frac{1}{6\ell}\alpha_o v^2 t^3 + \frac{1}{8\ell^2}\alpha_o v^3 t^4 = \\
&= \frac{1}{2}\alpha_o vt^2 + \frac{1}{2\ell}\alpha_o v^2 t^3 + \frac{1}{8\ell^2}\alpha_o v^3 t^4 = \frac{1}{2}\alpha_o vt^2 \left[1 + \frac{vt}{\ell} \left(1 + \frac{vt}{4\ell} \right) \right]; \\
q &= vt - \frac{1}{2}\alpha_o^2 vt - \frac{1}{2\ell}\alpha_o^2 v^2 t^2 - \frac{1}{6\ell^2}\alpha_o^2 v^3 t^3 = vt \left\{ 1 - \frac{\alpha_o}{2} \left[1 + \frac{\alpha_o}{\ell} vt \left(1 + \frac{vt}{3\ell} \right) \right] \right\}; \\
r &= \alpha_o vt + \frac{1}{2\ell}\alpha_o v^2 t^2 = \alpha_o vt \left(1 + \frac{1}{2\ell} vt \right).
\end{aligned}$$

З першого рівняння системи (2.46) знаходимо коефіцієнт k_x , який задовольняє рівнянню для абсциси x системи рівнянь (2.45) при всіх реальних значеннях параметра t , а з другого рівняння (2.46) отримаємо коефіцієнт k_y для ординати y системи (2.45). Далі треба знайти час t , при якому $k_x = k_y$.

При знаходженні коренів рівнянь (2.46) за допомогою рівнянь Вієта слід врахувати, що на ділянці входу в лівий поворот коефіцієнт k додатний, а на ділянці виходу з лівого повороту – від’ємний. Перше рівняння системи (2.46) дає коефіцієнт k_x , який задовольняє рівнянню абсциси x при всіх реальних значеннях параметра t , а з другого рівняння отримаємо коефіцієнт k_y для ординати y . Далі, треба знайти час t , при якому має місце рівність $k_x = k_y = k$.

Для розглянутого вище прикладу розрахунки згідно (46) дають: на ділянці входу в лівий поворот $k = 0,0396151 \text{ c}^{-1}$; $t = 3,954352 \text{ c}$, а на ділянці виходу з повороту $k = 0,02815 \text{ c}^{-1}$; $t = 4,0075 \text{ c}$. Результати розрахунків наведені в таблиці 2.13.

Запропонований метод розрахунку k і t використовується у випадках, коли треба вийти в кінці траєкторії на задані координати x_k і y_k , незалежно від інших параметрів траєкторії. Якщо ж відомі α_o , v , φ_k і час t , то коефіцієнт k можна знайти безпосередньо із залежності (2.36).

Кожна з розглянутих форм параметричних рівнянь траєкторії неусталеного руху колісної машини удосконалює попередню форму, яку також не слід відкидати,

тому що кожна з наведених форм має свої особливості. Рівняння (2.30), наприклад, надають можливість будувати траєкторії незалежно від швидкості руху, тобто побудована за цими рівняннями траєкторія при деяких значеннях α_o і k вірна для будь-якої швидкості v , якщо привести у відповідність до неї час руху t згідно (2.37). Рівняння (2.34) описують неусталений рух у природному вигляді – в функції часу. А рівняння (2.38) найпростіші у використанні і теж дозволяють виразити всі параметри руху в функції часу. Як видно з розглянутого прикладу, всі рівняння дають однаковий результат (таблиці 2.11 – 2.13). Однак існує необхідність в удосконаленні отриманих рівнянь, щоб спростити об'єм обчислюваної роботи під час теоретичного аналізу і дослідження конкретних траєкторій, наприклад, розворотів машино-тракторних агрегатів на полі або при плануванні руху машин в специфічних умовах, особливо при необхідності забезпечити дистанційне або автоматичне керування. В таблицях 2.11 – 2.13 наведені координати (в метрах) точок траєкторії входу в лівий поворот і виходу з повороту, визначені відповідно за рівняннями (2.30), (2.34) і (2.38).

Таблиця 2.11 – Результати розрахунків за рівняннями (2.30)

№ з/п	φ , рад.	t , с	Вхід: $\alpha_o = 2^\circ$, $\alpha_k = 17^\circ$, $k = 0,5$		Вихід: $\alpha_o = 17^\circ$, $\alpha_k = 2^\circ$, $k = -0,5$		x	y
			$x = x_1$	$y = y_1$	x_2	y_2		
1	0	0	0	0	0	0	3,7098	1,1823
2	0,0872	1,5090	1,5009	0,1381	0,2808	0,0944	3,9058	1,4044
3	0,1744	2,3310	2,3311	0,3241	0,6096	0,2220	4,1268	1,6793
4	0,2624	2,9009	2,8322	0,5278	1,0082	0,3986	4,3838	2,0315
5	0,3489	3,3337	3,2142	0,7408	1,5186	0,6544	4,6980	2,5081
6	0,4361	3,6857	3,4979	0,9596	2,2399	1,0607	5,1197	3,2205
7	0,5233	3,9802	3,7097	1,1823	3,5287	1,8742	5,8295	4,5692

Таблиця 2.12 – Результати розрахунків за рівняннями (2.34)

№ з/п	Вхід: $\alpha_o = 2^\circ$, $\alpha_k = 17^\circ$, $k = 0,5$			Вихід: $\alpha_o = 17^\circ$, $\alpha_k = 2^\circ$, $k = -0,5$			x	y
	t , с	$x = x_1$	$y = y_1$	t , с	x_2	y_2		
1	2	3	4	5	6	7	8	9

1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	0	0	0	0	0	3,7098	1,1823
2	1,5083	1,5009	0,1381	0,2958	0,2808	0,0944	3,9058	1,4044
3	2,3301	2,3011	0,3241	0,6478	0,6096	0,2220	4,1268	1,6793
4	2,8981	2,8322	0,5278	1,0824	1,0082	0,3986	4,3838	2,0315
5	3,3327	3,2142	0,7409	1,6504	1,5186	0,6544	4,6980	2,5081
6	3,6847	3,4979	0,9596	2,4722	2,2399	1,0607	5,1198	3,2205
7	3,9805	3,7097	1,1823	3,9805	3,5287	1,8742	5,8295	4,5692

Таблиця 2.13 – Результати розрахунків за рівняннями (2.38)

№ з/п	Вхід: $\alpha_o = 2^\circ$, $\alpha_\kappa = 10,97^\circ$, $k = 0,0396151 \text{ c}^{-1}$			Вихід: $\alpha_o = 10,97^\circ$, $\alpha_\kappa = 4,55^\circ$, $k = -0,02815 \text{ c}^{-1}$			x	y
	$t, \text{ c}$	$x = x_1$	$y = y_1$	$t, \text{ c}$	x_2	y_2		
1	0	0	0	0	0	0	3,7274	1,1797
2	1,5083	1,4986	0,1647	0,2958	0,2888	0,0643	3,9536	1,3704
3	2,33014	2,2935	0,3805	0,6478	0,6281	0,1600	4,2100	1,6123
4	2,89815	2,8236	0,5978	1,0824	1,0396	0,3052	4,5077	1,9315
5	3,3327	3,2111	0,8073	1,6504	1,5648	0,5358	4,8664	2,3791
6	3,6847	3,5099	1,0072	2,4722	2,2996	0,9413	5,3302	3,0788
7	3,9541	3,7274	1,1797	4,0059	3,5132	1,8722	6,0634	4,5119

На рисунку 2.27 показана графічна інтерпретація пошуку коефіцієнтів k і часу t , які відповідають виходу на обумовлені координати x_κ і y_κ в кінці кожного маневру.

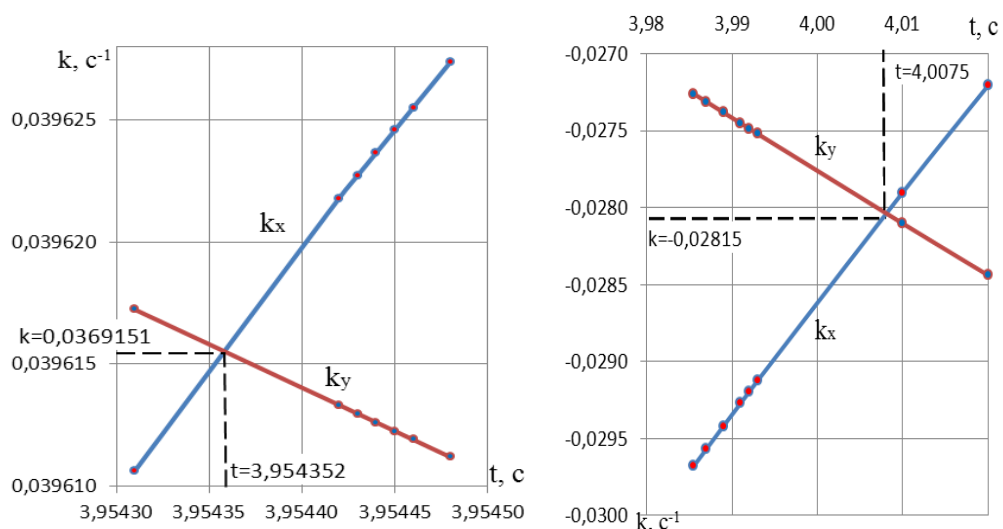


Рисунок 2.27 – До визначення k і t на ділянці входу в лівий поворот і на ділянці виходу з лівого повороту.

Лінії x_k і y_k є геометричними місцями значень коефіцієнта k у функції часу t , які дають шуканий результат. Слід зауважити, що графічне рішення не може забезпечити належну точність визначення цих параметрів, тому для вирішення задачі отримання заданих координат в кінці ділянки треба скористатися формулами (2.46). Метод послідовних наближень дає результат з будь-якою точністю.

2.11. Визначення кутової швидкості обертання корпусу машини в повороті.

2.11.1. Розрахунок динамічних диференціальних рівнянь руху. Запропонований метод інтегрування рівнянь неусталеного руху чотирьохколійної машини з метою отримання параметричних рівнянь траєкторії можна використати також і для вирішення динамічних задач криволінійного руху колісних машин.

На рисунку 2.1 представлена розрахункова схема чотирьохколійного повнопривідного трактора з передніми керованими колесами в момент руху по криволінійній траєкторії на горизонтальній поверхні, де: F_1 і F_2 – тягові сили переднього і заднього мостів; F_{on1} і F_{on2} – сили опору коченню коліс передньої і задньої осі, приведені до центрів мостів – точок A і B ; $F_{\delta 1}$ і $F_{\delta 2}$ – бокові сили передніх і задніх коліс; F_k – крюкова сила; M_{on} – момент опору повороту; v – швидкість руху центра мас C трактора, дотична до траєкторії руху; α – кут між вектором швидкості v і поздовжньою віссю трактора (курсний кут); φ – кут повороту корпусу трактора відносно осі Ox ; α_1 – середній кут повороту керованих коліс; $\alpha_{\delta 1}$ і $\alpha_{\delta 2}$ – кути ведення передніх і задніх коліс; γ – кут між віссю трактора і вектором крюкової сили в горизонтальній площині; R_T і R – теоретичний і дійсний радіуси повороту трактора; R_c – радіус кривизни траєкторії центра мас C .

Тоді динамічні рівняння руху в формі Даламбера будуть:

$$m \frac{dv_x}{dt} = F_1 \cos(\alpha_1 + \varphi) + F_2 \cos \varphi - F_{on1} \cos(\alpha_1 + \varphi) - F_{on2} \cos \varphi -$$

$$-F_{\delta_1} \sin(\alpha_1 - \varphi) - F_{\delta_2} \sin \varphi - F_{\kappa} \cos(\gamma - \varphi); \quad (2.46)$$

$$m \frac{dv_y}{dt} = F_1 \sin(\alpha_1 + \varphi) + F_2 \sin \varphi - F_{on_1} \sin(\alpha_1 + \varphi) - F_{on_2} \sin \varphi + \\ + F_{\delta_1} \cos(\alpha_1 - \varphi) + F_{\delta_2} \cos \varphi + F_{\kappa} \sin(\gamma - \varphi); \quad (2.47)$$

$$I \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = F_1 \ell_1 \sin \alpha_1 + F_{\delta_1} \ell_1 \cos \alpha_1 - F_{\delta_2} \ell - F_{on_1} \ell_1 \sin \alpha_1 - F_{\kappa} (\ell + \ell_{\kappa}) \sin \gamma - M_{on}. \quad (2.48)$$

Тут I – момент інерції маси трактора відносно осі, перпендикулярної до площини руху, яка проходить через центр C .

Основними змінними є кути φ і α_1 , а також час t і більшість зовнішніх сил, тому скористаємося методом, запропонованим в роботі [5], згідно якому диференціал dt можна виразити через $d\varphi$. У даному випадку елементарна дуга переміщення точки B відносно точки C буде: $dS = \ell d\varphi = \omega \ell dt$, звідки $dt = d\varphi / \omega$. Кут повороту керованих коліс представимо пропорційно змінним в залежності від кута φ : $\alpha_1 = \alpha_{o1} + k_{\alpha_1} \varphi$, де k_{α_1} – коефіцієнт інтенсивності зміни кута α_1 , який приймається в залежності від значень кута α_1 на початку і в кінці входу в поворот або виходу з повороту – відповідно, α_{o1} і $\alpha_{1\kappa}$, тобто $k_{\alpha_1} = (\alpha_{1\kappa} - \alpha_{o1}) / \varphi_{\Pi}$, де φ_{Π} – запланований кут повороту корпусу.

2.11.2. Отримання часткових виразів для кутової швидкості. Для отримання рівняння кутової швидкості треба згідно з рівнянням (2.46) взяти шість інтегралів. Перший інтеграл виражає складову кутової швидкості, яка залежить від тягової сили F_1 . У повнопривідних тракторів з блокованим приводом передній міст можна відключати, і тоді $F_1 = 0$. У загальному ж випадку F_1 і F_2 визначаються згідно з [6], але вони можуть змінюватися під час повороту або залишатися постійними, що залежить від керування двигуном. Припускаючи лінійну зміну сили F_1 від початкового значення до деякої величини в кінці повороту, маємо $F_1 = F_{o1} (1 + k_{F_1} \varphi)$, де k_{F_1} – коефіцієнт інтенсивності зміни сили F_1 під час повороту. Тригонометричні функції розкладаємо в ряди Маклорена, обмежуючись для синуса одним, а для

косинуса двома першими членами ряду. Тоді перший з шести інтегралів рівняння (2.46) буде:

$$1. I \frac{d\omega}{dt} = F_1 \ell_1 \sin \alpha_1; I \omega d\omega = F_1 \ell_1 \sin \alpha_1 d\varphi = F_{01} (1 + k_F \varphi) [\alpha_{01} + (1 + k_{\alpha 1}) \varphi] d\varphi;$$

$$\frac{I \omega_1^2}{2} = F_{01} \int_0^\varphi (1 + k_{F1} \varphi) [\alpha_{01} + (1 + k_{\alpha 1}) \varphi] d\varphi = F_{01} \int_0^\varphi (c_{01} + c_{11} \varphi + c_{21} \varphi^2) d\varphi,$$

де $c_{01} = \alpha_{01}$; $c_{11} = 1 + k_{\alpha 1} + \alpha_{01} k_{F1}$; $c_{21} = k_{F1} (1 + k_{\alpha 1})$.

$$\omega_1 = C_1 \sqrt{C_{01} \varphi + C_{11} \varphi^2 + C_{21} \varphi^3}, \text{ де } C_1 = \sqrt{\frac{2F_{01}}{I}}, C_{01} = c_{01}; C_{11} = \frac{c_{11}}{2}; C_{21} = \frac{c_{21}}{3}.$$

Сили опору коченню передніх і задніх коліс F_{on1} і F_{on2} , як незначні порівняно з тяговою силою і силою на крюку, приймаємо постійними. Тоді другий інтеграл, що враховує силу опору передніх коліс F_{on1} , буде:

$$2. I \frac{d\omega}{dt} = F_{on1} \ell_1 \sin \alpha_1, I \omega d\omega = F_{on1} \ell_1 \sin \alpha_1 d\varphi = F_{0n1} [\alpha_{01} + (1 + k_{\alpha 1}) \varphi] d\varphi.$$

$$\frac{I \omega_2^2}{2} = F_{0n1} \int_0^\varphi [\alpha_{01} + (1 + k_{\alpha 1}) \varphi] d\varphi = F_{0n1} \int_0^\varphi (c_{02} + c_{12} \varphi) d\varphi,$$

де $c_{02} = \alpha_{01}$; $c_{12} = 1 + k_{\alpha 1}$.

$$\omega_2 = C_2 \sqrt{C_{02} \varphi + C_{12} \varphi^2}, \text{ де } C_2 = \sqrt{\frac{2F_{on1}}{I}}, C_{02} = c_{02}; C_{12} = \frac{c_{12}}{2}.$$

Бокові сили зростають при збільшенні кута φ під час входу в поворот, тому приймаємо для бокової сили передніх коліс $F_{\delta 1} = F_{\delta 1o} (1 + k_{\delta 1} \varphi)$, де $k_{\delta 1}$ – коефіцієнт інтенсивності зміни бокової сили $F_{\delta 1}$, а для бокової сили задніх коліс $F_{\delta 2} = F_{\delta 2o} (1 + k_{\delta 2} \varphi)$, де $k_{\delta 2}$ – коефіцієнт інтенсивності зміни бокової сили $F_{\delta 2}$; $F_{\delta 1o}$ і $F_{\delta 2o}$ – значення бокових сил передніх і задніх коліс на початку входу в поворот. Тоді третій і четвертий інтеграли, які враховують бокові сили, будуть:

$$3. I \frac{d\omega}{dt} = F_{\delta 1} \ell_1 \cos \alpha_1;$$

$$I \omega d\omega = F_{\delta 1} \ell_1 \cos \alpha_1 d\varphi = F_{\delta 1o} (1 + k_{F\delta 1} \varphi) \left\{ 1 - \frac{1}{2} [\alpha_{01} + (1 + k_{\alpha 1}) \varphi]^2 \right\} d\varphi;$$

$$\begin{aligned} \frac{I\omega_3^2}{2} &= F_{\delta 1o} \int_0^{\varphi} (1 + k_{F\delta 1} \varphi) \left\{ 1 - \frac{1}{2} [\alpha_{o1} + (1 + k_{\alpha 1}) \varphi]^2 \right\} d\varphi = \\ &= F_{\delta 1o} \int_0^{\varphi} (c_{03} + c_{13} \varphi + c_{23} \varphi^2 + c_{33} \varphi^3) d\varphi, \end{aligned}$$

$$\text{де } c_{03} = 1 - \frac{\alpha_{o1}^2}{2}; \quad c_{13} = -\alpha_{o1}(1 + k_{\alpha 1}) + k_{F\delta 1} \left(1 - \frac{\alpha_{o1}^2}{2} \right);$$

$$c_{23} = -\frac{1}{2}(1 + k_{\alpha 1})^2 - \alpha_{o1} k_{F\delta 1} (1 + k_{\alpha 1}); \quad c_{33} = -\frac{k_{F\delta 1}}{2} (1 + k_{\alpha 1})^2.$$

$$\omega_3 = C_3 \sqrt{C_{03} \varphi + C_{13} \varphi^2 + C_{23} \varphi^3 + C_{33} \varphi^4},$$

$$\text{де } C_3 = \sqrt{\frac{2F_{\delta 1o}}{I}}, \quad C_{03} = c_{03}; \quad C_{13} = \frac{c_{13}}{2}; \quad C_{23} = \frac{c_{23}}{3}; \quad C_{33} = \frac{c_{33}}{4}.$$

$$4. \quad I \frac{d\omega}{dt} = F_{\delta 2} \ell_2; \quad I\omega d\omega = F_{\delta 2} \ell_2 d\varphi = F_{\delta 2o} \ell_2 (1 + k_{F\delta 2} \varphi) d\varphi.$$

$$\frac{I\omega^2}{2} = F_{\delta 2o} \ell_2 \int_0^{\varphi} (1 + k_{F\delta 2} \varphi) d\varphi = F_{\delta 2o} \ell_2 (c_{04} \varphi + c_{14} \varphi^2), \quad \text{де } c_{04} = 1; \quad c_{14} = \frac{k_{F\delta 2}}{2}.$$

$$\omega_4 = C_4 \sqrt{C_{04} \varphi + C_{14} \varphi^2}, \quad \text{де } C_4 = \sqrt{\frac{2F_{\delta 2o}}{I}}, \quad C_{04} = c_{04}; \quad C_{14} = \frac{c_{14}}{2}.$$

П'ятий інтеграл вихідного диференціального рівняння (2.46) враховує вплив на кутову швидкість крюкової сили F_{κ} , яку теж можна прийняти постійною, або рівною нулю, а кут між вектором цієї сили і віссю трактора γ лінійно змінним в залежності від кута φ від початкового значення γ_o при вході в поворот до його значення в кінці повороту, тобто $\gamma = \gamma_o + k_{\gamma} \varphi$, де k_{γ} – коефіцієнт інтенсивності зміни кута γ . В результаті отримаємо:

$$5. \quad I \frac{d\omega}{dt} = F_{\kappa} (\ell_2 + \ell_{\kappa}) \sin \gamma; \quad I\omega d\omega = F_{\kappa} (\ell_2 + \ell_{\kappa}) \sin \gamma d\varphi = F_{\kappa} [\gamma_o + (1 + k_{\gamma}) \varphi] d\varphi.$$

$$\frac{I\omega^5}{2} = F_{\kappa} \int_0^{\varphi} [\gamma_o + (1 + k_{\gamma}) \varphi] d\varphi = F_{\kappa} \int_0^{\varphi} (c_{05} \varphi + c_{15} \varphi^2) d\varphi,$$

$$\text{де } c_{05} = \gamma_o; \quad c_{15} = (1 + k_{\gamma}).$$

$$\omega_{35} = C_5 \sqrt{C_{05}\varphi + C_{15}\varphi^2}, \text{ де } C_5 = \sqrt{\frac{2F_k}{I}}, C_{05} = c_{05}; C_{15} = \frac{c_{15}}{2}.$$

6. Приймаючи момент опору повороту постійним, знаходимо останній інтеграл:

$$I \frac{d\omega}{dt} = M_{on}; I\omega d\omega = M_{on}d\varphi; \frac{I\omega^2}{2} = M_{on}\varphi; \omega_6 = C_6\sqrt{\varphi}, \text{ де } C_6 = \sqrt{\frac{2M_{on}}{I}}.$$

2.11.3. Розрахунок повної кутової швидкості обертання корпусу трактора.

Повна кутова швидкість корпусу трактора: $\omega = \sum_{i=1}^6 \omega_i$.

Для визначення залежності кута повороту в функції часу необхідно розділити змінні у вигляді співвідношення: $dt = d\varphi / \omega$, в результаті отримуємо: $t = \int_0^{\varphi} \frac{d\varphi}{\sum_{i=1}^6 \omega_i}$.

Рішення цього інтегралу в квадратурах отримати неможливо. Можна скористатися чисельними методами. На початку входу в поворот ($\varphi = 0$) кутова швидкість $\omega_0 = 0$, якщо $\alpha_0 = 0$, що має місце у випадку, коли перехід від прямолінійного руху до входу в поворот здійснюється без зупинки машини. Остання точка прямої траєкторії є першою точкою криволінійної ділянки; у цій точці має місце невизначеність її координат, якщо прийняти $\alpha_0 = 0$, тому приймається фіктивне значення $\alpha_0 \neq 0$, максимально наближене до нуля. Наприклад, при $\alpha_0 = 1^\circ = 0,0175$ рад радіус кривизни траєкторії для трактора МТЗ-80 буде $R = \ell / \alpha = 0,93 / 0,0175 = 53$ м, кутова швидкість при $v = 2$ м/с буде $\omega_0 = 0,04$ с⁻¹, тобто практично дорівнює нулю. Якщо ж вхід в поворот починається після зупинки машини, то в цьому випадку $\omega_0 = 0$ при будь-якому значенні кута α_0 .

Подвійне інтегрування перших двох диференціальних рівнянь Даламбера (2.46, 2.47) дає параметричні рівняння траєкторії неусталеного криволінійного руху машини, отримані раніше кінематичним шляхом.

Отримані рівняння для чотирьохколісної машини дозволяють прискорити вирішення багатьох задач агропромислового виробництва, а саме:

- виконувати аналіз розворотів МТА під час обробки поля і вибирати оптимальні параметри траєкторій;
- скласти програми повної автоматизації управління рухом машин без участі водія;
- скорочувати непродуктивні витрати потужності на розвороти;
- зменшувати додаткові витрати на приведення у належний стан ділянок землі, на яких виконуються розвороти МТА.

Висновки по розділу 2.

Розроблено аналітичний спосіб отримання рівнянь в параметричній формі двовісних колісних машин. 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 машини.

Розроблено спосіб рішення інтегральних рівнянь для координат траєкторії, який полягає в розкладанні підінтегральних функцій в ряди Маклорена. Це дозволяє знайти вирішення з будь-якою точністю в залежності від прийнятої кількості членів ряду. Розроблено також метод вирішення інтегралів у канонічній формі. Метод було використано також для вирішення диференціальних рівнянь Даламбера з метою знаходження функцій зміни лінійної швидкості центра мас машини і кутової швидкості обертання її корпусу в горизонтальній площині з урахуванням всіх сил, що діють на МТА.

Отримані рівняння в аналітичній формі для колового руху центра мас машини і метод спряження в єдиній системі координат будь-якої послідовності можливих маневрів.

Обґрунтована відповідність отриманих рівнянь для всіх можливих ділянок несталого руху машини: 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.

Для створення складних траєкторій запропонована програма Microsoft Excel, яка дозволяє виконувати відповідні розрахунки з одночасним зображенням графіків руху.

Вирішені задачі виходу на попередньо задані координати центра мас машини в кінці розглядуваного маневру та отримання центра кривизни колової траєкторії у заданій точці після її спряження з попередньою ділянкою.

Адекватність розробленої математичної моделі для всіх можливих ділянок несталого руху машин необхідно перевірити за допомогою автоматичної системи водіння з використанням супутникової системи та на прикладі траєкторії повного розвороту агрегату New Holland T8050 з бороною Соломія БШН-17 в польових умовах.

Найбільш проблемними участками в отриманих рівняннях для всіх можливих ділянках руху машини є вхід в лівий та правий повороти, а також вихід з них в установлені межах, що відповідає реальним кутам повороту керованих коліс з відповідним значенням курсового кута. Тому виникає необхідність підтвердити дані рівняння на адекватність шляхом проведення експериментальних досліджень визначення траєкторій руху агрегату при певних значеннях вихідних параметрів: швидкості руху по криволінійній траєкторії v , мінімальному радіусу повороту R , відстані від центра мас C до задньої осі ℓ , курсового кута α .

Графоаналітичними методами побудовані траєкторії колового руху і криволінійного руху на прикладі трактора МТЗ-80, закономірності яких були використані при подальших розробках аналітичних рівнянь траєкторії як колового, так і несталого руху чотирьохколісної машини з передніми керованими колесами.

Доведена придатність аналітичних рівнянь для отримання траєкторій з урахуванням явища відведення коліс під дією бічних сил під час криволінійного руху машини.

Розроблено метод аналітичного вирішення диференціальних рівнянь криволінійного руху чотирьохколісної машини для визначення закономірностей зміни кутової швидкості і кута повороту корпусу трактора під час повороту із змінним положенням керма. Отримані рівняння дозволяють виконувати аналіз

залежностей кутової швидкості і кута повороту МТА від різних силових факторів і конструктивних параметрів трактора.

Рівняння криволінійного руху отримані в трьох формах, які були послідовними етапами при вирішенні цієї задачі. Кожне рівняння – це ступінь для подальшого пошуку і кожне з них має свої переваги і, звичайно, недоліки. Останнє рішення, а саме, універсальні рівняння траєкторії неусталеного руху, слід вважати найбільш придатними для практичного використання, що необхідно перевірити в польових умовах з використанням трактора.

Виконаний об'єм досліджень на базі отриманих рівнянь криволінійного руху машини показує, 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 виконуються 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.

