

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

Калнагуз Олексій Миколайович

УДК 631.171:631.3.075

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

Спеціальність 05.05.11 – Машини і засоби механізації
сільськогосподарського виробництва

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Кропивницький – 2