В теорії обґрунтовані складні маневри на прикладі трактора МТЗ-80 та культиватора КРН-4,2 на розворотній полосі, що в подальшому потребує практичного підтвердження адекватності маневру в польових умовах.

Список використаних джерел.

1. 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
2. Гуськов В.В., Велев Н.Н., Атаманов Ю.Е., Бочаров Н.Ф., Ксенович И.П., Солонский А.С. Тракторы. Теория. Учебник для студентов вузов по спец. “Автомобили и тракторы”, – М.: “Машиностроение”, 1988, 376 с.
3. Татьянченко Б.Я. Результаты аналитического исследования траектории криволинейного движения четырехколесных машин / [Б.Я. Татьянченко, Ю.В. Сиренко]. // Сборник научных статей международной научно-практической конференции «Техническое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве». – Минск. – 2017.
4. Графічний спосіб вивчення траєкторії криволінійного руху чотирьохколісного трактора з передніми керованими колесами // М.Я. Довжик, Б.Я. Татьянченко, О. О. Соларьов // Інженерія природокористування. – Харків: ХНТУСГ, 2016. - №1(5). – С. 6-9.
5. Аналітичний спосіб визначення траєкторії криволінійного руху чотирьохколісної машини з передніми керованими колесами // М.Я. Довжик, Б.Я. Татьянченко, О. О. Соларьов, Ю. В. Сіренко // Інженерія природокористування. – Харків: ХНТУСГ, 2017. - №1(7). – С. 64-73.
6. Універсальні рівняння траєкторії криволінійного руху чотирьохколісної машини // Довжик М. Я., Татьянченко Б. Я., Соларьов О. О., Сіренко Ю.В. // Вісник Житомирського національного агроекологічного університету. ЖНАЕУ. – 2017. – № 1(58), т. 1 – с. 202-211.
7. Канонічні рівняння для рішення інтегралів руху / Б.Я. Татьянченко, // Збірник тез доповідей міжнародної конференції «Технології 21 століття». – Одеса, 2016. – № 22. – С. 12 - 12.
8. Рівняння швидкості криволінійного руху колісного трактора // Мельник В. І., Довжик М. Я., Татьянченко Б. Я., Соларьов О. О., Сіренко Ю. В. // Вісник СНАУ,

серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів», ВИПУСК 10/2 (30), 2016, с. 7-15.

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

10. Три рівняння траєкторії неусталеного руху колісної машини. Стратегія качества в промышленности и образовании. Б. Я. Татяанченко, Ю. В. Сіренко Материалы 14 международной конференции. – Варна, Болгария, 2018, Том 1, С. 118-124.

11. 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/10.15587/1729-4061.2017.101335>

РОЗДІЛ 3

ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ ПЕРЕВІРКИ АДЕКВАТНОСТІ РОЗРОБЛЕНОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ

Методика проведення експериментальної частина дисертації включає чотири види етапів проведення досліджень [1-8]:

1. проведення дослідів в лабораторних умовах з метою перевірки вірності отриманих теоретичних розробок;
2. проведення випробувань в польових умовах з урахуванням реальних умов поворотів і розворотів трактора;
3. проведення експериментальних випробувань на чотирьохколійній машині з використання супутникової навігаційної системи;
4. проведення експериментальних випробувань МТА в польових умовах роботи на сільськогосподарських угіддях.

3.1. Методика проведення дослідів в лабораторних умовах.

Мета лабораторних досліджень: математична підтвердження вірності отриманих рівнянь криволінійного руху трактора, за допомогою Microsoft Excel.

Для проведення дослідів в лабораторних умовах необхідно визначитися з видом повороту, розкласти на складові ділянки розвороту та задатись для кожної ділянки траєкторії розвороту вихідними даними. Для прикладу розглянемо петлевий розворот трактора МТЗ-80 з культиватором-рослинопідживлювачем КРН-4,2.

Повний розворот складається з наступних елементів-маневрів (рис. 3.1): вхід в лівий поворот, вихід з лівого повороту, вхід в правий поворот, колова траєкторія (правий поворот), вихід з правого повороту, вхід в лівий поворот, вихід з лівого повороту.

3.1.1. Методика моделювання петлевидного розвороту трактора МТЗ-80 з культиватором-рослинопідживлювачем КРН-4,2 та визначення вихідних параметрів.

Для прикладу було розглянуто петлевидний розворот трактора МТЗ-80 з культиватором-рослинопідживлювачем КРН-4,2 з шириною захвату $2a = 4,2$ м і мінімальним радіусом повороту $R_{\min} = 5,2$ м. Швидкість руху по криволінійній траєкторії $v = 5 \dots 10$ км/год $\approx 1,3 \dots 2,6$ м/с. Це один з розворотів з великою довжиною траєкторії, що потребує значних розмірів розвортної полоси (до 12 м).

Мета дослідження: за рахунок реалізації оптимальних за витратою часу кінематичних режимів руху і параметрів траєкторії визначити мінімально можливий час розвороту і у такий спосіб збільшити продуктивність агрегата в залежності від довжини робочого гону.

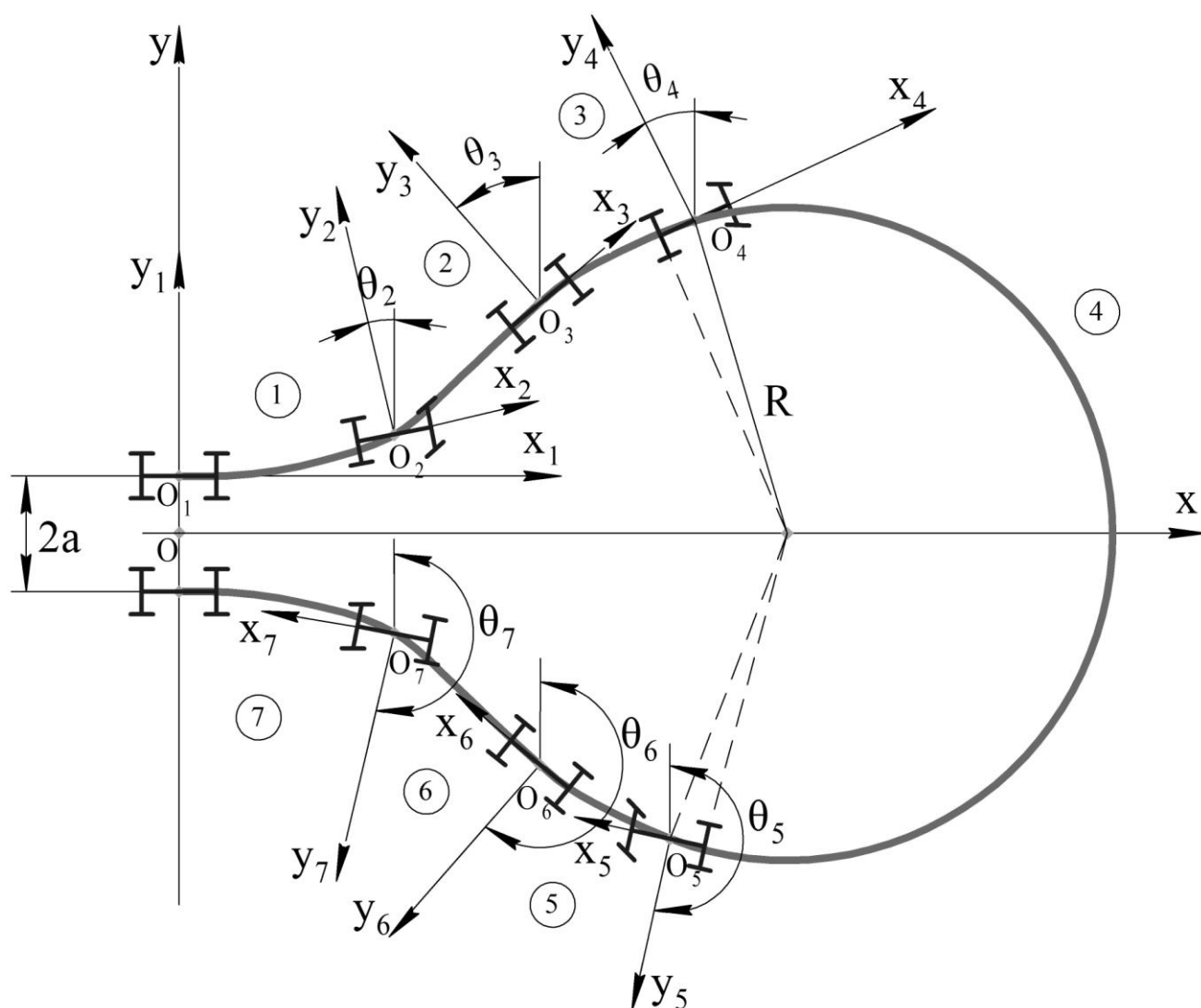


Рисунок 3.1 – Ділянки петлевидного розвороту трактора МТЗ-80 з культиватором КРН-4,2.

Приймаємо загальні для всіх ділянок вихідні дані: $v = 1,3$ м/с; $\ell = 0,93$ м; $R_{\min} = 5,2$ м; шлях $S = vt$.

Далі визначаємо вихідні дані для кожної ділянки траєкторії грушовидного розвороту. Приймаємо: початкове значення курсового кута $\alpha_0 = 0$, час входу в поворот t , с (задається), кінцеве значення курсового кута, розраховуємо за формулою $\alpha_k = \ell / R_{\min}$, коефіцієнт інтенсивності зміни курсового кута: $k = \alpha_k / t$, кінцеве значення повороту корпусу трактора визначаємо за формулою:

$$\varphi_k = (v/\ell)(\alpha_0 t + (1/2)kt^2).$$

Далі поділяємо час входу в поворот t на інтервали, обчислюємо за формулами (2.37) для кожного значення t координати x_i і y_i в системі координат $x_1 y_1$ і відповідні їм значення кутів α і φ за формулами (2.35), а також зведені до загальної системи координат $x y$ координати x і y за формулами (2.41). В результаті алгоритму ми отримуємо 7 ділянок з вихідними даними, в результаті спряженні яких отримуємо повний грушоподібний розворот трактора.

1. Вхід в лівий поворот: $\alpha_0 = 0$, $t = 2,2$ с, $\alpha_k = 0,93/5,2 = 0,1788$ рад = $10,25^\circ$, $\varphi_k = 0,275$ рад = $15,76^\circ$, $\theta_1 = 0$, $k = 0,179/2,2 = 0,08129$ с⁻¹.
2. Вихід з лівого повороту: $\alpha_0 = 0,1788$ рад = $10,25^\circ$, $\alpha_k = 0$, $t = 2,2$ с, $k = (0 - 0,179)/2,2 = -0,08129$ с⁻¹, $\varphi_{k2} = 0,275$ рад = $15,76^\circ$, $\theta_2 = \varphi_{k1} = 15,76^\circ$.
3. Вхід в правий поворот: $\alpha_0 = 0$, $k = -0,08129$ с⁻¹, $t = 2,0$ с; $\alpha_k = \alpha_0 + kt = 0 - 0,08129 \cdot 2,2 = -0,1788$ рад = $-10,25^\circ$, $\varphi_{k3} = -15,76^\circ$, $\theta_3 = \theta_2 + \varphi_2 = 15,76 + 15,76 = 31,52^\circ$.
4. Правий поворот (колова траєкторія): $\alpha_k = \alpha_0 = -0,1788$ рад = $-10,25^\circ$; $k = 0$; $t = 14,77$ с; $\varphi_k = -211,67^\circ$; $\theta_4 = \theta_3 + \varphi_3 = 31,52 - 15,76 = 15,76^\circ$.
5. Вихід з правого повороту: $\alpha_0 = -0,1788$ рад = $-10,25^\circ$; $\alpha_k = 0$; $t = 2,2$ с. $k = 0,08129$ с⁻¹; $\theta_5 = \theta_4 + \varphi_4 = 15,76 - 211,53 = -196,05^\circ$.

6. Вхід в лівий поворот: $\alpha_o = 0$, $\alpha_k = 0,1788$ рад = $10,25^\circ$, $t = 2,2$ с,
 $k = -0,08129$ с⁻¹, $\theta_6 = \theta_5 + \varphi_5 = -15,76 - 196,05 = -211,815^\circ$.

7. Вихід з лівого повороту: $\alpha_o = 0,1788$ рад = $10,25^\circ$,
 $\alpha_k = 0,1788 - 0,08129 \cdot 0,75 = -0,1178$ рад = $-6,75^\circ$, $k = (0 - 0,179)/2,2 = -0,08129$ с⁻¹
 $t = 2,2$ с., $\theta_7 = \theta_6 + \varphi_6 = 15,76 - 211,815 = -196,05^\circ$.

Після спряження всіх ділянок за допомогою Microsoft Excel отримаємо загальну траєкторію петлевидного розвороту трактора МТЗ-80 з культиватором КРН-4,2, побудовану з урахуванням усіх вимог, поставлених умовами задачі. Також отримаємо довжину повного шляху розвороту S , м та повний час, витрачений на розворот t , с.

3.1.2. Вибір та обґрунтування оптимальної траєкторії петлевидного розвороту трактора МТЗ-80 з культиватором КРН-4,2. Після визначення та побудови повного розвороту за допомогою Microsoft Excel, ми визначаємо оптимальну траєкторію розвороту, використовуючи аналітичні рівняння криволінійного руху (2.38) будуюмо декілька траєкторій з різними вихідними даними і підтверджуємо вибір оптимальної траєкторії розвороту.

3.2. Методика проведення польовий експерименту для відтворення теоретичної траєкторії на тракторі МТЗ-80 на дослідних полях Сумського НАУ.

Програма досліджень передбачає аналіз факторів-параметрів криволінійної траєкторії за такими показниками як довжина шляху, кут повороту корпуса трактора, радіус кривизни та інші.

Для виконання поставленої задачі були використані відповідні методики і стандарти, на базі яких визначена кількість дослідів для отримання необхідного рівня похибок під час проведення експерименту.

В якості енергетичного засобу, за допомогою якого будуть проведені досліди для відтворення теоретичної траєкторії, трактор МТЗ-80 з технічними характеристиками (додаток А).

Підготовка до експериментальних досліджень складається з наступних заходів і попередніх робіт:

- вибір рівної горизонтальної ділянки необхідних розмірів в залежності від форми і довжини очікуваної траєкторії (для проведення експерименту повинна бути вибрана дослідна ділянка з кутом нахилу площини не більше 2°);

- розмітка координатної сітки з прямолінійною ділянкою для набору необхідної швидкості і визначенням початку входу в поворот;

- прогрів і попередня обкатка трактора,

- установка на ньому пристосування і приладів, що забезпечують окреслення траєкторії саме його центра ваги;

- зовнішній огляд, перевірка комплектності, гідросистеми і двигуна;

- підготовка і перевірка вимірювальних приладів, інструмента та обладнання;

- забезпечення необхідної швидкості руху і рівномірності обертання керованих коліс під час входу в поворот і виходу з повороту;

- визначення, необхідних для відтворення траєкторії, розрахункових характеристик і параметрів: кута повороту корпусу в кінці входу в поворот і в кінці виходу з повороту, коефіцієнтів інтенсивності зміни курсового кута, кінцевих координат центра ваги трактора.

Трактор, обладнаний пристосуванням для відбитку траєкторії його центра ваги на землі (рис. 3.2), а також приладами для фіксування окремих точок траєкторій і пристроями для забезпечення необхідної швидкості обертання керма. Для відтворення траєкторій був використаний лазерний далекомір Bosch GLM 250 VF Professional (рис. 3.3), призначений для вимірювання відстаней, довжин, висот, віддалень і розрахунків площин та об'ємів. Вимірювальний прилад призначений для роботи в середині приміщень і на відкритому повітрі.



Рисунок 3.2 – Маркер для відтворення траєкторії центра ваги на землі



Рисунок 3.3 – Вимірювальний прилад лазерний далекомір
Bosch GLM 250 VF Professional

3.2.1. Методика проведення дослідів в польових умовах і виконання вимірів. На початку дослідів тракторист за сигналом оператора включає необхідну передачу і набирає необхідну швидкість на прямолінійній ділянці, підтримуючи задану швидкість до кінця запланованого маневру. Під час входу в поворот і виходу з повороту, з метою забезпечення запланованої інтенсивності повороту та повороту керма відповідно заданому курсовому куту, кермо трактора обертається рівномірно і з необхідною швидкістю. Для цього узгоджується відповідність стрілки, закріпленої на кермі, з позначкою 0° на шкалі відповідно спеціально виготовленому коловому циферблаті градусів, прикріпленому до нерухомої частини рульової колонки. Тому для відпрацювання і отримання необхідних навичок повинні бути проведені попередні тренування водія.

Задача польових експериментальних досліджень – визначення характеристик, необхідних для моделювання процесу криволінійного руху. Координати центра ваги трактора визначаються на платформних важелях при повній заправці паливом. Після проходження залікової ділянки збирається інформація по швидкості руху трактора, радіусу повороту, кутах повороту коліс і корпусу. Для того, щоб виконувався закон зміни у часі кутів повороту керованих коліс, проводяться пробні заїзди. Кінематичні параметри траєкторії руху кінематичного центра (координати, кути, радіуси) визначалися після відтворення траєкторії за допомогою спеціального маркера. Установка маркера показана на фотографії (рис. 3.2). Час руху фіксується секундоміром. Під час руху маркер описує дійсну траєкторію, яка відповідає траєкторії руху кінематичного центра. На окреслену траєкторію встановлюються вертикально через деякі інтервали (в залежності від необхідної точності результату) спеціальні віхи (рис. 3.5) і за допомогою теодоліта Т30 (рис. 3.4) з оптичним далекоміром, встановленого в деякій точці O_T з ординатою y_T визначаються відстані від теодоліта до вішок ℓ_i , ρ_i , а також кути між радіусами-векторами сусідніх вішок η_i і кути атаки Φ_i (рис. 3.5). При цьому оптичний приціл далекоміра націлюється на нижню точку вішки.



Рисунок 3.4 – Визначення положення вішок за допомогою теодоліта Т30

Перерахунок полярних координат у декартову систему, в якій були отримані рівняння криволінійного руху, виконуються за формулами:

$$x_i = \rho_i \cos\left(\frac{\pi}{2} - \eta_i\right) = \rho_i \sin \eta_i; \quad (3.1)$$

$$y_i = \rho_o - \rho_i \sin\left(\frac{\pi}{2} - \eta_i\right) = \rho_o - \rho_i \cos \eta_i; \quad (3.2)$$

$$\rho_o = \overline{OO_T}; \quad \rho_i = \sqrt{\ell_i^2 - H^2}, \quad (3.3)$$

де H – висота оптичного прицілу над рівнем землі.

Координати точок-вішок замірялися також шляхом безпосереднього визначення відстаней від точки до осей координат за допомогою лазерного далекоміра. Але дійсна траєкторія руху кінематичного центра, побудована за допомогою теодоліта, визначається з великою точністю.

Дійсна середня швидкість руху трактора

$$v_\partial = \frac{S}{t}, \quad (3.4)$$

де S – довжина траєкторії, t – час руху.

3.2.2. Методика проведення статистичної оцінки експериментальних лабораторних даних. Для розмітки осей координат на дослідній площадці у довільній точці O_T (рис. 3.5) встановлюється теодоліт ТЗ0 і на деякій відстані ρ_o від нього – вішка, яка визначає початок координат O . Початковий радіус-вектор ρ_o обирається у 2-3 рази більшим від очікуваної максимальної ординати в кінці досліджуваної траєкторії. Під прямим кутом до осі Oy за допомогою теодоліта виставляється ще одна вішка, яка визначила ось Ox . Прямолінійний відрізок OO_1 довжиною 8...10 м, призначений для розгону трактора і стабілізації руху.

На початку досліду визначається і розраховуються вихідні дані траєкторії: швидкість v , час входу в поворот і час виходу з повороту t , кут повороту корпусу машини φ_k в кінці кожного маневру і коефіцієнт інтенсивності зміни курсового кута α . Далі визначається кут повороту керма β , який забезпечить відтворення саме цих параметрів. Для цього по кінцевому і початковому значеннях курсового кута α_k і α_o спочатку визначається максимальний середній кут повороту керованих коліс:

$$\alpha_{1\max} = \frac{L}{\ell_2} \alpha_k, \quad (3.5)$$

а потім через кінематичне передаточне число системи керування трактора, яке дорівнює відношенню кута повороту керованих коліс до кута повороту керма ($j = \beta / \alpha_{1k}$), знаходиться необхідний кут повороту керма:

$$\alpha_{1k} = \frac{L_i}{\ell_2} \alpha_k. \quad (3.6)$$

Для трактора моделі МТЗ-80 передаточне число між черв'яком і косозубим сектором механізму керування $j = 17,5$. При такому великому значенні передаточного числа вплив трапеції на нерівномірність відношення кутів повороту керованих коліс і керма незначний, тому це відношення можна прийняти постійним. Таким чином, рівномірне обертання керованих коліс в горизонтальній площині забезпечується рівномірним обертанням керма.

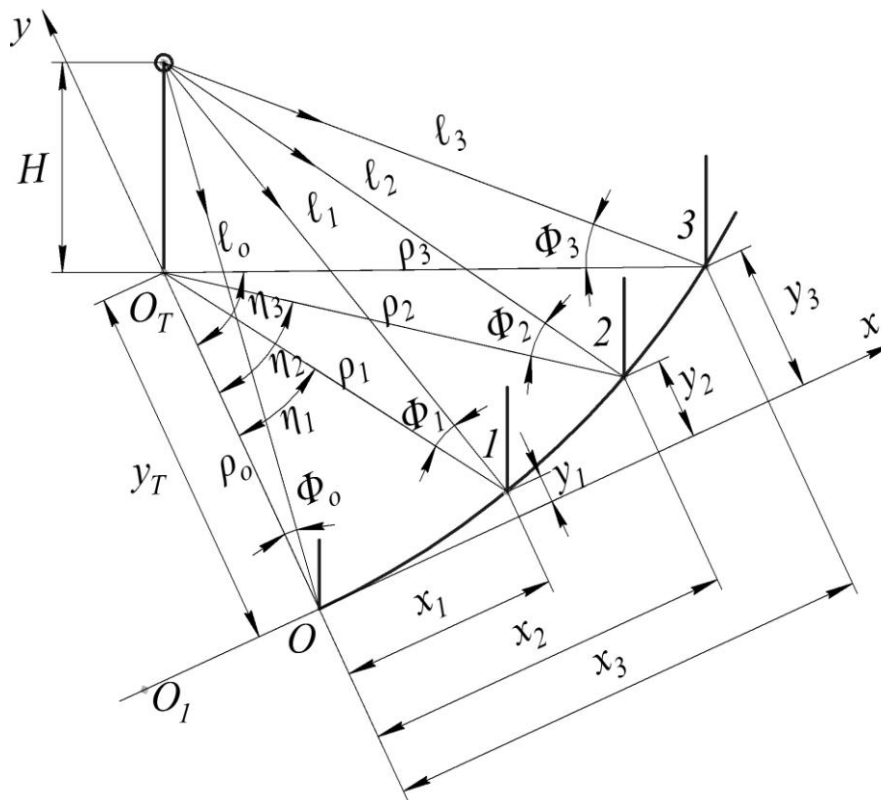


Рисунок 3.5 – До визначення координат точок відтвореної траєкторії

Координати точок траєкторії x_i і y_i необов'язково повинні співпадати з теоретичними, тому що вішки встановлюються довільно розподіленими по траєкторії, тому оцінку сходимості теоретичних і експериментальних результатів можна оцінити або через теорію похибок або побудовою траєкторії в однаковому масштабі.

Експеримент на цьому етапі полягає в тому, щоб відтворити траєкторію на землі і порівняти її з теоретичною траєкторією. Із рівнянь траєкторії видно, що вона визначається лише двома вхідними параметрами: швидкістю v і коефіцієнтом інтенсивності зміни курсового кута k . При відтворенні траєкторії треба дотримуватися саме цих величин, але на цей раз вони використовуються не при підрахунку координат x і y , а здійснюються водієм або спеціальними приладами під час руху трактора за описаною вище методикою. Таким чином, отримуємо дві траєкторії: теоретична і практична. Цього достатньо щоб оцінити ідентичність теоретичної і відтвореної траєкторій. Слід відмітити, щоб швидкість v можна й змінювати під час руху, але при цьому необхідно пропорційно змінювати і

коефіцієнт k , який по суті є кутовою швидкістю обертання керованих коліс в горизонтальній площині і відповідною кутовою швидкістю обертання керма.

3.3. Методика використання супутникової навігаційної системи при відтворенні траєкторії повороту на чотирьохколісній машині з передніми керованими колесами.

Для відтворення траєкторій входу в лівий (правий) поворот і виходу з лівого (правого) повороту чотирьохколісної машини з передніми керованими колесами використовується супутникова навігаційна система.

Для проведення експериментів з супутниковою навігаційною системою використаний автомобіль Renault Logan (рис. 3.6) з передніми керованими колесами.

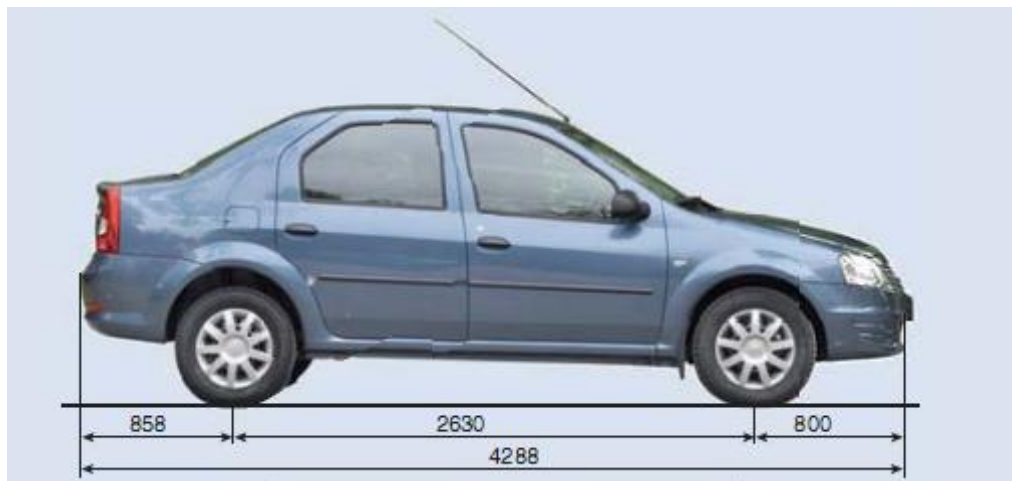


Рисунок 3.6 – Габаритні розміри Renault Logan.

3.3.1. Визначення вихідних параметрів ділянок траєкторії розвороту для чотирьохколісної машини.

Вхід в лівий поворот і вихід з лівого повороту.

Вхід в лівий поворот. Вихідні дані: $v = 1,472$ м/с; $\ell = 1,27$ м; $L = 2,63$ м; $R_{\min} = 5,0$; шлях $S = vt$. Виходячи з запланованого кута обертання керма $\gamma = 180^\circ$, і передаточного числа між черв'яком і косозубим сектором механізму керування $j = 25$, знаходимо кінцеве значення кута повороту передніх коліс $\alpha_{1\text{колiс}} = 180^\circ / 25 = 7,2^\circ = 0,1256$ рад. Значення курсового кута на початку і в кінці

ділянки: $\alpha_o = 0$, $\alpha_\kappa = \alpha_1(\ell/L) = 0,1256 \cdot (1,27/2,63) = 0,0606$ рад = $3,47^\circ$, $t = 12,1$ с,
 $k = (\alpha_\kappa - \alpha_o)/t = 0,0606/12,1 = 0,00501$ с⁻¹, $\theta_1 = 0$.

Вихід з лівого повороту. $\alpha_o = 0,0606$ рад = $3,47^\circ$, $\alpha_\kappa = 0$, час виходу з повороту $t = 12,1$ с, $k = (0 - 0,0607)/12,1 = -0,00501$ с⁻¹, $\theta_2 = \varphi_{\kappa 1} = 24,38^\circ$.

Вхід в правий поворот і вихід з правого повороту.

Вхід в правий поворот. Вихідні дані: $v = 1,73$ м/с; $\ell = 1,27$ м; $L = 2,63$ м; $R_{\min} = 5,0$; шлях $S = vt$. $\alpha_{1\text{коліс}} = 180^\circ / 25 = 7,2^\circ = 0,1256$ рад, $\alpha_o = 0$, $t = 17,5$ с,
 $\alpha_\kappa = 0,1256 \cdot (1,27/2,63) = 0,0606$ рад = $3,47^\circ$, $k = (0,0606 - 0)/17,5 = 0,00343$ с⁻¹,
 $\theta_1 = 0$.

Вихід з правого повороту. $\alpha_o = 0,0607$ рад = $3,48^\circ$, $\alpha_\kappa = 0$, $t = 17,5$ с,
 $k = (0 - 0,0607)/17,5 = -0,00343$ с⁻¹, $\theta_2 = \varphi_{\kappa 1} = 41,50^\circ$.

Вхід в лівий поворот і вихід з лівого повороту.

Вихідні дані: $v = 1,472$ м/с; $\ell = 1,27$ м; $L = 2,63$ м; $R_{\min} = 5,0$; шлях $S = vt$.
 $\alpha_{1\text{коліс}} = 180^\circ / 25 = 7,2^\circ = 0,1256$ рад, $\alpha_o = 0$, $t = 16,15$ с, $\theta_1 = 0$,
 $\alpha_\kappa = 0,1256 \cdot (1,27/2,63) = 0,0607$ рад = $3,48^\circ$, $k = (0,0607 - 0)/16,15 = 0,00376$ с⁻¹.

Вихід з лівого повороту. $\alpha_o = 0,0607$ рад = $3,48^\circ$, $\alpha_\kappa = 0$, $t = 16,15$ с,
 $k = (0 - 0,0607)/16,15 = -0,00376$ с⁻¹, $\theta_2 = \varphi_{\kappa 1} = 32,54^\circ$.

Після отримання траєкторій входу в лівий, правий повороти і вихід з лівого, правого поворотів в лабораторних умовах за допомогою Microsoft Excel необхідно отримати траєкторії повороту чотирьохколісної машини з використанням супутникової навігаційної системи та порівняти їх.

3.3.2. Методика відтворення траєкторії повороту чотирьохколісної машини з використанням супутникової навігаційної системи. Для цього в салоні водія на місці центра ваги чотирьохколісної машини необхідно нерухомо закріпити прилад (планшет). Вибирається рівна горизонтальна ділянка необхідних розмірів в

залежності від форми і довжини очікуваної траєкторії, розмічається координатна сітка з прямолінійною ділянкою для набору необхідної швидкості і чітким визначенням початку входу в поворот. За допомогою додатку на планшет A-GPS Tracker, записується траєкторія (трек) входу і виходу з повороту та отримуються дані про місцезнаходження машини від супутникових сигналів: швидкість, час руху, довжина треку, широта та довгота кожної точки траєкторії. Час входу в поворот та виходу з повороту фіксується за допомогою секундоміру.

3.3.3. Методика проведення статистичної обробки ступеня відповідності розрахункових координат траєкторій чотирьохколісної машини з координатами траєкторій, отриманих з використанням супутникової навігаційної системи. Для кількісної оцінки відповідності координат теоретичних і координат відтворених траєкторій визначаємо середньоквадратичне відхилення окремо для координат x і y :

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{(x_{1e} - x)^2 + (x_{2e} - x)^2 + \dots + (x_{ne} - x)^2}{n}}; \quad (3.7)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{(y_{1e} - y)^2 + (y_{2e} - y)^2 + \dots + (y_{ne} - y)^2}{n}}. \quad (3.8)$$

Тут $x_{1e}, x_{2e}, \dots, x_{ne}$ і $y_{1e}, y_{2e}, \dots, y_{ne}$ – координати експериментальної (відтвореної) кривої;

$$x = \frac{x_{1т} + x_{2т} + \dots + x_{nт}}{n}; \quad y = \frac{y_{1т} + y_{2т} + \dots + y_{nт}}{n} \quad (3.9)$$

x, y – середні арифметичні значення; n – кількість точок траєкторії.

Порядок визначення середнього квадратичного відхилення для траєкторій, отриманих з використанням супутникової навігаційної системи:

- знаходимо x_{ie} і y_{ie} кожної точки на зламі експериментальної траєкторії і відповідний їм час t ;
- обчислюємо координати x_{it} і y_{it} теоретичної траєкторії, що відповідають знайденому часу;
- знаходимо середні арифметичні значення теоретичних координат x і y ;

- обчислюємо середні квадратичні відхилення σ_x і σ_y .

3.4. Методика використання супутникової навігаційної системи при відтворенні грушоподібного розвороту на тракторі New Holland T8050 з бороною Соломія БШН-17 (додаток Б, В).

Розглядається петлевидний розворот трактора New Holland T8050 з бороною Соломія БШН-17 з шириною захвату 17 м і мінімальним радіусом повороту $R = 5,0$ м. Швидкість руху по криволінійній траєкторії $v = 10$ км/год $\approx 2,78$ м/с. Це один з розворотів з великою довжиною траєкторії, що потребує значних розмірів розвортної полоси (до 34 м). Загальні для всіх ділянок вихідні дані: $v = 2,78$ м/с; $\ell = 1,117$ м; $R_{\min} = 5,0$; шлях $S = vt$.

Повний розворот складається з наступних елементів-маневрів: вхід в лівий поворот, вихід з лівого повороту, вхід в правий поворот, колова траєкторія (правий поворот), вихід з правого повороту, вхід в лівий поворот, вихід з лівого повороту. Для кожної ділянки необхідно визначити вихідні параметри для спряження повного розвороту.

3.4.1. Визначення вихідних параметрів кожної ділянки траєкторії грушоподібного розвороту на тракторі New Holland T8050 з бороною Соломія БШН-17.

1. Вхід в лівий поворот: $\alpha_o = 0$, $\alpha_k = 4,2^\circ = 0,0733$ рад, $t = 2,2$ с,
 $k = \alpha_k / t = 0,0733 / 2,2 = 0,0333$ с⁻¹,
 $\varphi_k = (2,78 / 1,117) \cdot (0 + (1/2) \cdot 0,0333 \cdot 2,2^2) = 0,200$ рад = $11,49^\circ$, $\theta_1 = 0$.

2. Вихід з лівого повороту: $\alpha_o = 0,0733$ рад = $4,2^\circ$, $\alpha_k = 0$, $t = 2,2$ с,
 $k = (\alpha_k - \alpha_o) / t = (0 - 0,0733) / 2,2 = -0,0333$ с⁻¹, $\theta_2 = \varphi_{k1} = 11,49^\circ$.

3. Вхід в правий поворот: $\alpha_o = 0$, $t = 2,6$ с, $\alpha_k = \alpha_o + kt$,
 $\alpha_k = 0 - 0,03019 \cdot 2,6 = -0,0785$ рад $= -4,5^\circ$, $\theta_3 = \theta_2 + \varphi_2 = 11,49 + 11,49 = 22,98^\circ$,
 $k = -0,03019$ с $^{-1}$.

4. Правий поворот (колова траєкторія): $\alpha_k = \alpha_o = -0,079$ рад $= -4,5^\circ$; $k = 0$;
 $t = 17,4$ с; $\varphi_k = -194,72^\circ$, $\theta_4 = \theta_3 + \varphi_3 = 22,98 - 14,55 = 8,43^\circ$.

5. Вихід з правого повороту: $\alpha_o = -0,079$ рад $= -4,5^\circ$, $\alpha_k = 0$, $t = 2,8$ с,
 $k = 0,2804$ с $^{-1}$, $\theta_5 = \theta_4 + \varphi_4 = 8,43 - 194,72 = -186,29^\circ$.

6. Вхід в лівий поворот: $\alpha_o = 0$, $\alpha_k = 0,06978$ рад $= 4,0^\circ$, $t = 2,0$ с.
 $k = 0,03489$ с $^{-1}$, $\theta_6 = \theta_5 + \varphi_5 = -186,29 - 15,67 = -201,96^\circ$.

7. Вихід з лівого повороту: $\alpha_o = 0,06978$ рад $= 4^\circ$, $\alpha_k = 0^\circ$, $t = 2,0$ с.
 $k = (0 - 0,06978) / 2,0 = -0,03489$ с $^{-1}$, $\theta_7 = \theta_6 + \varphi_6 = -201,96 + 9,96 = -192^\circ$.

Після отримання траєкторій повного повороту в лабораторних умовах за допомогою Microsoft Excel необхідно отримати траєкторію повороту трактора New Holland T8050 з бороною Соломія БШН-17 в польових умовах на сільськогосподарських угіддях та порівняти їх.

3.4.2. Методика отримання відтвореної траєкторії розвороту трактора New Holland T8050 з бороною Соломія БШН-17 в польових умовах на сільськогосподарських угіддях СТОВ «Вікторія» Краснопільського району Сумської області. Для цього в салоні водія на місці центра ваги трактора необхідно нерухомо закріпити прилад (планшет). Вибрати рівну горизонтальну ділянку необхідних розмірів в залежності від форми і довжини очікуваної траєкторії, розмітити координатну сітку з прямолінійною ділянкою для набору необхідної швидкості і чітким визначенням початку входу в поворот. За допомогою додатку на планшет A-GPS Tracker, записується траєкторія (трек) розвороту та отримується дані про місцезнаходження машини від супутникових сигналів: швидкість, час руху,

довжина треку, широта та довгота кожної точки траєкторії. Час входу в поворот та виходу з повороту фіксується за допомогою секундоміру.

3.4.3. Методика проведення статичної обробки отриманих координат траєкторій розвороту трактора New Holland T8050 з використанням супутникової навігаційної системи. Для кількісної оцінки сходимості координат теоретичних і координат відтворених траєкторій визначаємо середньоквадратичне відхилення окремо для координат x і y згідно формул 3.7-3.9.

Порядок визначення середньоквадратичного відхилення для траєкторій, отриманих з використанням супутникової навігаційної системи (на прикладі траєкторії розвороту – рис. 3.24):

- знаходимо x_{ie} і y_{ie} кожної точки на зламі експериментальної траєкторії і відповідний їм час t (результати вносимо до таблиці);
- обчислюємо координати x_{it} і y_{it} теоретичної траєкторії, що відповідають знайденому часу;
- знаходимо середні арифметичні значення теоретичних координат x і y ;
- обчислюємо середні квадратичні відхилення σ_x і σ_y .

Висновки по розділу 3.

Основними параметрами, що визначають траєкторію, є швидкість руху і коефіцієнт інтенсивності зміни курсового кута. При плануванні теоретичних траєкторій ці параметри приймалися довільно, виходячи з реальних умов полігону і можливостей машини. Для отримання експериментальних кривих ці параметри відтворювалися водієм через акселератор і кермо.

Розроблена методика визначення координат дослідних траєкторій з використанням теодоліта Т30, маркера і вішок. З метою забезпечення необхідної рівномірної швидкості обертання керма був використаний коловий циферблат, закріплений на нерухомій частині рульової колонки. За допомогою додатку до планшету A-GPS записувалася траєкторія входу і поворот и виходу з повороту (від сигналів супутникової навігаційної системи), а також швидкість, час руху, шлях,

широта і довгота кожної точки траєкторії. Час, витрачений на маневр, фіксується за допомогою секундоміру.

Згідно представленої методики був змодельований грушоподібний розворот трактора МТЗ-80 з культиватором-рослинопідживлювачем КРН-4,2 з наступними вихідними параметрами: мінімальним радіусом повороту $R_{\min} = 5,2$ м, швидкість руху по криволінійній траєкторії $v = 5 \dots 10$ км/год $\approx 1,3 \dots 2,6$ м/с., відстань від центра ваги до задньої осі трактора $\ell = 0,93$ м. В результаті алгоритму отримали 7 ділянок з вихідними даними, в результаті спряженні яких отримуємо повний грушоподібний розворот центра ваги трактора: 1. вхід в лівий поворот: $\alpha_o = 0$, $t = 2,2$ с, $\alpha_k = 10,25^\circ$, $\varphi_k = 15,76^\circ$, $k = 0,08129$ с⁻¹; 2. вихід з лівого повороту: $\alpha_o = 10,25^\circ$, $\alpha_k = 0$, $t = 2,2$ с, $k = -0,08129$ с⁻¹, $\varphi_{k2} = 15,76^\circ$; 3. вхід в правий поворот: $\alpha_o = 0$, $k = -0,08129$ с⁻¹, $t = 2,0$ с; $\alpha_k = -10,25^\circ$, $\varphi_{k3} = -15,76^\circ$; 4. правий поворот (колова траєкторія): $\alpha_k = \alpha_o = -10,25^\circ$; $k = 0$; $t = 14,77$ с; $\varphi_k = -211,67^\circ$; 5. вихід з правого повороту: $\alpha_o = -10,25^\circ$; $\alpha_k = 0$; $t = 2,2$ с. $k = 0,08129$ с⁻¹; 6. Вхід в лівий поворот: $\alpha_o = 0$, $\alpha_k = 0,1788$ рад $= 10,25^\circ$, $t = 2,2$ с, $k = -0,08129$ с⁻¹; 7. Вихід з лівого повороту: $\alpha_o = 10,25^\circ$, $\alpha_k = -6,75^\circ$, $t = 2,2$ с. $k = -0,08129$ с⁻¹.

Відповідно до розробленої методики були змодельовані траєкторії центра ваги автомобіля Renault Logan з передніми керованими колесами для ділянок входу в правий (лівий) поворот і виходу з правого (лівого) повороту з використанням супутникової навігаційної системи.

Вхід в лівий поворот і вихід з лівого повороту. Вихідні дані: $v = 1,472$ м/с; $\ell = 1,27$ м; $L = 2,63$ м; $R_{\min} = 5,0$. Вхід в лівий поворот: $\alpha_o = 0$, $\alpha_k = 3,47^\circ$, $t = 12,1$ с, $k = 0,00501$ с⁻¹. Вихід з лівого повороту: $\alpha_o = 3,47^\circ$, $\alpha_k = 0$, час виходу з повороту $t = 12,1$ с, $k = -0,00501$ с⁻¹.

Вхід в правий поворот і вихід з правого повороту. Вхід в правий поворот. Вихідні дані: $v = 1,73$ м/с; $\ell = 1,27$ м; $L = 2,63$ м; $R_{\min} = 5,0$; шлях $S = vt$.

$\alpha_{1\text{коліс}} = 7,2^\circ$, $\alpha_o = 0$, $t = 17,5$ с, $\alpha_k = 3,47^\circ$, $k = 0,00343$ с⁻¹. Вихід з правого повороту. $\alpha_o = 3,48^\circ$, $\alpha_k = 0$, $t = 17,5$ с, $k = -0,00343$ с⁻¹.

Були змодельовані траєкторії грушоподібного розвороту центра ваги трактора New Holland T8050 з бороною Соломія БШН-17 з наступними характеристиками: $v = 2,78$ м/с; $\ell = 1,117$ м; $R_{\min} = 5,0$ та вихідними даними для кожної ділянки: 1. вхід в лівий поворот: $\alpha_o = 0$, $\alpha_k = 4,2^\circ$, $t = 2,2$ с, $k = 0,0333$ с⁻¹, $\varphi_k = 11,49^\circ$; 2. вихід з лівого повороту: $\alpha_o = 4,2^\circ$, $\alpha_k = 0$, $t = 2,2$ с, $k = -0,0333$ с⁻¹, $\varphi_{k2} = 11,49^\circ$; 3. вхід в правий поворот: $\alpha_o = 0$, $t = 2,6$ с, $\alpha_k = -4,5^\circ$, $k = -0,03019$ с⁻¹; 4. правий поворот (колова траєкторія): $\alpha_k = -4,5^\circ$; $k = 0$; $t = 17,4$ с; $\varphi_k = -194,72^\circ$; 5. вихід з правого повороту: $\alpha_o = -4,5^\circ$, $\alpha_k = 0$, $t = 2,8$ с, $k = 0,2804$ с⁻¹; 6. вхід в лівий поворот: $\alpha_o = 0$, $\alpha_k = 4,0^\circ$, $t = 2,0$ с. $k = 0,03489$ с⁻¹; 7. Вихід з лівого повороту: $\alpha_o = 4^\circ$, $\alpha_k = 0^\circ$, $t = 2,0$ с. $k = -0,03489$ с⁻¹.

В результаті моделювання згідно методики був обґрунтований раціональний грушоподібний петлевидний розворот машинно-тракторного агрегату в складі трактора МТЗ-80 з культиватором-рослинопідживлювачем КРН-4,2 з визначенням параметрів для кожної ділянки розвороту.

Розроблені методика і програма експериментальних досліджень, лабораторне моделювання, а також вимірювальні прилади дають можливість досліджувати отримані аналітичні рівняння несталої руху чотирьохколісної машини з передніми керованими колесами, перевірити достовірність отриманих траєкторій на відповідність з теоретичними.

Список використаних джерел.

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.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА АДЕКВАТНОСТІ РОЗРОБЛЕНОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ НЕЛІНІЙНОГО РУХУ ЧОТИРЬОХКОЛІСНОЇ МАШИНИ

Мета експериментального дослідження – перевірка теоретичних висновків про криволінійний рух колісної машини: відтворення траєкторій в лабораторних умовах (на полігоні) за обумовленими вхідними даними (швидкість руху, початкове і кінцеве значення курсового кута, час руху); порівняння реальної траєкторії з теоретичною; визначення дійсних кінематичних параметрів відтвореної траєкторії; визначення оптимальних умов для здійснення поворотів і розворотів машини а також виконання цих робіт в польових умовах з використанням трактора МТЗ-80 з колісною формулою 4x4, чотирьохколісної машини та трактора New Holland з бороною Соломія БШН-17 [1, 2].

Мета лабораторних досліджень: перевірка вірності отриманих рівнянь криволінійного руху трактора в умовах університетського полігону шляхом відтворення різних ділянок траєкторії.

4.1. Результат моделювання грушоподібного петлевидного розвороту на прикладі трактора МТЗ-80 з культиватором-рослинопідживлювачем КРН-4,2 в лабораторних умовах.

4.1.1. Результат розрахунку окремих елементів розвороту.

Приймемо загальні для всіх ділянок вихідні дані: $v = 1,3$ м/с; $\ell = 0,93$ м; $R_{\min} = 5,2$ м; шлях $S = vt$. Вхід в лівий та вихід з лівого повороту.

Виходячи з мінімально допустимого радіуса кривизни траєкторії, знаходимо кінцеве значення курсового кута $\alpha_k = \ell / R_{\min} = 0,93 / 5,2 = 0,1788$ рад = $10,25^\circ$. Приймаємо: $\alpha_o = 0$ і час входу в поворот $t = 2,2$ с. Тоді коефіцієнт інтенсивності зміни курсового кута $k = \alpha_k / t = 0,179 / 2,2 = 0,08129$ с⁻¹ і кут повороту корпусу

трактора

в

кінці

ділянки

$\varphi_k = (v/\ell)(\alpha_0 t + (1/2)kt^2) = (1,3/0,93) \cdot (0 + (1/2) \cdot 0,0813 \cdot 2,2^2) = 0,275 \text{ рад} = 15,76^\circ$. Далі поділяємо час входу в поворот $t = 2,2 \text{ с}$ на інтервали, обчислюємо за формулами (2.37) для кожного значення t координати x_i і y_i в системі координат $x_1 y_1$ і відповідні їм значення кутів α і φ за формулами (2.35), а також зведені до загальної системи координат $x y$ координати x і y за формулами (2.41). Осі $x_1 y_1$ паралельні осям $x y$, тому приймаємо для першої ділянки $\theta_1 = 0$. Результати розрахунків наведені в таблиці 4.1, а траєкторія входу в лівий поворот – на рисунку 4.1.

Таблиця 4.1 – Вхід в лівий поворот

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

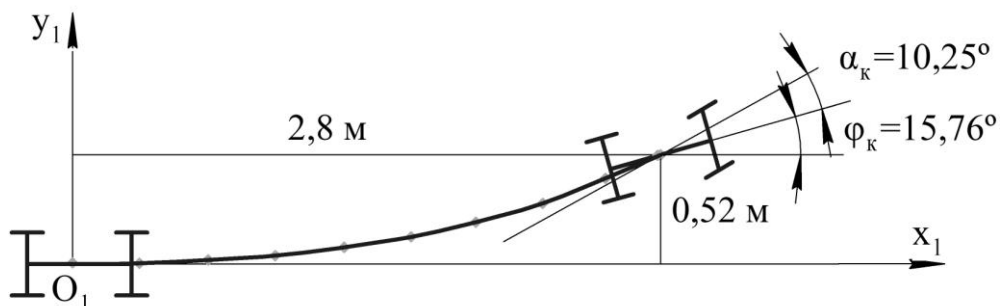


Рисунок 4.1 – Траєкторія входу в лівий поворот

Значення курсового кута на початку і в кінці ділянки:

$\alpha_o = 0,1788 \text{ рад} = 10,25^\circ$, $\alpha_k = 0$. Приймаємо час виходу з повороту $t = 2,2 \text{ с}$. Тоді

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

$\varphi_{k2} = 15,76^\circ$. Осі x_2y_2 повернуті відносно осей xu на кут $\theta_2 = \varphi_{k1} = 15,76^\circ$. Решта

параметрів траєкторії розраховуються як і для попередньої ділянки. Результати розрахунків – у таблиці 4.2, схема траєкторії – на рисунку 4.2.

Таблиця 4.2 – Вихід з лівого повороту

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

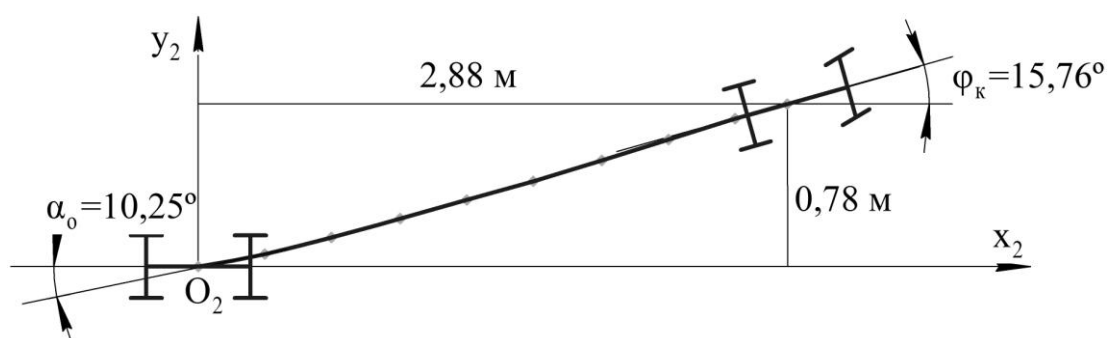


Рисунок 4.2 – Траєкторія виходу з лівого повороту

Вхід в правий поворот. Приймаємо $\alpha_o = 0$, $k = -0,08129 \text{ с}^{-1}$, $t = 2,0 \text{ с}$;

$\alpha_k = \alpha_o + kt = 0 - 0,08129 \cdot 2,2 = -0,1788 \text{ рад} = -10,25^\circ$, $\varphi_{k3} = -15,76^\circ$. Осі x_3y_3

повернуті відносно осей $xу$ на кут $\theta_3 = \theta_2 + \varphi_2 = 15,76 + 15,76 = 31,52^\circ$.

Результати розрахунків – в таблиці 4.3, траєкторія входу в правий поворот – на рисунку 4.3.

Таблиця 4.3 – Вхід в правий поворот.

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

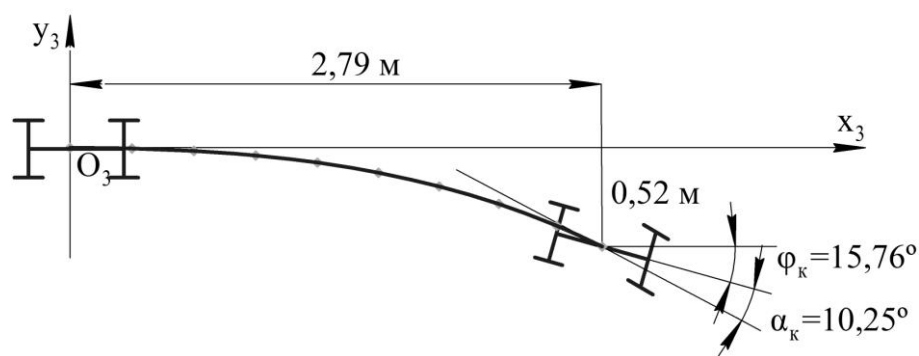


Рисунок 4.3 – Вхід в правий поворот

Правий поворот (колова траєкторія). Приймаємо $\alpha_k = \alpha_o = -0,1788 \text{ рад} = -10,25^\circ$; $k = 0$; $t = 14,77 \text{ с}$; $\varphi_k = -211,67^\circ$. Осі x_4y_4 повернуті відносно осей $xу$ на кут $\theta_4 = \theta_3 + \varphi_3 = 31,52 - 15,76 = 15,76^\circ$.

Для забезпечення симетрії траєкторії повороту відносно осі Ox центр колової траєкторії повинен знаходитися на цій осі. Для його визначення побудуємо лінію миттєвих центрів кривизни, яка відповідає траєкторії входу в правий поворот в

системі координат xOy . Точка перетину центроїди з віссю Ox визначить центр колової траєкторії і точку на ділянці входу в правий поворот, з якої почнеться рух по коловій траєкторії. Цей графічний спосіб знаходження радіуса кривизни колової траєкторії у загальному вигляді показано на рисунку 2.25. Координати x_c і y_c центроїди визначаються за формулами (2.44). Результати розрахунків наведені в таблиці 4.4, схема правого повороту – на рисунку 4.4.

Таблиця 4.4 – Правий поворот

№ з/п	t, c	x_i, m	y_i, m	$\alpha, \text{рад}$	$\alpha, \text{град}$	$\varphi, \text{рад}$	$\varphi, \text{град}$	R, m	S, m	x, m	y, m
1	0	0	0	-0,179	-10,25	0	0	-5,2	0	7,95	5,15
2	1,00	1,24	-0,39	-0,179	-10,25	-0,25	-14,33	-5,2	1,3	9,25	5,12
3	2,00	2,34	-1,07	-0,179	-10,25	-0,50	-28,66	-5,2	2,6	10,49	4,76
4	3,00	3,24	-2,00	-0,179	-10,25	-0,75	-42,99	-5,2	3,9	11,61	4,11
5	4,00	3,88	-3,13	-0,179	-10,25	-1,00	-57,32	-5,2	5,2	12,54	3,19
6	5,00	4,22	-4,38	-0,179	-10,25	-1,25	-71,66	-5,2	6,5	13,21	2,08
7	6,00	4,24	-5,68	-0,179	-10,25	-1,50	-85,99	-5,2	7,8	13,58	0,84
8	7,00	3,95	-6,94	-0,179	-10,25	-1,75	-100,32	-5,2	9,1	13,63	-0,45
9	8,00	3,34	-8,09	-0,179	-10,25	-2,00	-114,65	-5,2	10,4	13,37	-1,72
10	9,00	2,48	-9,05	-0,179	-10,25	-2,25	-128,98	-5,2	11,7	12,79	-2,88
11	10,00	1,40	-9,77	-0,179	-10,25	-2,50	-143,31	-5,2	13,0	11,95	-3,87
12	11,00	0,17	-10,20	-0,179	-10,25	-2,75	-157,64	-5,2	14,3	10,89	-4,62
13	12,00	-1,12	-10,31	-0,179	-10,25	-3,00	-171,97	-5,2	15,6	9,68	-5,08
14	13,00	-2,40	-10,10	-0,179	-10,25	-3,25	-186,31	-5,2	16,9	8,39	-5,22
15	14,00	-3,59	-9,58	-0,179	-10,25	-3,50	-200,64	-5,2	18,2	7,10	-5,04
16	14,77	-4,39	-8,99	-0,179	-10,25	-3,69	-211,67	-5,2	19,2	6,17	-4,69

Вихід з правого повороту. Значення курсового кута на початку і в кінці ділянки: $\alpha_0 = -0,1788 \text{ рад} = -10,25^\circ$, $\alpha_k = 0$. Приймаємо час виходу з повороту $t = 2,2 \text{ с}$. Тоді коефіцієнт інтенсивності $k = 0,08129 \text{ с}^{-1}$. Осі x_5y_5 повернуті відносно осей xu на кут $\theta_5 = \theta_4 + \varphi_4 = 15,76 - 211,53 = -196,05^\circ$. Результати розрахунків – у таблиці 4.5, схема маневру – на рисунку 4.5.

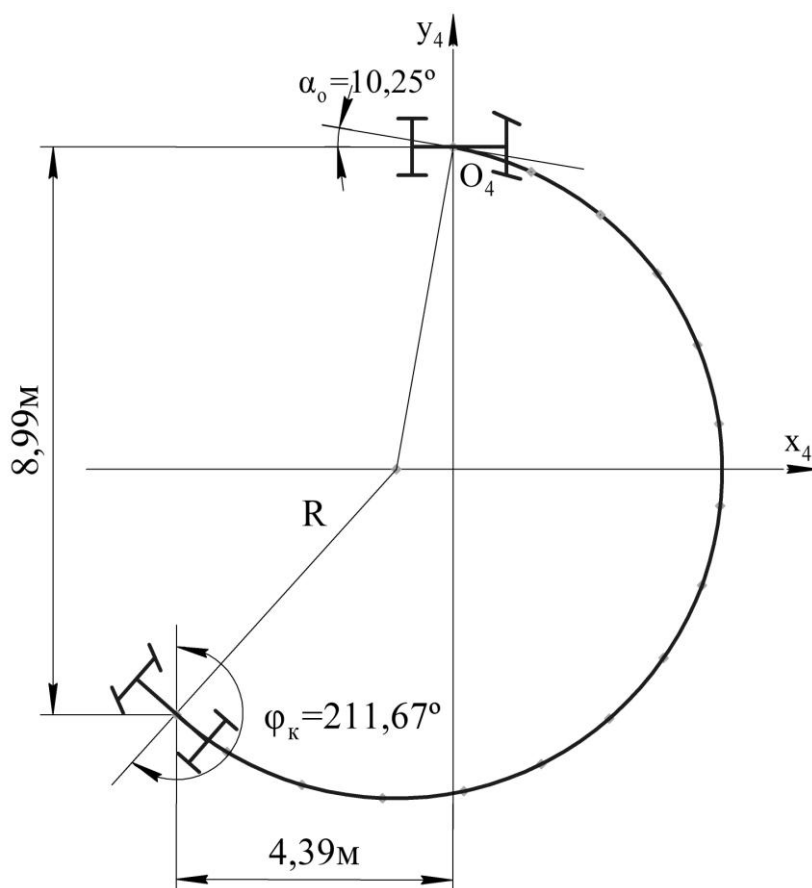


Рисунок 4.4 – Правий поворот.

Таблиця 4.5 – Вихід з правого повороту

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

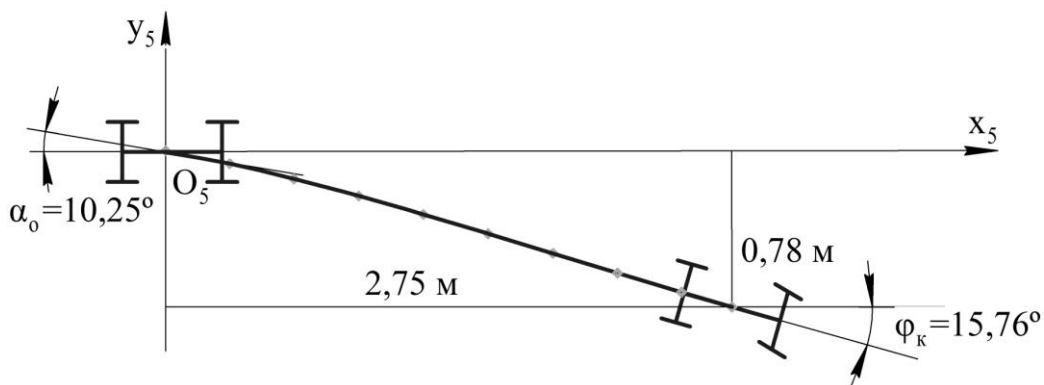


Рисунок 4.5 – Вихід з правого повороту

Вхід в лівий та вихід з лівого повороту. Значення курсового кута на початку і в кінці ділянки: $\alpha_0 = 0$, $\alpha_k = 0,1788$ рад $= 10,25^\circ$. Приймаємо час виходу з повороту $t = 2,2$ с. Тоді коефіцієнт інтенсивності $k = -0,08129$ с $^{-1}$. Осі $x_6 y_6$ повернуті відносно осей $x_5 y_5$ на кут $\theta_6 = \theta_5 + \varphi_5 = -15,76 - 196,05 = -211,815^\circ$. Результати розрахунків – у таблиці 4.6, схема маневру – на рисунку 4.6.

Таблиця 4.6 – Вхід в лівий поворот

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

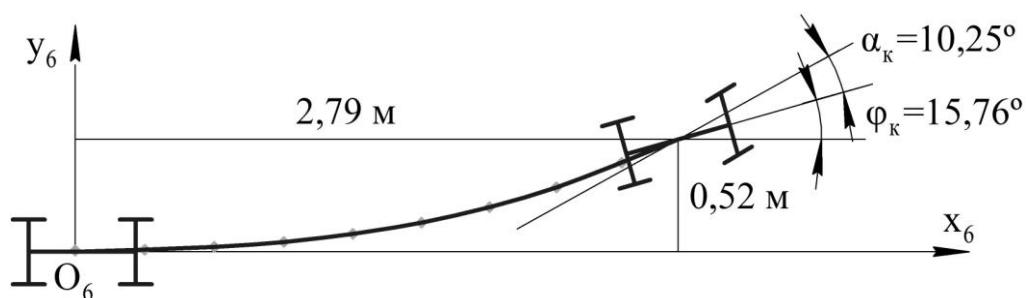


Рисунок 4.6 – Вхід в лівий поворот

Значення курсового кута на початку $\alpha_o = 0,1788$ рад = $10,25^\circ$ і в кінці ділянки:
 $\alpha_k = \alpha_o + kt$, $\alpha_k = 0,1788 - 0,08129 \cdot 0,75 = -0,1178$ рад = $-6,75^\circ$. Приймаємо час виходу з повороту $t = 2,2$ с. Тоді коефіцієнт інтенсивності $k = (\alpha_k - \alpha_o) / t = (0 - 0,179) / 2,2 = -0,08129$ с $^{-1}$. Осі x_7, y_7 повернуті відносно осей x_6, y_6 на кут $\theta_7 = \theta_6 + \varphi_6 = 15,76 - 211,815 = -196,05^\circ$. Результати розрахунків – у таблиці 4.7, схема траєкторії – на рисунку 4.7.

Таблиця 4.7 – Вихід з лівого повороту

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

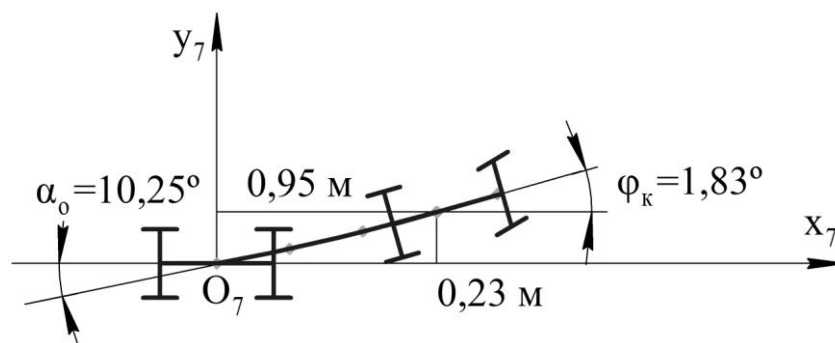


Рисунок 4.7 – Вихід з лівого повороту

4.1.2. Результат обґрунтування оптимальної траєкторії петлевидного розвороту трактора МТЗ-80 з культиватором КРН-4,2. Загальна траєкторія петлевидного розвороту трактора МТЗ-80 з культиватором КРН-4,2 (рис. 4.8) побудована з урахуванням усіх вимог, поставлених умовами задачі. Довжина повного шляху розвороту $S = 34,8$ м.

Пошук оптимального вирішення таких задач потребує попереднього дослідження на теоретичному рівні, що майже неможливо без аналітичних рівнянь траєкторії криволінійного руху.

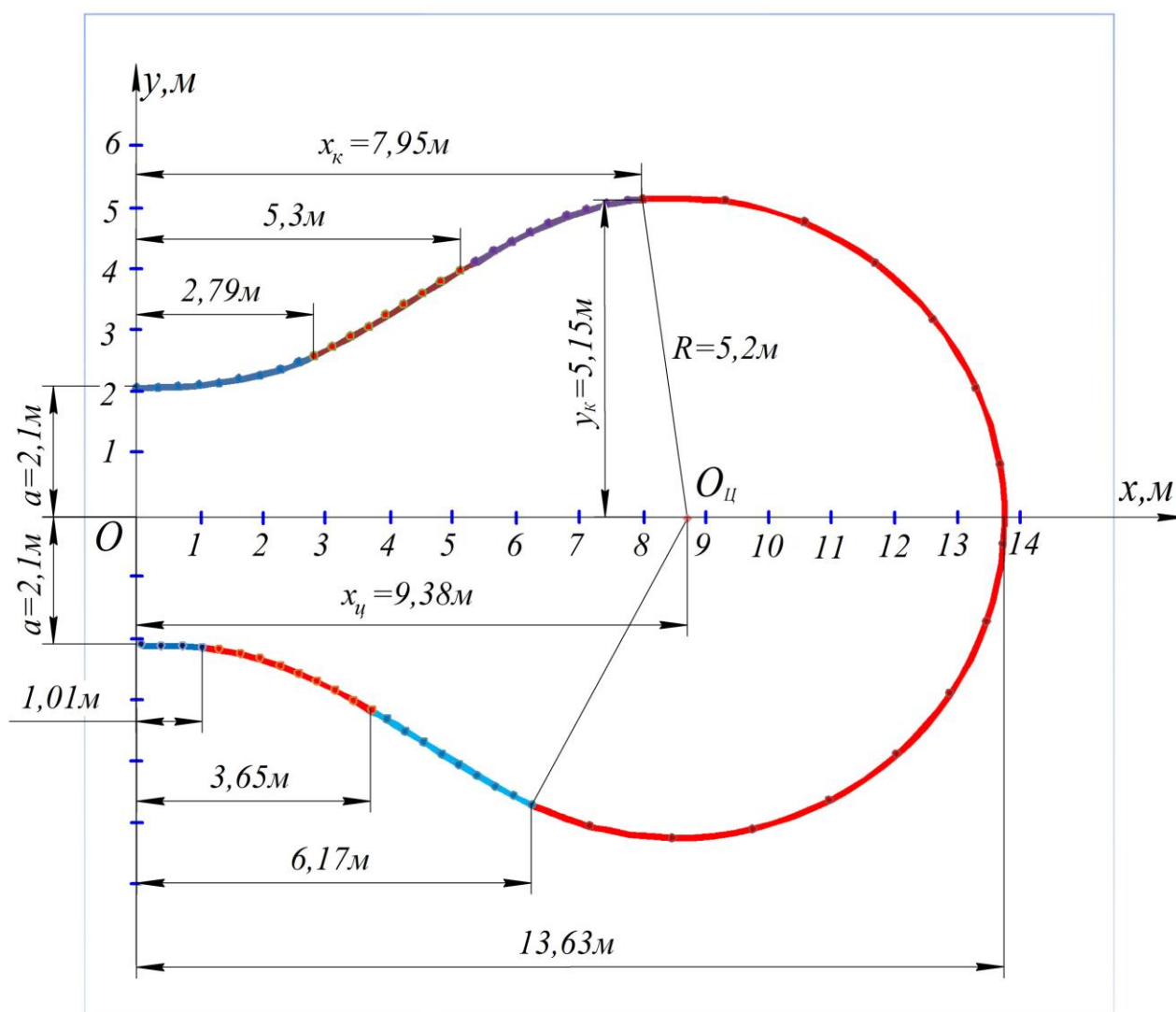


Рисунок 4.9 – Петлевидний розворот трактора МТЗ-80 з культиватором КРН-4,2

На рисунку 4.9 наведено сім варіантів петлевидного розвороту трактора МТЗ-80 з культиватором КРН-4,2, кожен з яких має свої особливості: 1 – вхід в лівий поворот на початку розвороту дає надто велике відхилення від осі Ox , що збільшує

радіус колової ділянки і, відповідно, довжину петлі; 2 – неправильний вибір точки переходу від входу в правий поворот до колової траєкторії – наслідки ті ж самі; 3 – зміщення центра колової траєкторії від осі Ox ускладнює вихід на прямолінійний рух в кінці розвороту; 4 – оптимальна, з нашої точки зору, траєкторія, детально описана в наведеному вище прикладі; 5 – зміщення центра кривизни правого повороту, неможливість виходу на координату $y = -2,1$ м в кінці розвороту, недотримання норми щодо допустимого радіуса кривизни; 6 – недопустимо малі радіуси кривизни на всіх ділянках; 7 – зміщений центр кривизни колової траєкторії, мінімальні радіуси кривизни на всіх ділянках не відповідають заданому нормативу. Окрім цього, існують недоліки, притаманні всім наведеним траєкторіям, наприклад, жодна з них не забезпечує розворот трактора рівно на 180° . Навіть в оптимальному варіанті під номером 4 кут повороту остова трактора складає $180,15^\circ$, тобто похибка дорівнює $0,1\%$. Неточність незначна, але уникнути її повністю в таких розрахунках майже неможливо.

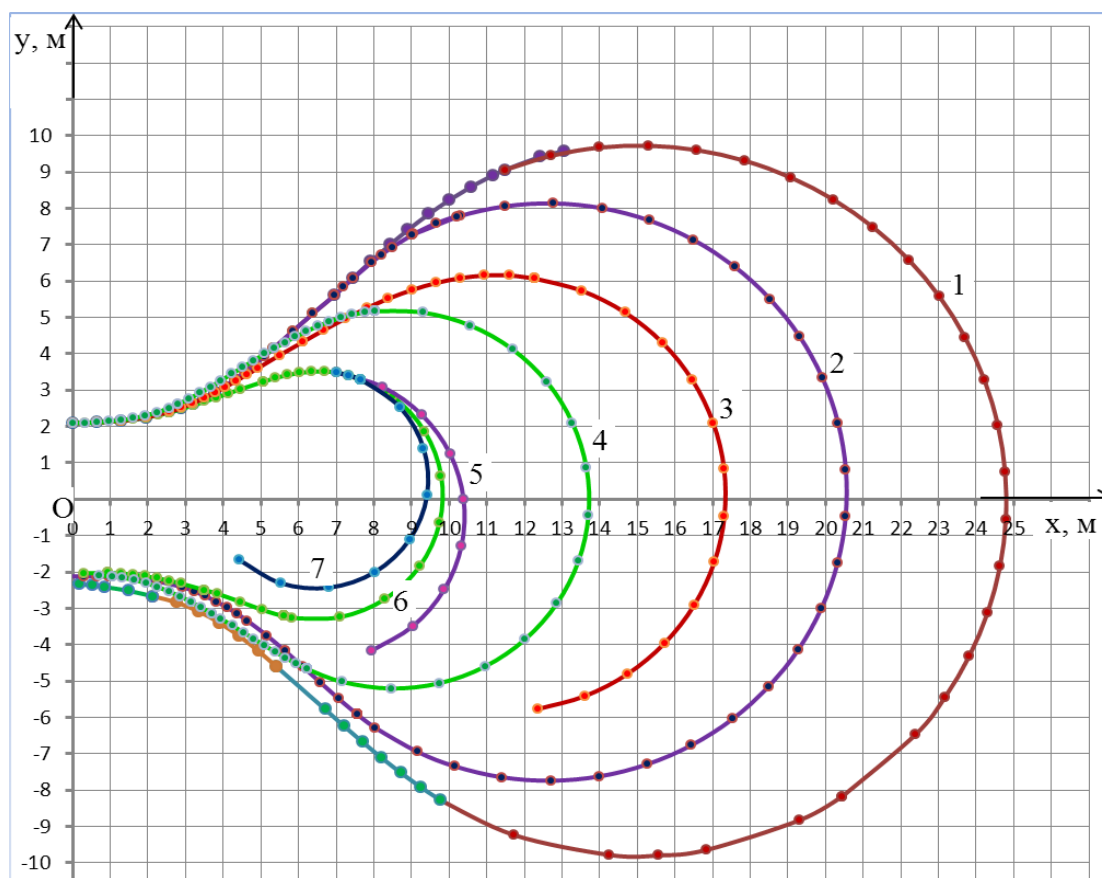


Рисунок 4.8 – Варіанти траєкторій петлевидного розвороту трактора МТЗ-80 з культиватором КРН-4,2

4.2. Результат проведення польового експерименту відтворення теоретичної траєкторії на тракторі МТЗ-80 на дослідних полях Сумського НАУ.

Після проходження залікової ділянки збиралася інформація по швидкості руху трактора, радіусу повороту, кутах повороту коліс і корпусу. Були отримані відтворені траєкторії в полі (рис. 4.10) з координатами (табл. 4.8) з наступними параметрами $v = 1,2$ м/с; $R_{\min} = 5,2$; $t = 8,9$ с; $S = 10,65$ м; $k = \pm 0,08942$ с⁻¹. Таким чином, були отримані дві траєкторії: теоретична і практична.



Рисунок 4.10 – Отримані польові траєкторії входу і виходу з правого повороту в полі, відтворені на землі за допомогою маркеру

Таблиця 4.8 – Результати вимірювань теодолітом Т30 [3]

N з/п	Кут між радіусами-векторами сусідніх вішок	Номери точок	Відлік	Кут напів-прийому	Сер. з-ня кута
1	2	3	4	5	6
1.	η_1	т. 1 (т.О)	ЛН 6° 45'	6°94'	6°92'
		т. 2	ЛН 359° 55'		
		т. 2	ПН 179° 36'	6°90'	
		т. 1	ПН 186° 30'		

1	2	3	4	5	6
2.	η_2	т. 1 (т.О)	ЛН 6° 45'	12°96'	12°985'
		т. 3	ЛН 353° 49'		
		т. 3	ПН 173° 29'	13°01'	
		т. 1	ПН 186° 30'		
3.	η_3	т. 1 (т.О)	ЛН 6° 45'	17°40'	17°585'
		т. 4	ЛН 349° 05'		
		т. 4	ПН 168° 53'	17°77'	
		т. 1	ПН 186° 30'		
4.	η_4	т. 1 (т.О)	ЛН 6° 45'	26°95'	26°965'
		т. 5	ЛН 339° 50'		
		т. 5	ПН 159° 32'	26°98'	
		т. 1	ПН 186° 30'		
5.	η_5	т. 1 (т.О)	ЛН 6° 45'	33°45'	33°67'
		т. 6	ЛН 333° 00'		
		т. 6	ПН 152° 41'	33°89'	
		т. 1	ПН 186° 30'		
6.	η_6	т. 1 (т.О)	ЛН 6° 45'	39°75'	39°765'
		т. 7	ЛН 326° 70'		
		т. 7	ПН 146° 52'	39°78'	
		т. 1	ПН 186° 30'		
7.	η_7	т. 1 (т.О)	ЛН 6° 45'	45°90'	45°925'
		т. 8	ЛН 320° 50'		
		т. 8	ПН 140° 40'	45°95'	
		т. 1	ПН 186° 30'		

Відтворені траєкторії разом з теоретичною зображені на рисунку 4.11.

Таблиця 4.9 – Результати визначення відтвореної траєкторії для МТЗ-80

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

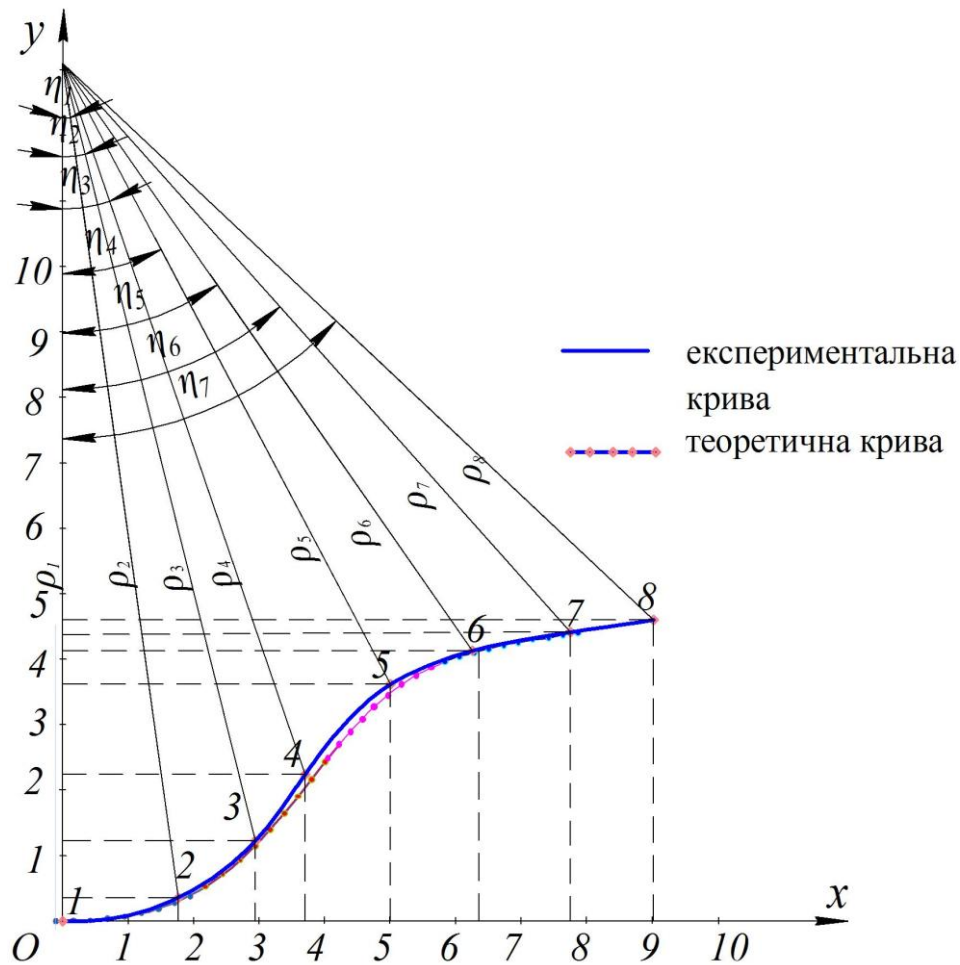


Рисунок 4.11 – Теоретична і експериментальна траєкторії трактора МТЗ-80

$$v = 1,2 \text{ м/с}; R_{\min} = 5,2; t = 8,9 \text{ с}; S = 10,65 \text{ м}; k = \pm 0,08942 \text{ с}^{-1}.$$

В результаті визначення середнього квадратичного відхилення координат експериментальної траєкторії трактора МТЗ 80 координат $x_{i_{експ}}$ і $y_{i_{експ}}$ та $x_{i_{т}}$ і $y_{i_{т}}$ отримаємо: $\sigma_x = 2,44 \text{ м}$; $\sigma_y = 1,56 \text{ м}$. Таким чином, експериментально відтворені траєкторії лівого і правого поворотів (вхід і вихід) на тракторі МТЗ-80 із застосуванням лазерного далекоміра і маркера для визначення координат точок траєкторії показали повну ідентичність і достатню сходиність експериментальних і теоретичних траєкторій.

4.3. Результат використання супутникової навігаційної системи при відтворенні траєкторії повороту на чотирьохколісній машині з передніми керованими колесами на прикладі автомобіля Renault Logan.

В результаті використання супутникової навігаційної системи були отримані три траєкторії: входу в лівий (правий) поворот і виходу з лівого (правого) повороту, чотирьохколісної машини з передніми керованими колесами автомобіля Renault Logan і результати визначення їх параметрів [4].

4.3.1. Результати розрахунку та порівняльної оцінки траєкторій треку 1. Вхід в лівий поворот і вихід з лівого повороту. Вихідні дані: $v = 1,472$ м/с; $\ell = 1,27$ м; $L = 2,63$ м; $R_{\min} = 5,0$; шлях $S = vt$. Виходячи з запланованого кута обертання керма $\gamma = 180^\circ$, і передаточного числа між черв'яком і косозубим сектором механізму керування $j = 25$, знаходимо кінцеве значення кута повороту передніх коліс $\alpha_{1\text{колiс}} = 180^\circ / 25 = 7,2^\circ = 0,1256$ рад. Значення курсового кута на початку і в кінці ділянки: $\alpha_o = 0$, $\alpha_k = \alpha_1(\ell/L) = 0,1256 \cdot (1,27/2,63) = 0,0606$ рад = $3,47^\circ$. Приймаємо час входу в поворот $t = 12,1$ с. Тоді коефіцієнт інтенсивності $k = (\alpha_k - \alpha_o)/t = 0,0606/12,1 = 0,00501$ с⁻¹. Осі x_1, y_1 паралельні осям x, y , тому приймаємо для першої ділянки $\theta_1 = 0$. Результати розрахунків – у таблиці 4.10, схема маневру – на рисунку 4.12.

Таблиця 4.10 – Вхід в лівий поворот

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

Значення курсового кута на початку і в кінці ділянки:

$\alpha_o = 0,0606 \text{ рад} = 3,47^\circ$, $\alpha_k = 0$, час виходу з повороту $t = 12,1 \text{ с}$. Тоді коефіцієнт інтенсивності $k = (\alpha_k - \alpha_o)/t = (0 - 0,0607)/12,1 = -0,00501 \text{ с}^{-1}$. Осі x_2y_2 повернуті відносно осей xy на кут $\theta_2 = \varphi_{k1} = 24,38^\circ$. Решта параметрів траєкторії розраховуються як і для попередньої ділянки. Результати розрахунків – у таблиці 4.11, схема траєкторії – на рисунку 4.12.

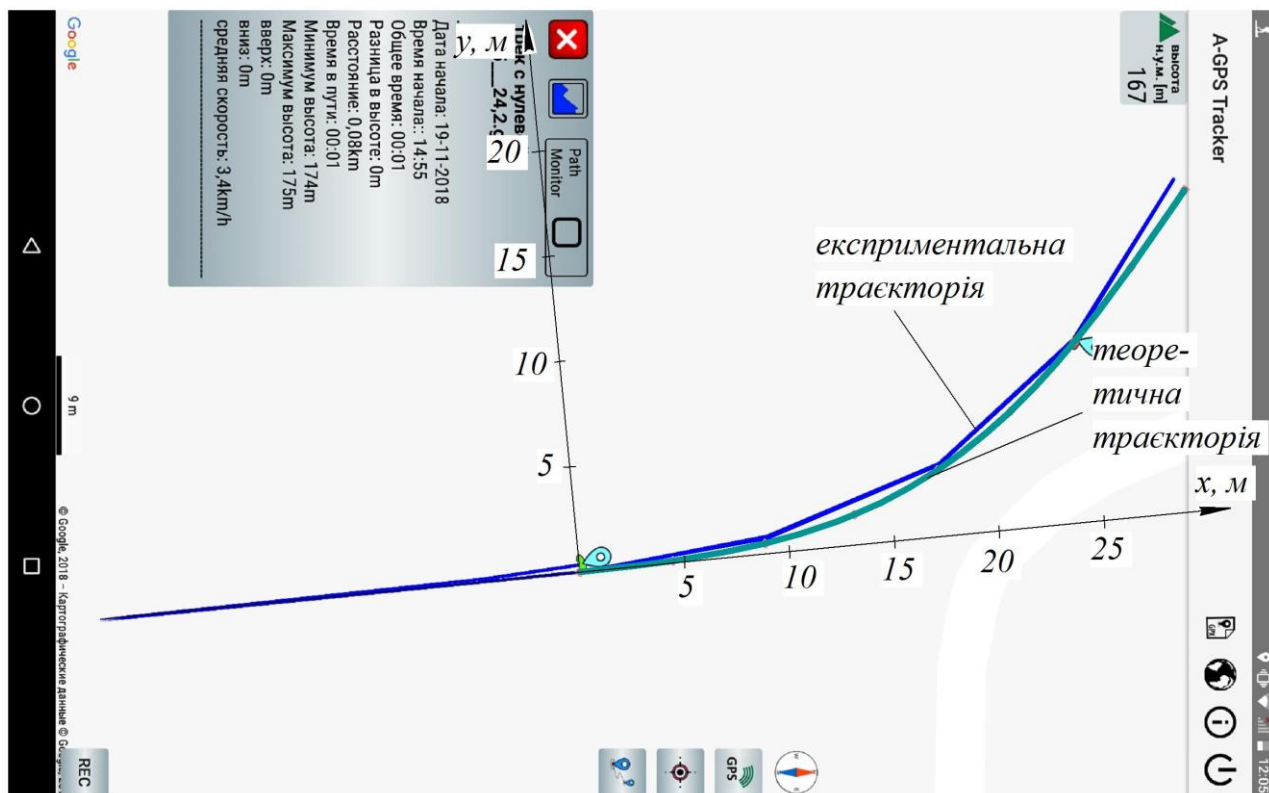


Рисунок 4.12 – Експериментальна та теоретична траєкторії входу в лівий поворот і виходу з лівого повороту чотирьохколісної машини

Таблиця 4.11 – Вихід з лівого повороту

№ з/п	$t, \text{ с}$	$x_i, \text{ м}$	$y_i, \text{ м}$	$\alpha, \text{ рад}$	$\alpha, \text{ град}$	$\varphi, \text{ рад}$	$\varphi, \text{ град}$	$R, \text{ м}$	$S, \text{ м}$	$x, \text{ м}$	$y, \text{ м}$
1	0	0	0	0,061	3,48	0	0	20,94	0	17,36	3,07
2	1,34	1,97	0,20	0,054	3,09	0,089	5,12	23,56	1,98	19,07	4,06
3	2,69	3,91	0,56	0,047	2,70	0,168	9,63	26,92	3,96	20,70	5,19
4	4,03	5,83	1,05	0,040	2,32	0,236	13,54	31,41	5,94	22,24	6,43

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
5	5,38	7,72	1,65	0,034	1,93	0,294	16,86	37,69	7,92	23,72	7,75
6	6,72	9,58	2,34	0,027	1,55	0,341	19,56	47,11	9,90	25,12	9,15
7	8,07	11,41	3,10	0,020	1,16	0,378	21,67	62,82	11,87	26,48	10,60
8	9,41	13,23	3,91	0,013	0,77	0,404	23,18	94,23	13,85	27,80	12,08
9	10,76	15,03	4,75	0,007	0,39	0,420	24,08	188,46	15,83	29,09	13,59
10	12,10	16,83	5,59	0	0	0,425	24,38	∞	17,81	30,38	15,10

4.3.2. Результати розрахунку та порівняльної оцінки траєкторій треку 2. Вхід в правий поворот і вихід з правого повороту. Вихідні дані: $v = 1,73$ м/с; $\ell = 1,27$ м; $L = 2,63$ м; $R_{\min} = 5,0$; шлях $S = vt$. Знаходимо кінцеве значення кута повороту передніх коліс $\alpha_{1_{\text{колiс}}} = 180^\circ / 25 = 7,2^\circ = 0,1256$ рад. Значення курсового кута на початку і в кінці ділянки: $\alpha_o = 0$, $\alpha_k = \alpha_1(\ell/L) = 0,1256 \cdot (1,27/2,63) = 0,0606$ рад = $3,47^\circ$. Приймаємо час входу в поворот $t = 17,5$ с. Тоді коефіцієнт інтенсивності $k = (\alpha_k - \alpha_o)/t = (0,0606 - 0)/17,5 = 0,00343$ с⁻¹. Результати розрахунків – у таблиці 4.12, схема маневру – на рисунку 4.13.

Таблиця. 4.12 – Вхід в правий поворот

№ з/п	t , с	x_i , м	y_i , м	α , рад	α , град	φ , рад	φ , град	R , м	S , м	x , м	y , м
1	0	0	0	0	0	0	0	∞	0	0	0
2	1,94	3,37	0,02	0,0067	0,39	0,009	0,51	188,46	3,37	3,37	0,02
3	3,89	6,73	0,13	0,0135	0,77	0,036	2,05	94,23	6,74	6,73	0,13
4	5,83	10,09	0,37	0,0202	1,16	0,080	4,61	62,82	10,11	10,09	0,37
5	7,78	13,43	0,82	0,0270	1,55	0,143	8,20	47,11	13,47	13,43	0,82
6	9,72	16,72	1,54	0,0337	1,93	0,223	12,81	37,69	16,84	16,72	1,54
7	11,67	19,93	2,58	0,0404	2,32	0,322	18,44	31,41	20,21	19,93	2,58
8	13,61	23,00	4,00	0,0472	2,70	0,438	25,10	26,92	23,58	23,00	4,00
9	15,56	25,84	5,86	0,0539	3,09	0,572	32,79	23,56	26,95	25,84	5,86
10	17,50	28,38	8,23	0,0607	3,48	0,724	41,50	20,94	30,32	28,38	8,23

Осі $x_1 y_1$ паралельні осям $x y$, тому приймаємо для першої ділянки $\theta_1 = 0$.

Вихід з повороту. Значення курсового кута на початку і в кінці ділянки:

$\alpha_o = 0,0607$ рад = $3,48^\circ$, $\alpha_k = 0$. Приймаємо час виходу з повороту $t = 17,5$ с. Тоді коефіцієнт інтенсивності $k = (\alpha_k - \alpha_o)/t = (0 - 0,0607)/17,5 = -0,00343$ с $^{-1}$. Осі x_2y_2 повернуті відносно осей xu на кут $\theta_2 = \varphi_{k1} = 41,50^\circ$. Решта параметрів траєкторії розраховуються як і для попередньої ділянки. Результати розрахунків – у таблиці 4.13, схема траєкторії – на рисунку 4.13.

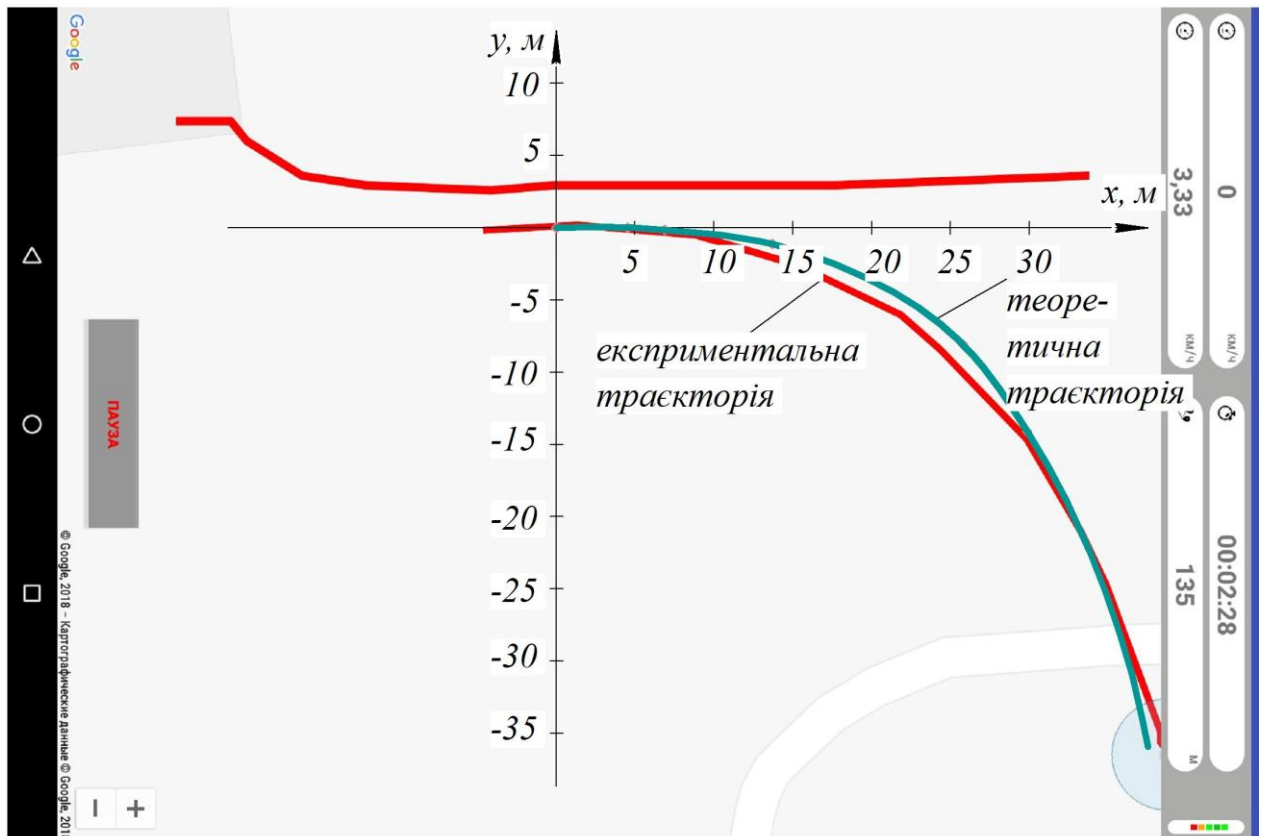


Рисунок 4.13 – Експериментальна та теоретична траєкторії входу в правий поворот і виходу з правого повороту чотирьохколісної машини

Таблиця. 4.13 – Вихід з правого повороту

№ з/п	t , с	x_i , м	y_i , м	α , рад	α , град	φ , рад	φ , град	R , м	S , м	x , м	y , м
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	0	0	-0,061	-3,48	0	0	-20,94	0	28,38	-8,23
2	1,94	3,33	-0,45	-0,054	-3,09	-0,152	-8,71	-23,56	3,37	30,57	-10,78
3	3,89	6,58	-1,37	-0,047	-2,70	-0,286	-16,39	-26,92	6,74	32,40	-13,61

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4	5,83	9,69	-2,68	-0,040	-2,32	-0,402	-23,05	-31,41	10,11	33,86	-16,66
5	7,78	12,65	-4,33	-0,034	-1,93	-0,500	-28,69	-37,69	13,47	34,99	-19,86
6	9,72	15,47	-6,26	-0,027	-1,55	-0,581	-33,30	-47,11	16,84	35,82	-23,17
7	11,67	18,15	-8,40	-0,020	-1,16	-0,643	-36,89	-62,82	20,21	36,41	-26,55
8	13,61	20,73	-10,71	-0,013	-0,77	-0,688	-39,45	-94,23	23,58	36,82	-29,99
9	15,56	23,24	-13,11	-0,007	-0,39	-0,715	-40,98	-188,46	26,95	37,11	-33,45
10	17,50	25,73	-15,55	0	0	-0,724	-41,50	∞	30,32	37,35	-36,92

4.3.3. Результати розрахунку та порівняльної оцінки траєкторій треку 3. Вхід в лівий поворот і вихід з лівого повороту. Вихідні дані: $v = 1,472$ м/с; $\ell = 1,27$ м; $L = 2,63$ м; $R_{\min} = 5,0$; шлях $S = vt$. Виходячи з запланованого кута обертання керма $\gamma = 180^\circ$, і передаточного числа між черв'яком і косозубим сектором механізму керування $j = 25$, знаходимо кінцеве значення кута повороту передніх коліс $\alpha_{1\text{колiс}} = 180^\circ / 25 = 7,2^\circ = 0,1256$ рад. Значення курсового кута на початку і в кінці ділянки:, $\alpha_k = \alpha_1(\ell/L) = 0,1256 \cdot (1,27/2,63) = 0,0607$ рад = $3,48^\circ$. Приймаємо час входу в поворот $t = 16,15$ с. Тоді коефіцієнт інтенсивності $k = (\alpha_k - \alpha_o)/t = (0,0607 - 0)/16,15 = 0,00376$ с⁻¹. Результати розрахунків – у таблиці 4.14, схема маневру – на рисунку 4.14.

Таблиця. 4.14 – Вхід в лівий поворот

№ з/п	t, с	x _i , м	y _i , м	α , рад	α , град	φ , рад	φ , град	R, м	S, м	x, м	y, м
1	0	0	0	0	0	0	0	∞	0	0	0
2	1,79	2,64	0,02	0,0067	0,39	0,007	0,40	188,46	2,64	2,64	0,02
3	3,59	5,28	0,08	0,0135	0,77	0,028	1,61	94,23	5,28	5,28	0,08
4	5,38	7,92	0,25	0,0202	1,16	0,063	3,62	62,82	7,92	7,92	0,25
5	7,18	10,54	0,54	0,0270	1,55	0,112	6,43	47,11	10,57	10,54	0,54
6	8,97	13,14	0,99	0,0337	1,93	0,175	10,04	37,69	13,21	13,14	0,99
7	10,77	15,70	1,65	0,0404	2,32	0,252	14,46	31,41	15,85	15,70	1,65
8	12,56	18,19	2,55	0,0472	2,70	0,343	19,69	26,92	18,49	18,19	2,55
9	14,36	20,57	3,73	0,0539	3,09	0,449	25,71	23,56	21,13	20,57	3,73
10	16,15	22,79	5,22	0,0607	3,48	0,568	32,54	20,94	23,77	22,79	5,22

Осі x_1y_1 паралельні осям $xу$, тому для першої ділянки $\theta_1 = 0$.

Значення курсового кута на початку і в кінці ділянки: $\alpha_o = 0,0607$ рад = $3,48^\circ$, $\alpha_k = 0$. Приймаємо час виходу з повороту $t = 16,15$ с. Тоді коефіцієнт інтенсивності $k = (\alpha_k - \alpha_o)/t = (0 - 0,0607)/16,15 = -0,00376$ с $^{-1}$. Осі x_2y_2 повернуті відносно осей $xу$ на кут $\theta_2 = \varphi_{k1} = 32,54^\circ$. Решта параметрів траєкторії розраховуються як і для попередньої ділянки. Результати розрахунків – у таблиці 4.15, схема траєкторії – на рисунку 4.14.

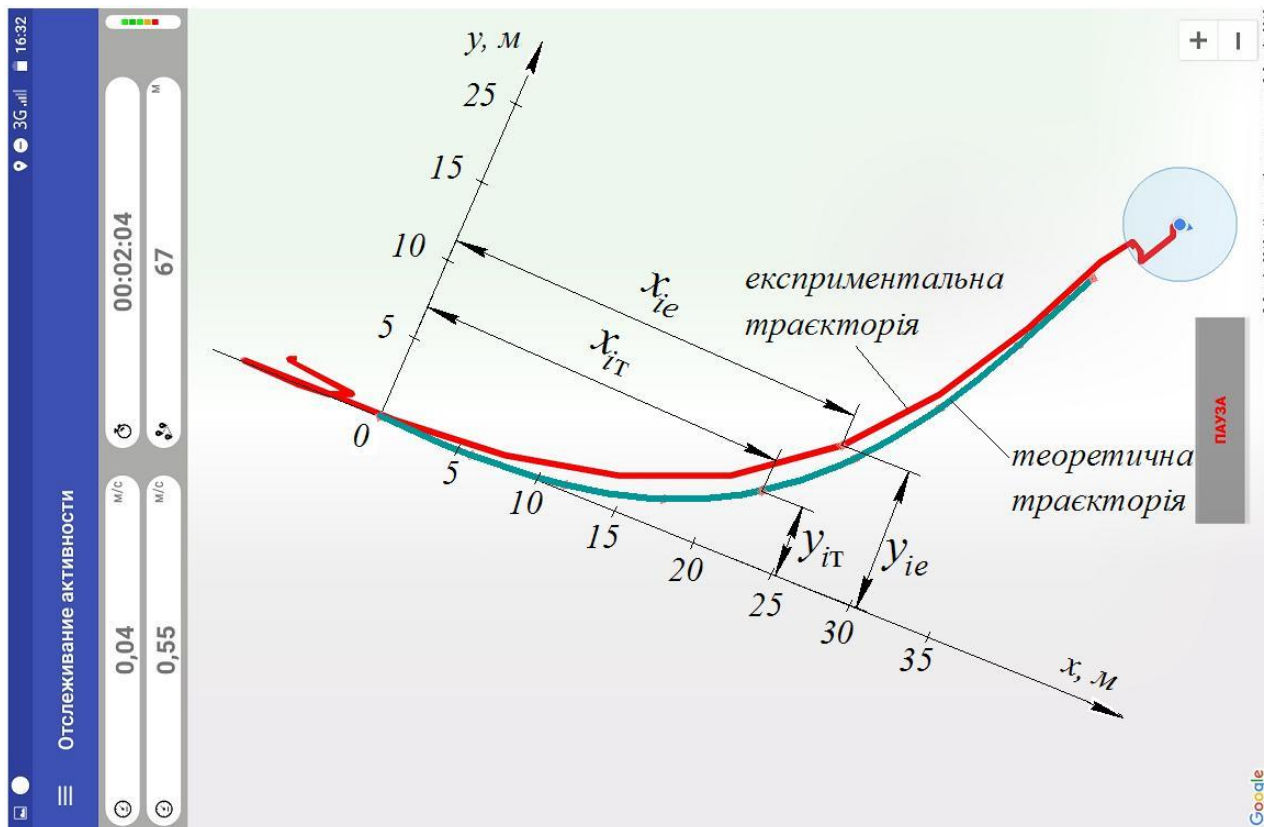


Рисунок 4.14 – Експериментальна та теоретична траєкторії входу в лівий поворот і виходу з лівого повороту чотирьохколісної машини

Таблиця 4.15 – Вихід з лівого повороту

№ з/п	t , с	x_i , м	y_i , м	α , рад	α , град	φ , рад	φ , град	R , м	S , м	x , м	y , м
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	0	0	0,061	3,48	0	0	20,94	0,00	22,79	5,22
2	1,79	2,62	0,31	0,054	3,09	0,119	6,83	23,56	2,64	24,83	6,89
3	3,59	5,20	0,90	0,047	2,70	0,224	12,86	26,92	5,28	26,68	8,77

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4	5,38	7,71	1,73	0,040	2,32	0,315	18,08	31,41	7,92	28,35	10,82
5	7,18	10,14	2,77	0,034	1,93	0,392	22,50	37,69	10,57	29,85	13,01
6	8,97	12,51	3,97	0,027	1,55	0,456	26,11	47,11	13,21	31,20	15,29
7	10,77	14,82	5,31	0,020	1,16	0,505	28,93	62,82	15,85	32,43	17,66
8	12,56	17,07	6,73	0,013	0,77	0,540	30,93	94,23	18,49	33,56	20,07
9	14,36	19,30	8,22	0,007	0,39	0,561	32,14	188,46	21,13	34,64	22,52
10	16,15	21,51	9,72	0	0	0,568	32,54	∞	23,77	35,70	24,98

Результати розрахунків для всіх траєкторій, побудованих з використанням супутникової навігаційної системи (таблиця 4.16).

Таблиця 4.16 – Результати відповідності координат треків.

N з/П	x_{ie} , м	t , с	x_{it} , м	x , м	y_{ie} , м	y_{it} , м	y , м	$(x_{ne} - x)^2$	$(y_{ne} - y)^2$	σ_x	σ_y
<i>Трек 1. Вхід в лівий поворот і вихід з лівого повороту.</i>											
1.	9,00	6,13	9,00	16,076	0,748	0,466	5,393	50,07	24,275	8,83	5,72
2.	17,40	12,15	17,43		3,42	3,099		1,83	5,26		
3.	24,38	18,12	23,64		8,57	8,40		57,214	9,042		
4.	29,81	24,14	30,31		15,77	15,00		202,61	92,29		
<i>Трек 2. Вхід в правий поворот і вихід з правого повороту.</i>											
1.	9,84	5,715	9,89	26,40	0,579	-0,35	13,63	272,58	176,36	10,33	13,13
2.	16,77	9,88	16,98		2,67	-1,59		88,736	144,96		
3.	24,03	14,52	24,37		6,04	-4,76		4,12	78,68		
4.	32,93	21,71	32,76		14,80	-13,95		40,45	0,1024		
5.	38,44	28,44	36,52		25,20	-25,06		102,4	130,64		
6.	42,01	34,68	37,90		35,40	-36,09		132,25	504,45		
<i>Трек 3. Вхід в лівий поворот і вихід з лівого повороту.</i>											
1.	8,02	5,48	8,06	24,26	0,674	0,256	10,03	262,44	95,53	9,48	8,42
2.	14,49	10,00	14,62		2,05	1,33		92,93	75,69		
3.	20,76	14,64	20,95		4,577	3,90		10,96	37,58		
4.	26,14	19,34	26,36		8,736	8,24		4,41	3,20		
5.	30,35	23,88	30,44		13,80	13,52		38,19	12,18		
6.	33,58	28,34	33,65		19,47	19,30		88,17	85,93		
7.	35,61	31,62	35,77		23,80	23,70		132,48	186,87		

1. Трек 1. (табл. 4.11 і 4.12, рис. 4.12):

$$\sigma_x = 8,83 \text{ м}, \sigma_y = 5,72 \text{ м}.$$

2. Трек 2. (табл. 4.13 і 4.14, рис. 4.13):

$$\sigma_x = 10,33 \text{ м}, \sigma_y = 13,13 \text{ м}.$$

3. Трек 3. (табл. 4.15 і 4.16, рис. 4.14): $\sigma_x = 9,48$ м, $\sigma_y = 8,42$ м.

Таким чином, експериментально відтворені траєкторії лівого і правого поворотів (вхід і вихід) шість маневрів на автомобілі Renault Logan з використанням супутникової навігаційної системи показали повну ідентичність і достатню відповідність експериментальних з теоретичними координатами траєкторій. Для кількісної оцінки їх відповідності необхідно скористатися середньоквадратичними показниками відхилень координат відтворених траєкторій від розрахункових.

4.4. Результат натурного експерименту по відтворенню грушоподібного розвороту на тракторі New Holland T8050 з бороною Соломія БШН-17.

Повний розворот трактора New Holland T8050 з бороною Соломія БШН-17 [5, б] складається з наступних елементів-маневрів: вхід в лівий поворот, вихід з лівого повороту, вхід в правий поворот, колова траєкторія (правий поворот), вихід з правого повороту, вхід в лівий поворот, вихід з лівого повороту. Для кожної ділянки були отримані вихідні параметри для спряження повного розвороту.

4.4.1. Результат розрахунок окремих елементів розвороту: вхід в лівий та вихід з лівого повороту, вхід в правий поворот, правий поворот, вихід з правого повороту, вхід та вихід з лівого повороту. Прийmemo загальні для всіх ділянок вихідні дані: $v = 2,78$ м/с; $\ell = 1,117$ м; $R_{\min} = 5,0$; шлях $S = vt$.

Вхід в лівий поворот. Виходячи з мінімально допустимого радіуса кривизни траєкторії, знаходимо максимального кінцеве значення курсового кута $\alpha_{\kappa_{\max}} = \ell / R_{\min} = 1,117 / 5,0 = 0,2234$ рад = $12,8^\circ$. Приймаємо: $\alpha_o = 0$, $\alpha_\kappa = 4,2^\circ = 0,0733$ рад і час входу в поворот $t = 2,2$ с. Тоді коефіцієнт інтенсивності зміни курсового кута $k = \alpha_\kappa / t = 0,0733 / 2,2 = 0,0333$ с⁻¹ і кут повороту корпусу трактора в кінці ділянки $\varphi_\kappa = (v / \ell) (\alpha_o t + (1/2) k t^2)$
 $\varphi_\kappa = (2,78 / 1,117) \cdot (0 + (1/2) \cdot 0,0333 \cdot 2,2^2) = 0,200$ рад = $11,49^\circ$. Далі поділяємо час

входу в поворот $t = 2,2$ с на інтервали, обчислюємо за формулами (2.37) для кожного значення t координати x_i і y_i в системі координат x_1y_1 і відповідні їм значення кутів α і φ за формулами (2.35), а також зведені до загальної системи координат $xу$ координати x і y за формулами (2.41). Осі x_1y_1 паралельні осям $xу$, тому приймаємо для першої ділянки $\theta_1 = 0$. Результати розрахунків наведені в таблиці 4.17.

Таблиця 4.17 – Вхід в лівий поворот

№ з/н	t, c	x_i, m	y_i, m	$\alpha, рад$	$\alpha, град$	$\varphi, рад$	$\varphi, град$	R, m	S, m	x, m	y, m
1	0	0	0	0	0	0	0	∞	0	0	9,42
2	0,55	1,53	7,34	0,018	1,05	0,0125	0,718	60,98	1,53	1,53	9,44
3	1,10	3,05	7,43	0,0366	2,1	0,050	2,872	30,49	3,05	3,05	9,53
4	1,65	4,57	7,62	0,0549	3,15	0,113	6,463	20,33	4,58	4,57	9,72
5	2,20	6,06	7,95	0,0733	4,2	0,200	11,489	15,24	6,11	6,06	10,05

Вихід з лівого повороту. Значення курсового кута на початку і в кінці ділянки: $\alpha_o = 0,0733$ рад = $4,2^\circ$, $\alpha_k = 0$. Приймаємо час виходу з повороту $t = 2,2$ с. Тоді коефіцієнт інтенсивності $k = (\alpha_k - \alpha_o)/t = (0 - 0,0733)/2,2 = -0,0333$ с⁻¹. Осі x_2y_2 повернуті відносно осей $xу$ на кут $\theta_2 = \varphi_{k1} = 11,49^\circ$. Результати розрахунків – у таблиці 4.18.

Таблиця 4.18 – Вихід з лівого повороту

№ з/н	t, c	x_i, m	y_i, m	$\alpha, рад$	$\alpha, град$	$\varphi, рад$	$\varphi, град$	R, m	S, m	x, m	y, m
1	0	0	0	0,073	4,2	0	0	15,25	0	6,06	10,05
2	0,55	1,52	0,17	0,055	3,15	0,088	5,03	20,33	1,53	7,51	10,52
3	1,10	3,02	0,42	0,037	2,1	0,150	8,62	30,49	3,05	8,94	11,07
4	1,65	4,52	0,73	0,018	1,05	0,189	10,77	60,98	4,58	10,35	11,66
5	2,20	6,02	1,04	0	0	0,200	11,49	∞	6,11	11,75	12,27

Вхід в правий поворот. Приймаємо $\alpha_o = 0$, $t = 2,6$ с, $\alpha_k = \alpha_o + kt$, $k = -0,03019$ с⁻¹, $\alpha_k = 0 - 0,03019 \cdot 2,6 = -0,0785$ рад = $-4,5^\circ$. Осі x_3y_3 повернуті відносно осей $xу$ на кут $\theta_3 = \theta_2 + \varphi_2 = 11,49 + 11,49 = 22,98^\circ$. Результати розрахунків – в таблиці 4.19.

Таблиця 4.19 – Вхід в правий поворот

№ з/н	t, c	$x_i, м$	$y_i, м$	$\alpha, рад$	$\alpha, град$	$\varphi, рад$	$\varphi, град$	$R, м$	$S, м$	$x, м$	$y, м$
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11,75	12,27
2	0,65	1,80	-0,03	-0,019	-1,125	-0,016	-0,91	56,92	1,81	13,42	12,95
3	1,30	3,61	-0,15	-0,039	-2,25	-0,063	-3,64	28,46	3,61	15,13	13,54
4	1,95	5,39	-0,42	-0,059	-3,375	-0,143	-8,18	18,97	5,42	16,88	13,99
5	2,60	7,13	-0,89	-0,079	-4,5	-0,254	-14,55	14,23	7,22	18,66	14,23

Правий поворот. Приймаємо $\alpha_k = \alpha_o = -0,079 \text{ рад} = -4,5^\circ$; $k = 0$; $t = 17,4 \text{ с}$;
 $\varphi_k = -194,72^\circ$. Осі $x_4 y_4$ повернуті відносно осей $x y$ на кут
 $\theta_4 = \theta_3 + \varphi_3 = 22,98 - 14,55 = 8,43^\circ$. Результати розрахунків наведені в таблиці 4.20.

Таблиця 4.20 – Правий поворот

№ з/н	t, c	$x_i, м$	$y_i, м$	$\varphi, рад$	$\varphi, град$	$R, м$	$S, м$	$x, м$	$y, м$
1	0	0	0	0	0	-14,23	0	18,67	14,23
2	2,175	5,74	-1,72	-0,424	-24,34	-14,23	6,04	24,60	13,37
3	4,35	10,27	-5,65	-0,849	-48,68	-14,23	12,08	29,65	10,14
4	6,525	12,78	-11,10	-1,274	-73,02	-14,23	18,12	32,93	5,12
5	8,7	12,81	-17,10	-1,698	-97,36	-14,23	24,17	33,84	-0,81
6	10,875	10,38	-22,58	-2,123	-121,7	-14,23	30,21	32,24	-6,58
7	13,05	5,90	-26,57	-2,547	-146,04	-14,23	36,25	28,39	-11,19
8	15,225	0,18	-28,36	-2,972	-170,38	-14,23	42,29	22,99	-13,79
9	17,4	-5,78	-27,63	-3,397	-194,72	-14,23	48,33	17,00	-13,95

Вихід з правого повороту. Значення курсового кута на початку і в кінці ділянки:
 $\alpha_o = -0,079 \text{ рад} = -4,5^\circ$, $\alpha_k = 0$. Приймаємо час виходу з повороту $t = 2,8 \text{ с}$. Тоді
коефіцієнт інтенсивності $k = 0,2804 \text{ с}^{-1}$. Осі $x_5 y_5$ повернуті відносно осей $x y$ на кут
 $\theta_5 = \theta_4 + \varphi_4 = 8,43 - 194,72 = -186,29^\circ$. Результати розрахунків – у таблиці 4.21.

Таблиця 4.21 – Вихід з правого повороту

№ з/п	t , с	x_i , м	y_i , м	α , рад	α , град	φ , рад	φ , град	R , м	S , м	x , м	y , м
1	0	0	0	-0,078	-4,5	0	0	-14,23	0	16,99	-13,95
2	0,70	1,93	-0,25	-0,059	-3,375	-0,120	-6,85	-18,97	1,94	15,11	-13,49
3	1,40	3,83	-0,67	-0,039	-2,25	-0,205	-11,75	-28,46	3,89	13,27	-12,87
4	2,10	5,70	-1,18	-0,020	-1,125	-0,256	-14,69	-56,92	5,83	11,46	-12,16
5	2,80	7,57	-1,72	0	0	-0,273	-15,67	∞	7,78	9,66	-11,42

Вхід в лівий поворот. Значення курсового кута на початку і в кінці ділянки: $\alpha_o = 0$, $\alpha_k = 0,06978 \text{ рад} = 4,0^\circ$. Приймаємо час виходу з повороту $t = 2,0$ с. Тоді коефіцієнт інтенсивності $k = 0,03489 \text{ с}^{-1}$. Осі x_6, y_6 повернуті відносно осей x_u на кут $\theta_6 = \theta_5 + \varphi_5 = -186,29 - 15,67 = -201,96^\circ$. Результати розрахунків – у таблиці 4.22.

Таблиця 4.22 – Вхід в лівий поворот

№ з/п	t , с	x_i , м	y_i , м	α , рад	α , град	φ , рад	φ , град	R , м	S , м	x , м	y , м
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9,66	-11,42
2	0,5	1,39	0,017	0,017	1	0,0108	0,622	64,03	1,39	8,36	-10,92
3	1,0	2,78	0,089	0,035	2	0,0434	2,487	32,016	2,78	7,05	-10,47
4	1,5	4,15	0,245	0,052	3	0,0980	5,595	21,34	4,17	5,71	-10,10
5	2,0	5,52	0,515	0,070	4	0,1735	9,947	16,008	5,56	4,34	-9,84

Вихід з лівого повороту. Значення курсового кута на початку і в кінці ділянки: $\alpha_o = 0,06978 \text{ рад} = 4^\circ$, $\alpha_k = 0^\circ$. Приймаємо час виходу з повороту $t = 2,0$ с. Тоді коефіцієнт інтенсивності $k = (\alpha_k - \alpha_o)/t = (0 - 0,06978)/2,0 = -0,03489 \text{ с}^{-1}$. Осі x_7, y_7 повернуті відносно осей x_u на кут $\theta_7 = \theta_6 + \varphi_6 = -201,96 + 9,95 = -192,00^\circ$. Результати розрахунків – у таблиці 4.23.

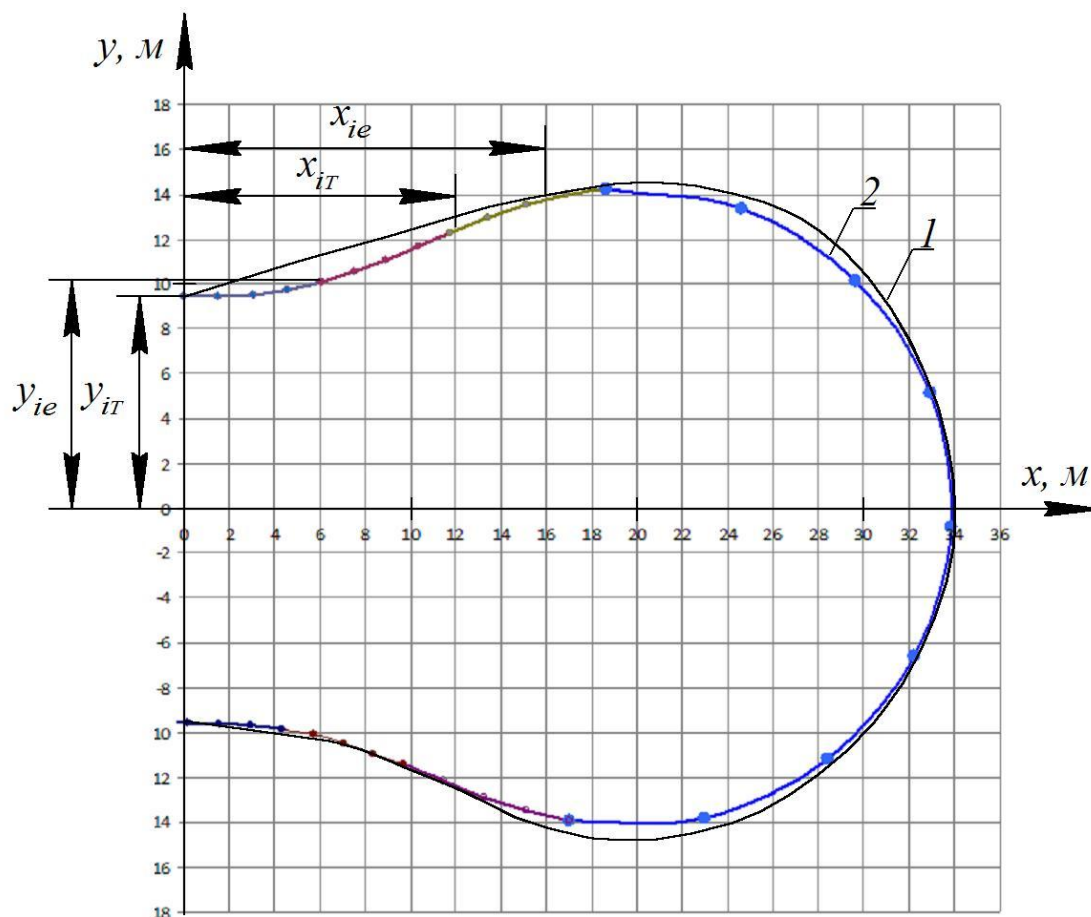
Таблиця 4.23 – Вихід з лівого повороту

№ з/п	t , с	x_i , м	y_i , м	α , рад	α , град	φ , рад	φ , град	R , м	S , м	x , м	y , м
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	0	0	0,067	4	0	0	16,01	0	4,34	-9,84
2	0,5	1,38	0,14	0,052	3	0,076	4,35	21,34	1,39	2,96	-9,70

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
3	1,0	2,75	0,35	0,035	2	0,130	7,46	32,02	2,78	1,58	-9,61
4	1,5	4,12	0,59	0,017	1	0,163	9,33	64,03	4,17	0,19	-9,57
5	2,0	5,49	0,84	0	0	0,174	9,95	∞	5,56	-1,20	-9,53

4.4.2. Результат використання супутникової навігаційної системи при відтворенні грушоподібного розвороту на тракторі New Holland T8050 з бороною Соломія БШН-17 на сільськогосподарських угіддях СТОВ «Вікторія» Краснопільського району Сумської області.

Далі наведені траєкторія розвороту трактора New Holland T8050 з бороною Соломія БШН-17, яка отримана за допомогою супутникової навігаційної системи, разом з теоретичною траєкторією (рис. 4.15) і результати визначення їх параметрів.



1 – експериментальна траєкторія, 2 – теоретична траєкторія.

Рисунок 4.15. Експериментальна та теоретична траєкторії грушоподібного розвороту з довжиною $S = 86,67$ м та часом розвороту $t = 31,2$ с трактора New Holland T8050 з бороною Соломія БШН-17 розвороту.

Результати розрахунків середньоквадратичного відхилення для траєкторій, побудованих з використанням супутникової навігаційної системи (таблиця 4.24): $\sigma_x=10,35$ м, $\sigma_y=11,48$ м [7].

Таблиця 4.24 – Результати розрахунку середньоквадратичного відхилення траєкторій розвороту.

N з/П	$x_{ie},$ м	$t,$ с	$x_{it},$ м	$x,$ м	$y_{ie},$ м	$y_{it},$ м	$y,$ м	$(x_{ne} - x)^2$	$(y_{ne} - y)^2$	σ_x	σ_y
1.	3,08	1,1	3,08	18,096	10,38	9,65	0,492	225,48	97,77	10,35	11,48
2.	6,00	2,2	6,00		11,346	10,0		146,31	117,81		
3.	9,04	3,3	9,04		12,115	11,15		82,01	135,09		
4.	11,73	4,4	11,73		12,88	12,31		40,53	153,46		
5.	15,19	5,7	15,19		13,846	13,46		8,44	178,33		
6.	18,65	7,0	18,65		14,42	14,23		0,31	193,99		
7.	24,61	9,175	24,61		13,85	13,46		42,43	178,44		
8.	29,61	11,35	29,61		10,77	10,19		132,57	105,64		
9.	33,08	13,525	33,08		5,19	5,19		224,52	22,07		
10.	34,0	15,7	34,0		-0,77	-0,77		252,94	1,59		
11.	32,3	17,875	32,3		-6,54	-6,54		201,75	49,45		
12.	28,46	20,05	28,46		-11,54	-11,15		107,41	144,77		
13.	23,07	22,225	23,07		-14,42	-13,85		24,74	222,37		
14.	23,07	24,4	23,07		-14,42	-13,85		24,74	222,37		
15.	13,07	25,8	13,07		-12,9	-12,9		25,26	179,35		
16.	9,61	27,2	9,61		-11,35	-11,35		72,01	140,23		
17.	6,92	28,2	6,92		-10,38	-10,38		124,90	118,20		
18.	4,23	29,2	4,23		-9,99	-9,99		192,27	109,87		

Таким чином, взагалі експериментально відтворені траєкторії розвороту на тракторі New Holland T8050 з використанням супутникової навігаційної системи показали повну ідентичність і достатню схожимість експериментальних і теоретичних траєкторій. Для кількісної оцінки їх відповідності необхідно скористатися середньоквадратичними показниками відхилень координат відтворених траєкторій від розрахункових.

Висновки по розділу 4.

Практичне використання рівнянь розрахунку траєкторії руху агрегату, дає можливість пошуку оптимальних показників кінематичних режимів, на мінімально можливого часу виконання маневру, що є регулятором якісного виконання технологічного процесу.

Відслідковування траєкторії зміни руху будь-якого агрегату при виконанні різних польових операцій можливе з використанням оптимальних залежностей, що характеризує їх універсальність.

Програмування для систем автоматичного водіння агрегату може бути реалізовано шляхом оцифрування оптимальних залежностей, що дають можливість уникнути неточностей і помилок при виконанні маневрів агрегату і значно підвищити ефективність використання техніки.

Список використаних джерел.

1. Статистична обробка експериментальних даних: Навчальний посібник / О.П. Мельниченко, І.Л. Якименко, Р.Л. Шевченко – Біла Церква, 2006. -ци с.
2. Методологія та організація наукових досліджень: Конспект лекцій / Укладач В.М. Кислий. – Суми: Вид-во СумДУ, 2009.-113 с.
3. 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.
4. А-GPS Tracker [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.giobat.troviamoci&hl=ru&gl=US>
5. ТРАКТОР NEW HOLLAND T8050 - ЭТАЛОН КАЧЕСТВА И НАДЕЖНОСТИ [Електронний ресурс] // Agromania. – 2016. – Режим доступу до ресурсу: <https://agromania.com.ua/traktor-new-holland-t8050-etalon-kachestva-i-nadezhnosti/>.
6. Борона зубовая тяжелая БШН-17 «Соломия» [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://galmash.com.ua/products/borona-zubovaya-tyazhelyaya-bshn-17-solomiya>.
7. 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. Бакарджиєв, 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.).

РОЗДІЛ 5

ЕФЕКТИВНІ ПРИЙОМИ ВИКОРИСТАННЯ ПОЛЬОВИХ АГРЕГАТІВ ТА НАРОДНО-ГОСПОДАРСЬКЕ ЗНАЧЕННЯ

5.1. Аналіз відомих методик техніко-експлуатаційних показників використання польового агрегату.

Ефективність роботи машинного агрегату (МА) визначається агротехнічними, енергетичними та екологічними показниками трактора та сільськогосподарських машин, правильністю підбору, правильним агрегуванням, налагодженням їх та вибором раціональних режимів роботи. Одним з основних режимів роботи є: швидкість руху; величина завантаження двигуна. На швидкісний режим роботи впливають такі фактори, як агротехнічні вимоги до технологічної операції, потужність двигуна. Завдання агрегування зводиться, до знаходження оптимального швидкісного режиму роботи, з урахуванням наведених вище факторів [1].

Оптимальне агрегування – це раціональне поєднання робочої швидкості і конструктивних особливостей МА, при якому забезпечується економний режим роботи трактора в зоні максимального значення тягового ККД з використанням потужності біля 90 %.

Одним із найважливіших показників функціонування того чи іншого машинно-тракторного агрегату є продуктивність його роботи ($\omega_{зм}$), (га/год.) . Для її визначення найчастіше використовують наступну загальновідому формулу [1, 2, 17-20]:

$$\omega_{зм} = 0,1B_p V_p \tau, \quad (5.1)$$

де V_p – робоча швидкість агрегату, (км/год.);

B_p – робоча ширина захвату МТА, (м);

τ – коефіцієнт використання часу зміни машинно-тракторного агрегату;

При розв'язанні проблеми збільшення продуктивності роботи агрегату ($\omega_{зм}$) одні дослідники віддають перевагу підвищенню швидкості руху МТА [1, 3-6], інші – збільшенню його робочої ширини захвату [1, 7-11]. Є дослідження, у яких науковці вбачають перспективу у одночасній зміні (збільшенні) параметрів V_p і B_p [12, 13].

Цілком зрозуміло, що поза увагою наукової спільноти не залишилось питання зростання продуктивності роботи МТА шляхом удосконалення процесу організації його роботи [1, 14, 15], яке у виразі (5.1) однозначно репрезентує коефіцієнт τ .

Водночас, практично усі науковці обмежують свою задачу установленням оптимальних значень швидкості руху (V_p) і ширини захвату (B_p) машинно-тракторного агрегату. Але ж аналіз виразу (5.1) показує, що величина $\omega_{зм}$ оптимуму не має. Звідси виходить, що для установлення перспектив збільшення продуктивності роботи МТА потрібен інший методичний підхід – зменшення довжини холостого переміщення на поворотних полосах.

Вибір робочої швидкості МА V_p , (км/год.).

Робоча швидкість повинна бути в межах агротехнічно допустимого діапазону швидкостей для конкретного агрегату і конкретної технологічної операції (в межах 8-12 км/год.), забезпечуватись потужністю двигуна енергетичного засобу та відповідною передачею [16, 17-20]:

$$V_p = V_T \left(1 - \frac{\delta}{100} \right), \quad (5.2)$$

де V_p – робоча швидкість агрегату, (км/год.);

V_T – теоретична швидкість руху на даній передачі, (км/год.);

δ – буксування рушіїв на вибраних передачах, %.

Питомий опір робочих машин при певній робочій швидкості, k , (кН/м):

$$k = k_0 \left[1 + \frac{\Delta k}{100} (V_p - V_0) \right], \quad (5.3)$$

де Δk – темп приросту питомого опору при збільшенні швидкості руху агрегату на 1 км/год., %; $\Delta k = 2 \dots 4\%$ темп приросту питомого опору при збільшенні швидкості руху агрегату вище 5 км/год. на 1 км/год.

Загальний опір робочої машини в складі агрегату, R_a (кН):

$$R_a = \sum_{i=1}^{s=n} R_{a_i} = kB_{\kappa}n + G_M \left(f + \frac{i}{100} \right), \quad (5.4)$$

де B_{κ} – конструктивна ширина захвату однієї робочої машини (у нашому випадку борони); n – кількість робочих машин в агрегаті; G_M – вага сільськогосподарської машини, кН; f – коефіцієнт опору кочення сільськогосподарських машин для свіжозораного поля; i – схил місцевості, %.

Коефіцієнт використання тягового зусилля $\eta_{\text{зак}}$ на вибраних передачах:

$$\eta_{\text{зак}} = \frac{R_a}{P_{\text{зак}}}, \quad (5.5)$$

де $P_{\text{зак}}$ – тягове зусилля трактора на вибраних передачах, кН.

Коефіцієнт використання часу зміни τ в продуктивності агрегату за одиницю змінного часу [1, 17-22]:

$$\tau = \frac{T_p}{T_{\text{зм}}}, \quad (5.6)$$

де T_p – час чистої (основної) роботи, год.;

$T_{\text{зм}}$ – тривалість зміни, год. (для шкідливих умов $T_{\text{зм}} = 6$ год., для звичайних $T_{\text{зм}} = 7$ год.).

Кількість циклів за зміну, $n_{\text{ц}}$:

$$n_{\text{ц}} = \frac{T_{\text{зм}} - \sum T_{\text{нц}}}{t_{\text{ц}}}, \quad (5.7)$$

де $\sum T_{\text{нц}}$ – сума позациклових простоїв за зміну, що включає підготовчо – заключний час, час на виконання технічного і технологічного обслуговування агрегатів, час на власні потреби (задається нормативно). $\sum T_{\text{нц}} = 0,42$ год.;

$t_{\text{ц}}$ – тривалість циклу, год.;

Тривалість циклу дорівнює:

- для агрегатів, що не мають технологічних місткостей:

$$t_u = t_p + t_x = \frac{\ell_p}{V_p} + \frac{\ell_x}{V_x}, \quad (5.8)$$

де 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:

$$\ell_p = L - 2E, \text{ м}, \quad (5.9)$$

де L – довжина поля, м; E – ширина поворотної смуги, м.

При петлевих грушоподібних поворотах:

$$E = 2,8R_n + 0,5d_k + e, \text{ м}, \quad (5.10)$$

де 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:

$$e = (0,6 \dots 1,0)\ell_k = 0,7(\ell_{mp} + \ell_{\text{бор}}), \text{ м}, \quad (5.11)$$

де ℓ_k – кінематична довжина агрегату, м.

Після визначення розрахункового значення ширини поворотної смуги E фактичне її значення приймається із умови:

$$E_{\text{омн}} = nB_p \geq E, \text{ м}, \quad (5.12)$$

де n – коефіцієнт кратності ($n = 2, 4 \dots i$).

Середня довжина повороту агрегату ℓ_x , що приходить на один робочий прохід для різних способів руху грушоподібний петлевий поворот:

$$\ell_x = 6R_n + 2e, \text{ м}. \quad (5.13)$$

Коефіцієнт використання робочих ходів φ :

$$\varphi = \frac{\ell_p}{\ell_p + \ell_x}. \quad (5.14)$$

Чистий час роботи агрегату за зміну, T_p , (год.): $T_p = t_p \cdot n_u$, год.

Час поворотів за зміну, T_x , (год.): $T_x = t_x \cdot n_u$, год.

Витрати палива на одиницю площі, G_{za} , (кг/га) [1, 16-25]:

$$G_{za} = \frac{G_p T_p + G_x T_x + G_{nep} T_{nep} + G_3 T_3}{\omega_{zm} T_{zm}}, \quad (5.15)$$

де G_p, G_x, G_{nep}, G_3 – годинна витрата палива, відповідно, при виконанні технологічного процесу, на поворотах, переїздах, зупинках з працюючим двигуном, кг/год.;

T_p, T_x, T_{nep}, T_3 – тривалість, відповідно, чистого часу зміни, поворотів, переїздів, зупинок з працюючим двигуном, год.

Аналізуючи всі відомі нам методики розрахунку техніко-економічних показників використання агрегату [1, 16-26] основними показниками ефективності використання польового агрегату являються продуктивність ω_{zm} , τ – коефіцієнт використання часу зміни машинно-тракторного агрегату; витрати палива на одиницю площі G_{za} та коефіцієнт використання робочих ходів φ , які безпосередньо або опосередковано залежать від довжини холостого переміщення на поворотних полосах.

5.2. Народногосподарське значення на прикладі New Holland T8050 з бороною «Соломія» БШН-17.

Народногосподарське значення було розраховано та проілюстровано на основі агрегату New Holland T8050 з зубовою важкою напівпричіпною шлейф-бороною «Соломія» БШН-17. Боронування (закриття вологи) проводилось на полях СТОВ «Вікторія» Краснопільського району Сумської області. Основа поля – типовий чорнозем.

Умови роботи польового агрегату при виконанні боронування.

Боронування (закриття вологи) проводилось на полях СТОВ «Вікторія», яке розташоване вул. Сумська, буд 1а, село Великий Бобрик Краснопільського району Сумської області.

Умови роботи борони:

- площа поля 50 га, довжина $L=628$ м, ширина $B=796$ м.
- схил місцевості $i = 4$ %;
- ґрунти – типові чорноземи;

Вид руху агрегату – човниковий, розворот – грушоподібний с закритою петлею з наступними параметрами: шириною захвату 17 м і мінімальним радіусом повороту $R = 5,0$ м. Швидкість руху по криволінійній траєкторії $v = 10$ км/год. $\approx 2,78$ м/с.

Розрахунок техніко-економічних показників польового агрегату згідно методики (додатку Г).

5.3. Обґрунтування ефективності автоматичного водіння з урахуванням розроблених уточнених алгоритмів управління криволінійним рухом.

Повний розворот складається з наступних елементів-маневрів: вхід в лівий поворот, вихід з лівого повороту, вхід в правий поворот, колова траєкторія (правий поворот), вихід з правого повороту, вхід в лівий поворот, вихід з лівого повороту.

Ілюстрація ефективності автоматичного водіння з використанням уточнених алгоритмів при розвороті на прикладі трактора New Holland T8050 з «Соломія» БШН-17 в таблиці 5.1. та 5.2 та рисунок 5.1.

Таблиця 5.1 – Запропонована траєкторії розвороту 2 з використанням запропонованих алгоритмів (рис. 5.1) з довжиною $\ell_n = 120,43$ м для

Вхід в лівий поворот											
v , м/с	ℓ , м	R_{\min} , м	α_k , рад	α_k , град	k , с ⁻¹	α_o , рад	α_o , град	t , с			
2,778	1,117	5,0	0,087	5	0,0436	0	0	2			
№ з/П	t , с	x_i , м	y_i , м	α , рад	α , град	φ , рад	φ , град	R , м	S , м	x , м	y , м
1	0	0	9,42	0	0	0	0	∞	0	0	9,42
2	1,0	2,77	9,53	0,0436	2,5	0,054	3,11	25,61	2,78	2,77	9,53
3	2,0	5,50	10,06	0,0872	5,0	0,217	12,43	12,81	5,56	5,50	10,06

<i>Вихід з лівого повороту</i>											
v , м/с	l , м	R_{\min} , м	α_{κ} , рад	α_{κ} , град	k , с ⁻¹	α_o , рад	α_o , град	t , с			
2,778	1,117	5,0	0	0	-0,0436	0,0872	5,00	2			
№ з/п	t , с	x_i , м	y_i , м	α , рад	α , град	φ , рад	φ , град	R , м	S , м	x , м	y , м
1	0	0	0	0,087	5,00	0	0	12,81	0	5,50	10,06
2	1,0	2,74	0,43	0,044	2,50	0,163	9,33	25,61	2,78	8,08	11,08
3	2,0	5,45	1,05	0	0	0,217	12,44	∞	5,56	10,6	12,26
<i>Вхід в правий поворот</i>											
v , м/с	l , м	R_{\min} , м	α_{κ} , рад	α_{κ} , град	k , с ⁻¹	α_o , рад	α_o , град	t , с			
2,778	1,117	5,0	-0,0802	-4,6	-0,0401	0	0	2			
№ з/п	t , с	x_i , м	y_i , м	α , рад	α , град	φ , рад	φ , град	R , м	S , м	x , м	y , м
1	0	0	0	0	0	0	0	∞	0	10,60	12,26
2	1,0	2,78	-0,10	-0,04	-2,30	-0,05	-2,86	-27,84	2,78	13,16	13,33
3	2,0	5,51	-0,59	-0,08	-4,6	-0,20	-11,44	-13,92	5,56	15,84	14,04
<i>Правий поворот</i>											
v , м/с	l , м	R_{\min} , м	α_{κ} , рад	α_{κ} , град	k , с ⁻¹	α_o , рад	α_o , град	t , с			
2,778	1,117	5,0	-0,0802	-4,6	0	-0,0802	-4,6	17,2			
№ з/п	t , с	x_i , м	y_i , м	α , рад	α , град	φ , рад	φ , град	R , м	S , м	x , м	y , м
1	0	0	0	-0,0802	-4,60	0	0	-13,92	0	15,84	14,04
2	5,0	11,15	-7,29	-0,0802	-4,60	-0,998	-57,20	-13,92	13,89	28,38	9,53
3	11,0	9,49	-22,89	-0,0802	-4,60	-2,195	-125,84	-13,92	30,56	30,38	-13,51
4	17,2	-6,17	-26,85	-0,0802	-4,60	-3,433	-196,77	-13,92	47,78	16,08	14,04
<i>Вихід з правого повороту</i>											
v , м/с	l , м	R_{\min} , м	α_{κ} , рад	α_{κ} , град	k , с ⁻¹	α_o , рад	α_o , град	t , с			
2,778	1,117	5,0	0	0	0,02675	-0,0802	-4,60	3			
№ з/п	t , с	x_i , м	y_i , м	α , рад	α , град	φ , рад	φ , град	R , м	S , м	x , м	y , м
1	0	0	0	-0,0802	-5	0	0	-13,92	0	16,08	-13,51
2	1,5	4,16	-0,77	-0,0401	-2,30	-0,225	-12,87	-27,84	4,17	11,96	-12,50
3	3,0	8,27	-2,00	0	0	-0,299	-17,16	∞	8,33	7,94	-11,05
<i>Вхід в лівий поворот</i>											
v , м/с	l , м	R_{\min} , м	α_{κ} , рад	α_{κ} , град	k , с ⁻¹	α_o , рад	α_o , град	t , с			
2,778	1,117	5,0	0,0698	4	0,03489	0	0	2			
№ з/п	t , с	x_i , м	y_i , м	α , рад	α , град	φ , рад	φ , град	R , м	S , м	x , м	y , м
1	0	0	0	0	0	0	0	∞	0	7,94	-11,05
2	1,0	2,78	0,09	0,0349	2,00	0,043	2,49	32,02	2,78	5,30	-10,16
3	2,0	5,52	0,52	0,0698	4,00	0,174	9,95	16,01	5,56	2,58	-9,61

<i>Вихід з лівого повороту</i>											
v , м/с	ℓ , м	R_{\min} , м	α_k , рад	α_k , град	k , с ⁻¹	α_o , рад	α_o , град	t , с			
2,778	1,117	5,0	0	0	-0,0349	0,0698	4	2			
№ з/п	t , с	x_i , м	y_i , м	α , рад	α , град	φ , рад	φ , град	R , м	S , м	x , м	y , м
1	0	0	0	0,070	4,00	0	0	16,01	0	2,58	-9,61
2	1,0	2,76	0,3463	0,035	2,00	0,130	7,46	32,02	2,78	-0,19	-9,45
3	2,0	5,49	0,8366	0,000	0,00	0,174	9,95	∞	5,56	-2,97	-9,43

Таблиця 5.2 – Запропонована траєкторія розвороту 3 з використанням запропонованих алгоритмів (рис. 5.1) з довжиною $\ell_n = 113,76$ м

<i>Вхід в лівий поворот</i>											
v , м/с	ℓ , м	R_{\min} , м	α_k , рад	α_k , град	k , с ⁻¹	α_o , рад	α_o , град	t , с			
2,778	1,117	5,0	0,087	5	0,0436	0	0	2			
№ з/п	t , с	x_i , м	y_i , м	α , рад	α , град	φ , рад	φ , град	R , м	S , м	x , м	y , м
1	0	0	9,42	0	0	0	0	∞	0	0	9,42
2	1,0	2,77	9,53	0,0436	2,5	0,054	3,11	25,61	2,78	2,77	9,53
3	2,0	5,50	10,06	0,0872	5,0	0,217	12,43	12,81	5,56	5,50	10,06
<i>Вихід з лівого повороту</i>											
v , м/с	ℓ , м	R_{\min} , м	α_k , рад	α_k , град	k , с ⁻¹	α_o , рад	α_o , град	t , с			
2,778	1,117	5,0	0	0	-0,0436	0,0872	5,0	2			
№ з/п	t , с	x_i , м	y_i , м	α , рад	α , град	φ , рад	φ , град	R , м	S , м	x , м	y , м
1	0	0	0	0,087	5,0	0	0	12,81	0	5,50	10,06
2	1,0	2,74	0,43	0,044	2,5	0,163	9,33	25,61	2,78	8,08	11,08
3	2,0	5,45	1,05	0	0	0,217	12,44	∞	5,56	10,6	12,26
<i>Вхід в правий поворот</i>											
v , м/с	ℓ , м	R_{\min} , м	α_k , рад	α_k , град	k , с ⁻¹	α_o , рад	α_o , град	t , с			
2,778	1,117	5,0	-0,0872	-5	-0,0436	0	0	2			
№ з/п	t , с	x_i , м	y_i , м	α , рад	α , град	φ , рад	φ , град	R , м	S , м	x , м	y , м
1	0	0	0	0	0	0	0	∞	0	10,60	12,26
2	1,0	2,77	-0,11	-0,044	-2,5	-0,054	-3,11	-25,61	2,78	13,16	13,32
3	2,0	5,50	-0,64	-0,087	-5,0	-0,217	-12,44	-12,81	5,56	15,85	13,98
<i>Правий поворот</i>											
v , м/с	ℓ , м	R_{\min} , м	α_k , рад	α_k , град	k , с ⁻¹	α_o , рад	α_o , град	t , с			
2,778	1,117	5,0	-0,087	-5	0	-0,0872	-5,0	15,8			

№ з/п	t, c	x_i, m	y_i, m	$\alpha, рад$	$\alpha, град$	$\varphi, рад$	$\varphi, град$	R, m	S, m	x, m	y, m
1	0	0	0,00	-0,0872	-5,0	0	0	-12,8	0	15,85	13,98
2	5,0	10,69	-7,78	-0,0872	-5,0	-1,085	-62,18	-12,8	13,89	27,96	8,68
3	10,0	8,80	-20,87	-0,0872	-5,0	-2,169	-124,35	-12,8	27,78	28,94	-4,50
4	15,8	-5,78	-24,68	-0,0872	-5,0	-3,427	-196,47	-12,8	43,89	15,52	-11,36
<i>Вихід з правого повороту</i>											
$v, m/c$	ℓ, m	R_{min}, m	$\alpha_k, рад$	$\alpha_k, град$	k, c^{-1}	$\alpha_o, рад$	$\alpha_o, град$	t, c			
2,778	1,117	5,0	0	0	0,04361	-0,0872	-5,0	2			
№ з/п	t, c	x_i, m	y_i, m	$\alpha, рад$	$\alpha, град$	$\varphi, рад$	$\varphi, град$	R, m	S, m	x, m	y, m
1	0	0	0	-0,0872	-5	0	0	-12,81	0	15,52	-11,36
2	1,0	2,77	-0,43	-0,0436	-2,50	-0,163	-9,33	-25,61	2,78	12,78	-10,74
3	2,0	5,53	-1,05	0	0	-0,217	-12,44	∞	5,56	10,07	-9,94
<i>Вхід в лівий поворот</i>											
$v, m/c$	ℓ, m	R_{min}, m	$\alpha_k, рад$	$\alpha_k, град$	k, c^{-1}	$\alpha_o, рад$	$\alpha_o, град$	t, c			
2,778	1,117	5,0	0,0698	4	0,03489	0	0	2			
№ з/п	t, c	x_i, m	y_i, m	$\alpha, рад$	$\alpha, град$	$\varphi, рад$	$\varphi, град$	R, m	S, m	x, m	y, m
1	0	0	0	0	0	0	0	∞	0	10,07	-9,94
2	1,0	2,78	0,09	0,0349	2,00	0,043	2,49	32,02	2,78	7,38	-9,24
3	2,0	5,52	0,52	0,0698	4,00	0,174	9,95	16,01	5,56	4,63	-8,88
<i>Вихід з лівого повороту</i>											
$v, m/c$	ℓ, m	R_{min}, m	$\alpha_k, рад$	$\alpha_k, град$	k, c^{-1}	$\alpha_o, рад$	$\alpha_o, град$	t, c			
2,778	1,117	5,0	0	0	-0,0349	0,0698	4	2			
№ з/п	t, c	x_i, m	y_i, m	$\alpha, рад$	$\alpha, град$	$\varphi, рад$	$\varphi, град$	R, m	S, m	x, m	y, m
1	0	0	0	0,070	4,00	0	0	16,01	0	4,63	-8,88
2	1,0	2,76	0,3463	0,035	2,00	0,130	7,46	32,02	2,78	1,86	-8,91
3	2,0	5,49	0,8366	0,000	0,00	0,174	9,95	∞	5,56	-0,92	-9,10

Продуктивність є одним з найважливіших техніко-економічних показників будь-якого агрегату, на підставі якої проводять нормування і планування сільськогосподарських робіт з врахуванням агротехнічних термінів їх виконання, а також розраховують відповідні витрати, включаючи заробітну плату механізаторам і допоміжним робітникам. Виходячи з цього від правильності визначення продуктивності МТА в значній мірі залежить ефективність всього сільськогосподарського виробництва. Особлива складність і актуальність задачі, що

розглядається, полягає в тому, що кожна технологічна операція, пов'язана з виробництвом сільськогосподарської продукції, повинна бути виконана у встановлені агротехнічні терміни, відхилення від яких приводить до значних втрат врожаю [16].

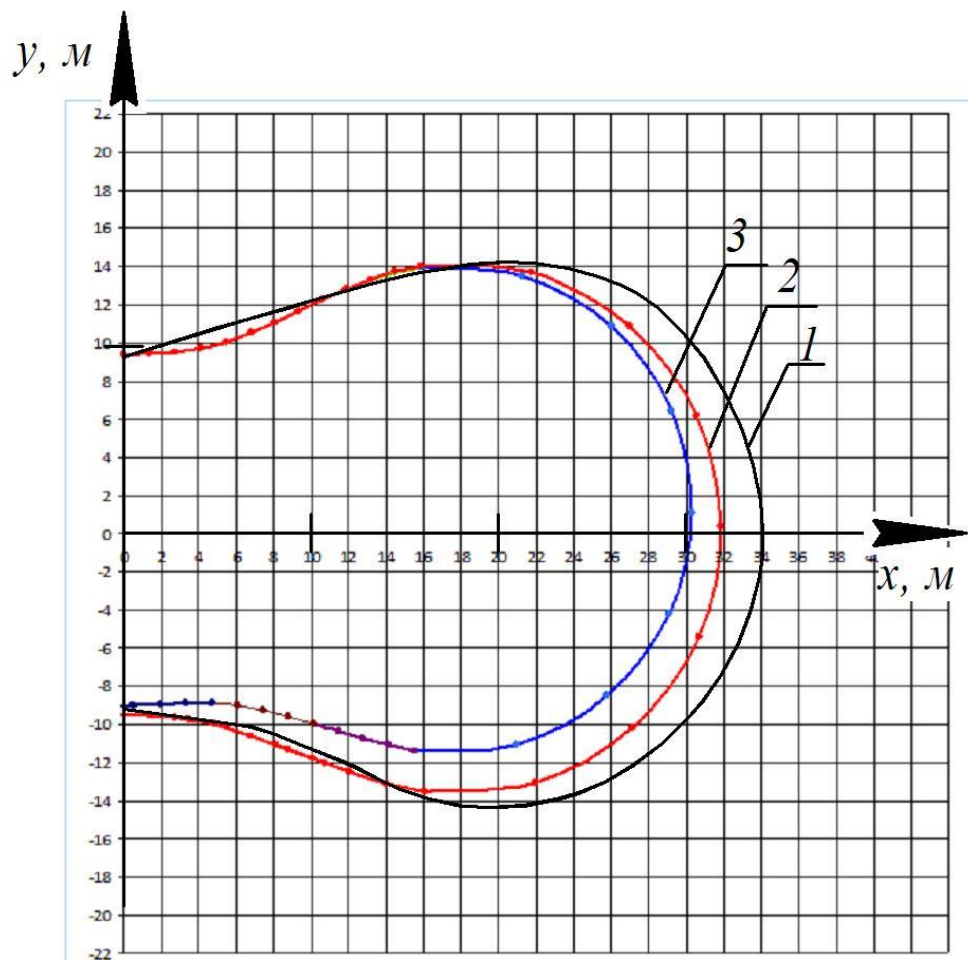


Рисунок 5.1. Ілюстрація ефективності автоматичного водіння петлевидного розвороту трактора New Holland T8050 з бороною Соломія БШН-17 при $v=10$ км/год. $\approx 2,78$ м/с: 1 – експериментальна траєкторія розвороту за допомогою ручного водіння; 2, 3 – оптимізовані траєкторії розвороту для автоматичного водіння.

Продуктивність польових машинних агрегатів значною мірою залежить від робочої ширини захвату, швидкості руху, номінальної потужності двигуна, тягового зусилля енергетичного засобу, а також від раціонального використання робочого часу. Продуктивність також визначається умовами роботи, зокрема формою та розміром ділянки, глибиною обробітку, гранулометричним складом та питомим опором ґрунту, його щільністю та вологістю, рельєфом місцевості, фізіологічними

властивостями рослин, об'ємом технологічних місткостей, маневровими властивостями агрегатів, кваліфікацією оператора тощо [28].

Одним з можливих факторів збільшення продуктивності – це оптимізація маневрових 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 5.3.

Таблиця 5.3 – Порівняльна характеристика траєкторій розвороту польового агрегату за допомогою ручного водіння та з використанням запропонованих алгоритмів для автоматичного водіння.

Характеристика	Траєкторія розвороту за допомогою ручного водіння петля 1	Оптимізована траєкторія розвороту для автоматичного водіння петля 2	Оптимізована траєкторія розвороту для автоматичного водіння петля 3
1	2	3	4
Довжина петлі ℓ_p , м	123,24	120,43	113,76
Робоча довжина заїмки, ℓ_p , м	492	496	500
Чистий час роботи агрегату за зміну, T_p (год.)	5,0624	5,0985	5,172
Час поворотів за зміну, T_x (год.)	1,518	1,481	1,41
Кількість циклів за зміну, $n_{\text{ц}}$	123,14	123,02	123,79
Коефіцієнт використання часу зміни τ	0,7232	0,7283	0,7388
Продуктивність за 1 год. змінного часу, $\omega_{\text{зм}}$ (га/год)	14,714	14,8187	15,032
Витрати палива на одиницю площі, $G_{\text{га}}$ (кг/га)	19,6811	19,6337	19,5393

1	2	3	4
Витрати палива на одиницю площі на поворотах, $G_{га}$ (кг/га)	1,5079	1,4616	1,3696
Витрати на паливо на поворотах, S_n (грн.)	2901,15	2812,14	2635,14
Економічний ефект для посівної площ Сумської області, грн.	-	1млн. 172 тис. [27] га·1,82 грн/га= 2 млн. 86 тис. грн.	1млн. 172 тис. га·5,32 грн/га= 6 млн. 235 тис. грн.

Результати розрахунків з таблиці 5.5. показують, що в результаті зменшення довжини холостого ходу на розворотах польового агрегату, нам вдалося збільшити довжину гону, збільшити коефіцієнт використання робочих ходів φ , збільшити коефіцієнт використання часу зміни τ та відповідно збільшується продуктивності за 1 год. змінного часу $\omega_{зм}$.

Висновок по розділу 5.

Аналізуючи результати проведених техніко-економічних показників агрегату трактора та отриманих характеристик розвороту агрегату за допомогою ручного водіння New Holland T8050 з бороною Соломія БШН-17 на операції боронування, та змодельованих траєкторій розвороту для автоматичного водіння з використанням уточнених алгоритмів відмічено, що зі зменшенням довжини холостого ходу на розворотах та в результаті зменшення розвортної полоси на 8 метрів збільшується коефіцієнт використання робочих ходів φ (з 0,7997 до 0,8147), збільшується коефіцієнту використання часу зміни τ (з 0,7232 до 0,7388) та відповідно збільшується продуктивності за 1 год. змінного часу $\omega_{зм}$ (з 14,714 (га/год.) до 15,032 (га/год.)).

В результаті оцінювання економічної ефективності використання змодельованих траєкторій розвороту з використанням запропонованих алгоритмів для автоматичного управління для операції боронування, який досягається за рахунок зменшення палива на розворотах, на посівних площах 1172 тисяч гектар Сумської області складає 6 млн. 235 тис. грн..

Список використаних джерел.

1. Машиновикористання в землеробстві / В.Ю. Ільченко [та ін.]; за ред. В.Ю. Ільченка, Ю.П. Нагірного. –К.: Урожай, 1996. – 384 с.
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. Сизов О.А. Анализ способов автоматического поддержания оптимальной скорости работы пахотного агрегата /О.А. Сизов, В.А. Сакур// Техника в сельском хозяйстве. – 1988. – №3. – С. 36 -37
4. Шалягин В. Н. Комплексное повышение эффективности МТА с энергонасыщенными тракторами / В.Н. Шалягин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1988. – №5. –С. 9-13.
5. Надикто В.Т. Енергонасиченість тракторів та шляхи її реалізації / В.Т. Надикто // Техніка і технології АПК.–2011.– №9. –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. Исследование МЭС в составе широкозахватных МТА на возделывании пропашных культур / Г.М. Кутьков, В.Д. Черепухин, Е.В. Габай, Л.М. Лукерчик, В.Т. Надикто // Тракторы и сельскохозяйственные машины. –1992. –№10-12.–С. 9-10.
8. Кутьков Г.М. Конструктивные параметры широкозахватных МТА на основе МЭС /Г.М. Кутьков, Е.В. Габай, В.Т. Надикто // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1994. –№4. –С. 12-16.
9. Надикто В.Т. Агрегатирование МЭС с передненавесным плугом /В.Т. Надикто // Тракторы и сельскохозяйственные машины.–1994. –№7.–С. 21-23.

10. Кутьков Г.М. Техничко-економический анализ применения МЭС на возделывании пропашных культур / Г.М. Кутьков, В.Д.Черепухин, В.Т. Надикто // Техника в сельском хозяйстве. –1997. – No2. – С. 16-18.

11. Зангиев А.А. Агрегаты с изменяемой шириной захвата / А.А. Зангиев, О.Н. Дидманидзе // Техника в сельском хозяйстве. – 1989. – No2.–С. 47-49.

12. Юдкин В.В. Оптимизация скорости движения и ширины захвата почвообрабатывающих агрегатов / В.В. Юдкин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1988. – No4. –С. 45-49.

13. Трепененков И.И. Об использовании мощности с.-х. тракторов /И.И. Трепененков, В.И. Мининзон // Тракторы и сельскохозяйственные машины. –1987. – No3.– С. 13-15.

14. Морозов А.Х. Средства повышения эксплуатационных качеств машинно-тракторных агрегатов / А.Х. Морозов, Ю.В.Дробышев, С.А. Новокщенов// Труды Волгоградского СХИ. – 1988. – No36.

15. Надикто В.Т. Вплив біодизеля на експлуатаційні показники роботи МТА/В.Т. Надикто, В.А. Дідур, В.В. Федоренко //Техніка АПК. – 2008. –1.–С. 27-29.

16. Матвієнко О.О., Крилов О.В. Методичні вказівки до виконання практичних занять з курсу "Теоретичні основи експлуатації сільськогосподарської техніки". Для студентів спеціальності 208 "Агроінженерія", спеціалізації "Технічний сервіс" ОКР магістр. Кропивницький: ЦНТУ, 2018.- 105 с.

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. Методичні вказівки з курсового проекту / Ладизьський коледж Вінницького національного аграрного університету, 2016 – 91 с.

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 агропромислового виробництва» 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. Загальна посівна площа в області під урожай 2020 року становить 1172 тисяч гектар [Електронний ресурс]. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <http://sm.gov.ua/ru/arkhiv1/21350-maslak-ploshchi.html>.

28. Як підвищити продуктивність машинних агрегатів [Електронний ресурс] // Техніка. – 2016. – Режим доступу до ресурсу: <https://agroexpert.ua/ak-pidvisiti-produktivnist-masinnih-agregativ/>.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертації наведено теоретичне узагальнення і нове вирішення наукового завдання, що виявляється в розробленій математичній моделі нелінійного руху чотирьохколісної машини з передніми керованими колесами. Це дозволило оптимізувати маневрові властивості на поворотах та покращити техніко-економічні показники машинно-тракторного агрегату на розворотних полосах шляхом скороченням довжини переміщення розвороту, скороченням ширини розвортної полоси та збільшенням довжини гону. На основі проведених теоретичних і експериментальних досліджень зроблені наступні основні висновки.

1. Аналіз існуючих графічних, аналітичних та графоаналітичних способів визначення траєкторії криволінійного руху показав, що: графічні методи дають тільки наближене рішення цієї задачі; графоаналітичні методи визначають вихідні параметри та основі характеристики повороту, а далі будується траєкторія, що затрудняє отримання траєкторії швидко і одразу; аналітичні методи використовують математичні моделі, які надто складні для використання на практиці. Для побудови траєкторії центра ваги польового агрегату криволінійного руху необхідні нові аналітичні рівняння, які враховують інтенсивність повороту керма, з подальшим використанням запропонованих алгоритмів для програмного забезпечення автоматичного водіння.

2. На основі комплексних аналітичних досліджень розроблено математичну модель нелінійного руху чотириколісної машини з передніми керованими колесами, яка враховує інтенсивність повороту через коефіцієнт пропорційності, або коефіцієнт інтенсивності зміни курсового кута, який залежить також і від границь зміни кута повороту корпусу машини. В результаті вирішення диференціальних рівнянь математичної моделі отримано нові аналітичні залежності траєкторії руху центра ваги чотириколісної машини в параметричній формі у функції кута повороту остова машини для ділянок входу в поворот і виходу з повороту, які можуть враховувати і явище відведення передніх коліс. Встановлений зв'язок між вхідними параметрами повороту агрегату та довжиною грушоподібного розвороту польового агрегату.

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

4. Згідно розробленого методу спряження складних траєкторій криволінійного руху були змодельовані траєкторії центра ваги автомобіля Renault Logan з передніми керованими колесами та експериментально відтворенні для ділянок входу в правий (лівий) поворот і виходу з правого (лівого) повороту з використанням супутникової навігаційної системи для експериментальної перевірки адекватності розробленої математичної моделі. Проведена статистична оцінка на відповідність координат експериментальної траєкторії автомобіля координатам теоретичної траєкторії, в результаті отримуємо: для треку 1 - $\sigma_x = 8,83$ м, $\sigma_y = 5,72$ м; для треку 2 - $\sigma_x = 10,33$ м, $\sigma_y = 13,13$ м.

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

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

6. В результаті моделювання та проведення польового експерименту відтворення теоретичної траєкторії центра ваги трактора МТЗ-80 на дослідних полях Сумського НАУ були експериментально отримані відтворені траєкторії лівого і

правого поворотів (вхід і вихід) та проведена статистична оцінка на відповідність координат експериментальної траєкторії координатам теоретичної траєкторії з вивченням середньоквадратичного відхилення: $\sigma_x = 2,44$ м; $\sigma_y = 1,56$ м.

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

8. В результат моделювання та використання супутникової навігаційної системи при відтворенні грушоподібного розвороту на тракторі New Holland T8050 з бороною Соломія БШН-17 на сільськогосподарських угіддях СТОВ «Вікторія» Краснопільського району Сумської області була отримана траєкторія петлевидного розвороту трактора. Статистична оцінка на відповідність координат експериментальної траєкторії координатам теоретичної траєкторії з вивченням середньоквадратичного відхилення: $\sigma_x = 10,35$ м, $\sigma_y = 11,48$ м.

Експериментально відтворена траєкторія розвороту в польових умовах показали повну ідентичність і достатню відповідність до теоретичної траєкторії, тим самим підтверджуючи достовірність математичної моделі нелінійного руху чотирьохколісної машини з передніми керованими колесами у функції кута повороту для машинно-тракторного агрегату.

10. Загальний економічний ефект від використання запропонованих алгоритмів математичної моделі нелінійного руху чотирьохколісної машини для агрегату New Holland T8050 з бороною Соломія БШН-17 для операції боронування на посівних площах 1172 тисяч гектар Сумської області складає 6 млн. 235 тис. грн., за рахунок економії пального на розворотах шляхом зменшення довжини переміщення розвороту та ширини розвортної полоси.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А.

ТЕХНІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТРАКТОРА МТЗ-80.

№ з/п	Параметр	Величина	Одиниця виміру
1	2	3	4
1	Масса конструкционная	3900	кг
2.	Масса в состоянии отгрузки с завода	4000	кг
3.	Масса эксплуатационная	4150	кг
4.	Масса максимально допустимая (полная). База	7000	кг
		2450	мм
5.	Габаритные размеры: длина	3970	мм
6.	Габаритные размеры: ширина	1970	мм
7.	Габаритные размеры: высота	2850	мм
8.	Колея по передним колесам (min)	1450	мм
9.	Колея по передним колесам (max)	1970	мм
10.	Колея по задним колесам (min)	1500	мм
11.	Колея по задним колесам (max)	2100	мм
12.	Наименьший радиус поворота	4,1	м
13.	Агротехнический просвет трактора под рукавами передних и задних полуосей, не менее	645	мм
14.	Размеры шин передних колес	13,6-20	
15.	Размеры шин задних колес	16,9R38	
16.	Удельное давление на грунт	140	кПа
17.	Емкость топливного бака	130	л
18.	Скорость движения: транспортная max	38.200001	км/ч
19.	Скорость движения: рабочая max	15.1	км/ч
20.	Двигатель ММЗ Модель Д-245.5	Тип 4-х тактный, дизельный с турбонаддувом	
21.	Число цилиндров	4	
22.	Диаметр цилиндра	110	мм
23.	Ход поршня	125	мм
24.	Рабочий объем	4,75	л
25.	Номинальная частота вращения	1800	об/мин
26.	Мощность номинальная	65 (87)	кВт (л. с.)
27.	Максимальный крутящий момент	396.799988	Н.м
28.	Коэффициент запаса крутящего момента	15	%
29.	Мощность генератора номинальная	1.15	кВт
30.	Номинальное напряжение электропотребителей бортовой электросети	12	В
31.	Номинальное напряжение системы электропуска	24	В
32.	Муфта сцепления	Сухая, однодисковая	
33.	Коробка передач	Механическая, ступенчатая	
34.	Редуктор	Механический ускоритель	
35.	Передний мост	Составной из 3-х частей	
36.	Тип колесного редуктора	Конический	

1	2	3	
37.	Тип дифференциала	Самоблокирующийся	
38.	Привод ПВМ	Два карданных вала с промежуточной опорой	
39.	Управление ПВМ	Механическое с тремя режимами работы	
40.	Задний мост		
41.	Тип колесного редуктора	Цилиндрическая бортовая передача	
42.	Тип дифференциала	Простой, конический	
43.	Тормоза	Рабочие Дисковые, сухие	
44.	Стояночные	Двухдисковый, сухой, независимый	
45.	Пневмопривод управления тормозами прицепов	Однопроводный, сблокированный с тормозами	
46.	Кабина	Унифицированная	
47.	Задний ВОМ (при номинальной частоте двигателя) 540 об/мин	независимый I	
48.	Задний ВОМ(при номинальной частоте двигателя), 1000 об/мин	независимый II	
49.	Задний ВОМ пути 3,57 об/м	синхронный I	
50.	Рулевое управление	Гидрообъемное	
51.	Тип механизма поворота	Гидроцилиндр в рулевой трапеции	
52.	Гидронавесная система (ГНС)		
53.	Тип задней ГНС	Раздельно-агрегатная	
54.	Грузоподъемность на оси шарниров нижних тяг задней ГНС	3200	кгс
55.	Количество гидровыводов задней ГНС	3 пары	
56.	Гидросистема		
57.	Тип насоса	Шестеренный	
58.	Рабочий объем насоса	32	см ³ /об
59.	Максимальное давление	20	МПа
60.	Производительность насоса	46	л/мин
61.	Емкость гидросистемы	25	л
62.	Ходовая система	Колесная	
63.	Колесная формула	4К4	

ДОДАТОК Б.

ТЕХНІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ЕНЕРГЕТИЧНОГО ЗАСОБУ
NEW HOLLAND T8050



1.	Комплектація: по передній осі	Standard
2.	Коліна формула	4WD
3.	Потужність, кВт/к.с.	223/310
4.	Довжина, мм	5829
5.	Ширина, мм	3050
6.	Висота, мм	3246
7.	Допустима загальна маса, кг	16260
8.	Колісна база, мм	3284
9.	Колія по переднім колесам, мм	1550-2270
10.	Колія по заднім колесам, мм	1520-2340
11.	Радіус повороту, мм	5000
12.	Кут повороту керованих коліс, град.	35
13.	Шини передніх коліс	600/65 R28
14.	Шини задніх коліс	710/70 R42
15.	Номінальна частота обертання, об/хв.	2200
16.	Питома витрата палива, г/кВт·год.	182

ДОДАТОК В.

ТЕХНІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ЗУБОВОЇ ВАЖКОЇ НАПІВПРИЧІПНОЇ
ШЛЕЙФ-БОРОНИ «СОЛОМІЯ» БШН-17.

1.	Призначення агрегату - догляд за посівами, руйнування ґрунтової кірки
2.	Тип агрегату - напівпричіпна
3.	Агрегується 280-300 к.с.
4.	Ширина захвату, 17 м
5.	Продуктивність за 1 годину часу, 13,6-17 га
6.	Глибина обробітку, 4-10 см
7.	Робоча швидкість, 8-10 км/год
8.	Маса борони, 6550 кг
9.	Довжина в робочому положенні, 11500 мм
10.	Ширина в робочому положенні, 18300 мм
11.	Довжина при транспортуванні, 14900 мм
12.	Кількість робочих секцій, 20 шт

ДОДАТОК Г.

РОЗРАХУНОК ТЕХНІКО-ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ
ВИКОРИСТАННЯ ПОЛЬОВОГО АГРЕГАТУ NEW HOLLAND T8050 З ЗУБОВОЮ
ВАЖКОЮ НАПІВПРИЧІПНОЮ ШЛЕЙФ-БОРОНОЮ «СОЛОМІЯ» БШН-17
ДЛЯ ОПЕРАЦІЇ БОРОНУВАННЯ.

	D	E	F	G
1	Розрахунок оптимального складу МТА при виконанні операції -		ЗАКРИТТЯ ВОЛОГИ	
2	Агротехнічні швидкості для виконання операції $V_p=9-12$ км/год (розмір поля: L=628м, B=796м)			
3	Енергетичний засіб New Holland T8050			
4	Номінальна потужність енергетичного засобу, $N_{ен}$, кВт	223	223	223
5	Номінальна частота обертання колінчастого валу, n_n , об/хв.	2200	2200	2200
6	Питома витрата палива q , г-кВт/год	245	245	245
7	Шини	710/70R42		
8	Сільськогосподарська машина	борона Соломія БШН-17		
9	передачі	IX	X	XI
10	Робоча швидкість МА V_p , км/год			
11	$V_p = V_r \left(1 - \frac{\delta}{100} \right)$	9,064	10,384	11,968
12	Теоретична швидкість V_t , км/год			
13	δ - буксування рушіїв на вибраних передачах, %, 12 - колісні 4K4; 16 - колісні 4K2	12	12	12
14	Питомий опір робочих машин при певній робочій швидкості k , (кН/м):			
15	$k = k_0 \left[1 + \frac{\Delta k}{100} (V_p - V_0) \right]$	1,395	1,458	1,534
16	$\Delta k = 2-4\%$ темп приросту питомого опору при збільшенні швидкості руху агрегату вище 5 км/год на 1 км/год. (довідник)	4	4	4
17	$k_0 = 0,7-1,2$ кН/м – борона важка (довідник)	1,2	1,2	1,2
18	$V_0 = 5$ км/год.	5	5	5
19	Загальний опір робочої машини в складі агрегату R_{Σ} (кН)			
20	$R_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n R_{\Sigma_i} = k B_{\Sigma} n + G_{\Sigma} \left(f + \frac{i}{100} \right)$	40,42	41,5	42,79
21	B_{Σ} - конструктивна ширина захвату однієї робочої машини (борони)	17	17	17
22	n - кількість робочих машин в агрегаті	1	1	1
23	$f = 0,18 \dots 0,22$ коефіцієнт опору кочення сільськогосподарських машин для свіжозораного поля (довідник)	0,22	0,22	0,22
24	i - схил місцевості, %.	4	4	4
25	G_{Σ} - вага сільськогосподарської машини, кН			
26	$G_{\Sigma} = \frac{m_{\Sigma} \cdot g}{1000}$	64,256	64,256	64,256
27	m_{Σ} - маса борони, кг	6550	6550	6550
28	g - прискорення вільного падіння, м/с ²	9,81	9,81	9,81
29	Коефіцієнт використання тягового зусилля $\eta_{\Sigma k}$ на вибраних передачах			
30	$\eta_{\Sigma k} = \frac{R_{\Sigma}}{P_{\Sigma k}}$	0,6072	0,7197	0,8635
31	$P_{\Sigma k}$ - тягове зусилля трактора на вибраних передачах, кН			
32	Радіус кочення ведучого колеса трактора, м			
33	$r_k = 0,5d + (0,8 \dots 0,9)b$	0,9807	0,9807	0,981

	D	E	F	G
34	$d=0,0254 \cdot d$ – посадочний діаметр колеса, м	1,0688	1,0688	1,067
35	b – ширина профілю шини, м (розміри з профілю в м)	0,497	0,497	0,497
36	Передатне число трансмісії колісного трактора			
37	$i_{\text{тп}} = 0,377 \frac{N_{\text{к}} r_{\text{к}}}{V_{\text{к}}}$	78,97	68,9316	59,808
38	Крутний момент $M_{\text{к}}$, (кН·м)			
39	$M_{\text{к}} = 9,55 \frac{N_{\text{к}}}{\eta_{\text{д}}}$	0,968	0,96802	0,968
40	Теоретична номінальна тягова характеристика трактора $P_{\text{кн}}$, кН			
41	$P_{\text{кн}} = \frac{M_{\text{к}} i_{\text{тп}} \eta_{\text{тп}}}{r_{\text{к}}}$	70,154	61,2365	53,132
42	$\eta_{\text{тп}}$ – ККД, що враховує втрати потужності у трансмісії	0,9	0,9	0,90
43	Сила опору коченню трактора, кН			
44	$P_f = f \cdot G_{\text{к}}$	3,5772	3,5772	3,5772
45	$G_{\text{к}}$ – експлуатаційна вага трактора, кг	16260	16260	16260
46	Тягове зусилля на гаку трактора, кН			
47	$P_T = P_{\text{кн}} - P_f$	66,577	57,6593	49,554
48	За розрахункову швидкість приймаємо на XI передачі $V_p=11,96$ м/с, $\eta_{\text{гак}}=0,863$ найближче до нормативного, але не перевищує його, = 0,90...0,95			
49	Продуктивність за 1 год. основного часу, ω_0 (га/год.)			
50	$\omega_0 = 0,1 B_p V_p$	20,346		
51	Необхідна ефективна потужність двигуна			
52	при виконанні технологічного процесу, $N_{\text{д}}^{\text{п}}$, кВт			
53	$N_{\text{д}}^{\text{п}} = \frac{R_{\text{д}} \cdot V_p}{3,6 \cdot \eta_{\text{тп}} \cdot \eta_{\text{д}}}$	213,559	213,559	213,559
54	$\eta_{\text{тп}}$ – ККД трансмісії	0,95	0,95	0,95
55	$\eta_{\text{д}}$ – коефіцієнт, що враховує втрату швидкості від буксування			
56	$\eta_{\text{д}} = 1 - \frac{\delta}{100}$	0,88	0,88	0,88
57	Загальний опір робочої машини в складі агрегату, $R_{\text{а}}$, (кН)			
58	$R_{\text{а}} = (G_{\text{м}} + G_{\text{д}}) \left(f + \frac{i}{100} \right)$	53,704	53,704	53,704
59	$G_{\text{м}}$ – вага трактора, кН	159,511	159,511	159,511
60	при виконанні переїздіє, $N_{\text{д}}^{\text{пс}}$, кВт			
61	$N_{\text{д}}^{\text{пс}} = \frac{G_{\text{а}} f_{\text{пс}} V_{\text{пс}}}{3,6}$	37,294	37,294	37,294
62	f – коефіцієнт опору коченню на переїздах	0,06	0,06	0,06
63	$V_{\text{пс}}$ – швидкість руху на переїздах, км/год (8-10)	10	10	10
64	Вага агрегату $G_{\text{а}}$, кН $G_{\text{а}} = (G_{\text{тп}} + G_{\text{дср}})$	223,7661	223,766	223,7661
65	при виконанні поворотіє, $N_{\text{д}}^{\text{пв}}$, кВт			
66	$N_{\text{д}}^{\text{пв}} = \frac{0,8 G_{\text{а}} f_{\text{пв}} V_{\text{пв}}}{3,6}$	59,67	59,67	59,67
67	f – коефіцієнт опору коченню на поворотах	0,12	0,12	0,12
68	$V_{\text{пв}}$ – швидкість руху на поворотах, км/год	10	10	10

	D	E	F	G
69	Ступінь використання ефективної потужності двигуна			
70	<i>при виконанні технологічного процесу, ξ_p</i>			
71	$\xi_p = \frac{N_p^o}{N_{en}}$	0,9577	0,95766	0,9577
72	<i>при виконанні холостих поворотів, ξ_x</i>			
73	$\xi_x = \frac{N_x^o}{N_{en}}$	0,2676	0,26758	0,2676
74	<i>при виконанні переїздів, $\xi_{пер}$</i>			
75	$\xi_{пер} = \frac{N_{пер}^o}{N_{en}}$	0,1672	0,16724	0,1672
76	Продуктивність агрегату за одиницю змінного часу			
77	Продуктивність за 1 год. змінного часу, ω_{zm} (га/год)			
78	$\omega_{zm} = 0,1B_p V_p \tau$	14,714	14,8187	15,032
79	τ – коефіцієнт використання часу зміни			
80	$\tau = \frac{T_p}{T_{zm}}$	0,7232	0,72835	0,7388
81	T_p – час чистої (основної) роботи, год.			
82	$T_p = t_p \cdot n_v$	5,0624	5,09846	5,1718
83	T_{zm} – тривалість зміни, год. (для шкідливих умов $T_{zm} = 6$ год., для звичайних $T_{zm} = 7$ год.)			
84	Кількість циклів за зміну, n_v			
85	$n_v = \frac{T_{zm} - \sum T_{nc}}{t_v}$	123,14	123,02	123,79
86	$\sum T_{nc}$ – сума позациклових простоїв за зміну, час на власні потреби $\sum T_{nc} = 0,42$ год.			
87	t_v – тривалість циклу, год.			
88	Тривалість циклу дорівнює			
89	для агрегатів, що не мають технологічних місткостей			
90	$t_v = t_p + t_x = \frac{l_p}{V_p} + \frac{l_x}{V_x}$	0,0534	0,0535	0,0532
91	l_p – робоча довжина заїмки, км;			
92	l_x – довжина одного холостого повороту, км			
93	$l_x = L - 2E$	492	496	500
94	L – довжина поля, м			
95	E – ширина поворотної смуги, м.			
96	При петльових грушоподібних поворотах			
97	$E = 2,8R_n + 0,5d_x + e$	68,2303	68,2303	68,2303
98	радіус повороту боронувальних агрегатів $R_n = 1,0B_k$			
99	$d_x = 17$ м – кінематична ширина агрегату, м			
100	e – довжина прямолінійного виїзду агрегату поворотної смуги, м			
101	$e = (0,6 \dots 1,0)l_x = 0,7(l_{mp} + l_{оп})$	12,130	12,130	12,130
102	l_x – кінематична довжина агрегату, м (борони, трактора). з характеристик			
103	Після визначення розрахункового значення ширини поворотної смуги E фактичне її значення приймається із умови:			

	D	E	F	G
104	$E_{\text{звн}} = nB_p \geq E$	68	68	68
105	n – коефіцієнт кратності ($n = 2,4 \dots 1$)			
106	Середня довжина повороту агрегату ℓ_z , що приходить на один робочий прохід для групоподібного петлевого повороту			
107	$\ell_z = bR_n + 2e$	126,2606		
108	(по рис.)	123,24	120,43	113,76
109		петля 1	петля 2	петля 3
110	Коефіцієнт використання робочих ходів φ			
111	$\varphi = \frac{\ell_z}{\ell_z + \ell_x}$	0,7997	0,8046331	0,8147
112	Витрати палива на обидицю роботи			
113	Витрати палива на обидицю площі, $G_{\text{об}}$ (кг/га)			
114	$G_{\text{об}} = \frac{G_p T_p + G_z T_z + G_{\text{пер}} T_{\text{пер}} + G_z T_z}{\omega_{\text{об}}}$	19,6811	19,6337	19,5393
115	Витрати палива (чистий час роботи) на обидицю площі, $G_{\text{об}}$ (кг/га)			
116	$G_{\text{об}} = \frac{G_p T_p}{\omega_{\text{об}}}$	18,0016	18,0016	18,0016
117	Витрати палива на поворотах на обидицю площі, $G_{\text{об}}$ (кг/га)			
118	$G_{\text{об}} = \frac{G_z T_z}{\omega_{\text{об}}}$	1,5079	1,4616	1,3696
119	Витрати палива на переїздах на обидицю площі, $G_{\text{об}}$ (кг/га)			
120	$G_{\text{об}} = \frac{G_{\text{пер}} T_{\text{пер}}}{\omega_{\text{об}}}$	0,03900	0,03872	0,03817
121	Витрати палива на зупинках на обидицю площі, $G_{\text{об}}$ (кг/га)			
122	$G_{\text{об}} = \frac{G_{\text{зп}} T_{\text{зп}}}{\omega_{\text{об}}}$	0,13263	0,13170	0,12983
123	Годинна витрата палива при виконанні технологічного процесу G_p , кг/год.			
124	$G_p = \frac{E \cdot N_{\text{звн}} \cdot \zeta_p}{1000}$	52,32	52,32201	52,32
125	T_p – тривалість чистого часу зміни, год.			
126	Годинна витрата палива на поворотах G_x , кг/год.			
127	$G_x = \frac{E \cdot N_{\text{звн}} \cdot \zeta_x}{1000}$	14,62	14,619385	14,62
128	T_x – тривалість поворотів, год.			
129	Годинна витрата палива на переїздах $G_{\text{пер}}$, кг/год.			
130	$G_{\text{пер}} = \frac{E \cdot N_{\text{звн}} \cdot \zeta_{\text{пер}}}{1000}$	9,137	9,1371158	9,137
131	$T_{\text{пер}}$ – тривалість переїздів, год.			
132	$T_{\text{пер}} = \frac{L}{V_{\text{пер}}}$	0,0628	0,0628	0,0628
133	Годинна витрата на зупинках з працюючим двигуном, G_z , кг/год.			
134	$G_z = \frac{0,1gN_{\text{звн}}}{1000}$	5,4635	5,4635	5,4635
135	T_z – тривалість зупинок з працюючим двигуном, год.			
136	$T_z = T_{\text{звн}} + (\sum T_{\text{зп}} - T_{\text{пер}})$	0,3572	0,3572	0,3572

	D	E	F	G
137	Затрати праці			
138	Затрати праці на одиницю площі ^{за} (люд. – год./га)			
139	$Z_n^{за} = \frac{n_o + n_d}{\omega_z}$	0,0680	0,06748	0,0665
140	n_o, n_d - кількість робітників, відповідно, основних та допоміжних на обслуговуванні агрегату, люд	1	1	1
141	Затрати енергії			
142	Затрати енергії на одиницю площі ^{за} (люд. – год./га)			
143	$Z_e^{за} = \alpha_n \cdot G_{за}$	1039,16	1036,66	1031,67
144	α_n – енергетичний еквівалент палива $\alpha_n = 52,8$ МДж/га	52,8	52,8	52,8
145	Техніко-економічні показники використання агрегату			
146		Трактор	Борона	Разом
147	Норма річного навантаження, T (год.) (довідник)	1350	133	
148	Доля роботи в річному завантаженні, δ			
149	$\delta_{\text{но}} = \frac{t}{T} = \frac{F}{\omega_{за} \cdot T}$	0,00252	0,02537	0,02789
150	F- площа поля, га	50	50	50
151	Ціна, C (грн.)	1740000,00	525000	2265000,00
152	Курс євро	29		
153	Балансова вартість, B (грн.)			
154	Трактора $B_T = 1,1 \cdot C \cdot n_m$	1914000	577500	2491500
155	n_m – кількість машин в агрегаті, шт.	1	1	
156	Норма відрахувань на реновацію, a_m (%), (довідник)	17	16,8	
157	Відрахування на реновацію, S_m (грн.)			
158	$S_m = 0,01 \cdot B \cdot a_m \cdot \delta$	819,03	2432,02	3251,05
159	Норма відрахувань на поточний ремонт (ПР) та технічне обслуговування (ТО), $a_{ТО}$ (%)	8,6	14	
160	Відрахування на ПР та ТО, $S_{ТО}$ (грн.)			
161	$S_{ТО} = 0,01 \cdot B \cdot a_{ТО} \cdot \delta$	414,33	2051,10	2465,43
162	Комплексна ціна палива, s_n (грн./кг). (Вона більша за дизельне паливо на	38,48	38,48	38,48
163	Ціна на паливо 1л	29,6	29,6	29,6
164	Витрати на паливо, S_n (грн.)			
165	$S_n = G_{за} \cdot F \cdot s_n$	37886,51		
166	Витрати на паливо на технологічний процес, S_n (грн.)			
167	$S_n = G_{за} \cdot F \cdot s_n$	34635,15		
168	Витрати на паливо на поворотах, S_n (грн.)			
169	$S_n = G_{за} \cdot F \cdot s_n$	2901,15	2812,14	2635,14
170	Витрати на паливо на переїздах, S_n (грн.)			
171	$S_n = G_{за} \cdot F \cdot s_n$	75,03		
172	Витрати на паливо на зупинках, S_n (грн.)			
173	$S_n = G_{за} \cdot F \cdot s_n$	255,19		
174	Число робітників, які обслуговують агрегат, n (люд.)			
175	основних, n_o	1		
176	допоміжних, n_d	0		
177	Розряд робіт:			
178	основних робітників	4		
179	допоміжних робітників	-		

	Д	Е
180	Тарифна ставка робітників, s_m (грн./год.)	
181	основних	23,56
182	допоміжних	0
183	Основна оплата праці, S_0 (грн.)	
184	$S_0 = (s_{m0} N_0 + s_{m2} N_2) t$	164,92
185	Додаткова оплата праці, ΔS_p (грн.)	
186	$\Delta S_p = 0,32 S_0$	52,77
187	Загальна оплата праці, S_z (грн.)	
188	$S_z = S_0 + \Delta S_p$	217,69
189	Нарахування на заробітну плату й соціальні заходи $S_{\text{за}}$ (грн.)	
190	$S_{\text{за}} = 0,368 S_z$	80,11
191	Експлуатаційні витрати, S (грн.)	
192	$S = (S_z + S_{\text{ма}} + S_{\text{е}} + S_{\text{з}} + S_{\text{за}})$	43880,80
193	Структура експлуатаційних затрат, Δ (%)	
194	$\Delta_z = (S_z / S) 100$	7,41
195	$\Delta_{\text{то}} = (S_{\text{то}} / S) 100$	5,62
196	$\Delta_{\text{е}} = (S_{\text{е}} / S) 100$	86,29
197	$\Delta_z = (S_z / S) 100$	0,50
198	$\Delta_{\text{за}} = (S_{\text{за}} / S) 100$	0,18
199	Експлуатаційні витрати на одиницю роботи, $\&$	
200	$\& = \frac{S}{F}$	877,62
201	Норма ефективності капітальних вкладень, E	0,15
202	Приведені витрати, Π (грн.)	
203	$\Pi = S + E(B_T \delta_T + B_M \delta_M)$	46801,08
204	Приведені витрати на одиницю роботи, n (грн./га)	
205	$n = \frac{\Pi}{F}$	936,022

ДОДАТОК Д.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

ПОГОДЖЕНО

Проректор з наукової роботи
Сумського НАУЮ.І. Данько
« » _____ 2021 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Головний конструктор
ТОВ «УКБТШ»О.А. Гриненко
« » _____ 2021 р.

АКТ

про впровадження результатів науково-дослідних,
дослідно-конструкторських та технологічних робіт

Даним актом стверджується, що результати роботи Сіренко Юлії
Володимирівни виконані на основі держбюджетної
теми "Розробка і впровадження екологічнобезпечних,
також теми, що державної розробки
енергоощадних технічних засобів та методів експлуатації в
умовах зони лісостепу України", №0113U008229
від 01.12.2013 р.

впровадження: ТОВ "Українське конструкторське бюро
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ І ТЕХНОЛОГІЙНОГО ВПРОВАДЖЕННЯ
трансмисій та шасі"

1. Вид впроваджувальних робіт: результати теоретичних та
технологічних, конструкторських, технологічних, експериментальних
експериментальних досліджень кінематики руху машинно-
тракторного агрегату (трактор та ґрунтообробна машина).

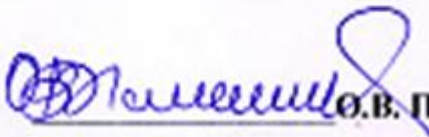
2. Масштаб впровадження: визначення оптимальних експлуатаційних та кінематичних параметрів машинно-тракторного агрегату при виконанні технологічних елементів руху
технологія, сортів, породи, ліній, габридж, густоти, швидкості поїзду

3. Новизна результатів науково-дослідних робіт отримано вдосконалений технологічний процес тракторії складного руху машинно-тракторного агрегату
за результатами експериментальних досліджень або згідно з авторським свідоцтвом, заскріплені сторінки з реєстрації

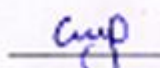
технологічного коду, швидкості, географічної

4. Річний економічний ефект у грошовому виразі (із зазначення ціни якого року) при виконанні даної технології можливий економічний ефект 6 млн. 235 тис. грн. на посівних площах 1172 тисяч гектар Сумської області, для операції боронування (за показниками 2020 р.).

Від Сумського НАУ
 Завідувач науково-дослідної частини


 « 08 » січня 2021 р.

Від підприємства
 Головний конструктор обладнання для ґрунтообробітку


 « 08 » січня 2021 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з науково-педагогічної та
навчальної роботиСумського національного аграрного
університету, к.е.н., професор

В.М. Жмайлов

20 вересня 2020 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи
старшого викладача кафедри енергетики та електротехнічних систем
інженерно-технологічного факультету Сумського НАУ Сіренко Ю.В.
у навчальний процес кафедри тракторів, с.-г. машин
та транспортних технологій і кафедри експлуатації техніки Сумського НАУ

Ми, які підписалися нижче, представники кафедри тракторів, сільськогосподарських машин та транспортних технологій і кафедри експлуатації техніки інженерно-технологічного факультету Сумського національного аграрного університету в особі завідувача кафедри тракторів, с.-г. машин та транспортних технологій, к.т.н., доцента Зубка Владислава Миколайовича та завідувача кафедри експлуатації техніки, к.т.н., доцента Саржанова Олександра Анатолійовича склали цей акт про те, що матеріали дисертаційної роботи Сіренко Юлії Володимирівни використовуються при викладанні курсів «Експлуатація машин і обладнання» та «Проектування технологічних процесів у рослинництві» та «Геоінформаційні системи та система точного землеробства» зі спеціальності 208 «Агроінженерія».

Результати роботи Сіренко Ю.В. доповнили дисципліни «Проектування технологічних процесів у рослинництві» та «Експлуатація машин і обладнання» більш раціональним способом визначення довжини холостого ходу машино-тракторного агрегату та ширини розворотної полоси з підвищенням показника ефективності експлуатації машино-тракторного агрегату під час виконання студентами курсового проекту. Дисертаційні дослідження Сіренко Ю.В. доповнили курс «Геоінформаційні системи та система точного землеробства» можливістю визначення траєкторії криволінійного руху енергетичного засобу та машино-тракторного агрегату з використанням супутникової навігаційної системи при виконанні студентами лабораторних робіт.

Зав. кафедри тракторів, с.-г. машин та
транспортних технологій
к.т.н., доцент

В.М. Зубко

Зав. кафедри експлуатації
техніки к.т.н., доцент

О.А. Саржанов

Заступник декана інженерно-технологічного
факультету к.т.н., доцент

О.О. Соларьов

ДОДАТОК Ж.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ, В ЯКИХ ОПУБЛІКОВАНІ ОСНОВНІ НАУКОВІ
РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ

У фахових виданнях.

1. Мельник В.І., Довжик М.Я., Татяниченко Б.Я., Соларьов О.О., Сіренко Ю.В.. Рівняння швидкості криволінійного руху колісного трактора // Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів». – Суми, 2016. – Вип. 10/2 (30). – С. 7-14.

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

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

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

5. Довжик М.Я., Татяниченко Б.Я., Соларьов О.О., Калнагуз О.М., Сіренко Ю.В. Кутова швидкість обертання корпусу машини в повороті // Вісник Сумського національного аграрного університету, серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів», випуск 5 (33), 2018. с.93–98.

Статті у наукових виданнях, які входять до наукометричних баз даних.

6. V. Melnik M. Dovzhyk, B. Tatyanchenko. O. Solarov. Yu. Sirenko Analytical method of examining the curvilinear motion of a four-wheeled vehicle. EASTERN-EUROPEAN JOURNAL OF ENTERPRISE TECHNOLOGIES. ISSN 1729-3774. No 3/7 (87) 2017. UDC 624.138.2.678.06 DOI: 10.15587/1729-4061.2017.101335.

7. Dovzhyk M., Tatyanchenko B., Solarov A., Sirenko J., Roubík H. Determination of the trajectory of curvilinear motion of front steering wheels driven tractor // *Scientia agriculturae bohémica*, 50, 2019 (2): 127–134 (Scopus).

В закордонних виданнях

8. Татьяначенко Б. Я., Сиренко Ю.В.. Результаты аналитического исследования траектории криволинейного движения четырехколесных машин // Техническое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: сборник научных статей Международной научно-практической конференции, Минск, 22-24 ноября 2017 г. - Минск : БГАТУ, 2017. - С. 324-327.

9. Довжик М.Я., Татьяначенко Б.Я., Сиренко Ю.В. Реакції коліс трактора під час криволінійного руху. // Міжнародна конференція «Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід» 21- 24 листопада 2017 р., м. Відень, Австрія – Том 2, с. 227-235.

10. Татьяначенко Б. Я., Сиренко Ю. В. Три рівняння траєкторії неусталеного руху колісної машини. // XIV Міжнародна конференція «Стратегія якості у промисловості і освіті» (4-7 червня 2018 р., Варна, Болгарія): Матеріали. У 2-х томах. Том I. Упорядники: Хохлова Т.С., Кімстач Т.В. – Дніпро-Варна, 2018. – 396 с., с. 118-124.

11. Довжик М.Я., Татьяначенко Б.Я., Сиренко Ю.В. Коефіцієнти інтенсивності зміни кутових параметрів // Молоді вчені 2019 – від теорії до практики: збірник наукових статей X Міжнародної науково-практичної конференції – Дніпро, 2019. –с. 206-214.

Праці, які засвідчують апробацію дисертації.

12. Татьяначенко Б.Я., Сиренко Ю.В. Програма дослідження криволінійного руху колісних машин. // Матеріали XVI Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" присвячена 116-річчю з дня народження академіка П.М. Василенка (17–18 жовтня 2016 року) / МОН України, Сумський національний аграрний університет. – Суми., 2016. – Ст. 97.

13. Сиренко Ю.В. Кінематика та динаміка криволінійного руху. // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених «Молодь і технічний

прогрес в АПК » (07–08 квітня 2017 року) / МОН України, ХНТУС. – Харків, 2017. – С. 36.

14. Довжик М.Я., Татяанченко Б.Я., Сіренко Ю.В. Аналітичні рівняння траєкторії неусталеного криволінійного руху чотирьохколійної машини з передніми керованими колесами // Збірник тез доповідей XIX Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки", присвяченої 120-й річниці з дня заснування кафедри с.-г. машин та системотехніки ім. академіка П.М. Василенка (17–19 жовтня 2018 р.) / МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 2018. 326 с. С. 279–282.

15. Довжик М.Я., Татяанченко Б.Я., Сіренко Ю.В. До визначення рівнянь траєкторії руху центра ваги чотирьохколійної машини з передніми керованими колесами // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні розробки в аграрній сфері» Том 1. – Харків: ХНТУСГ, 2018. – 270 с (С. 120).

16. Татяанченко Б.Я., Сіренко Ю.В. Рівняння траєкторії неусталеного руху колійної машини. // Матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної конференції «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь» (28-29 березня 2018 року м. Житомир) – (С. 236-239).

17. Довжик М.Я., Татяанченко Б.Я., Сіренко Ю.В. Значення коефіцієнтів інтенсивності зміни кутових параметрів // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Молодь і технічний прогрес в АПК» Інноваційні розробки в аграрній сфері. Том 2. – Харків: ХНТУСГ, 2019. – 285 с. (С. 115–117).

18. Довжик М.Я., Сіренко Ю.В.. Аналитические уравнения траектории неустановившегося движения колесных машин // Материалы Международной научно-практической конференции «Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве» (Минск, 24–25 октября 2019 года): в 2 ч./ редкол.: И. Н. Шило [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2019. – 408 (С. 148–150).

19. Довжик М.Я., Сіренко Ю.В. Параметричні рівняння траєкторії неусталеного криволінійного руху у функції часу // Збірник тез доповідей XX Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" присвяченої 119-

й річниці з дня народження академіка П.М. Василенка (17–19 жовтня 2019 року) / МОН України, Миколаївський національний аграрний університет. – Миколаїв: МНАУ, 2019. – 222 с. С. 66-68.

20. Довжик М. Я., Сіренко Ю.В., Калнагуз О.М. 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).

Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації.

21. Патент №119886 Україна, МПК А01В 59/044 (2006.01). Корегований тягово-зчіпний пристрій / Сіренко Ю.В., Довжик М.Я., Татяниченко Б.Я., Соларьов О.О. №u2017 04512 заявка 10.05.2017; опубл. 10.10.2017, бюл. №19.

22. Патент №124185 Україна, МПК В50В 35/10 (2006.01). Транспортний засіб зі змінним центром мас / Сіренко Ю.В., Довжик М.Я., Татяниченко Б.Я., Соларьов О.О. № u2017 10260 заявка 23.10.2017; опубл. 26.03.2018, бюл. №6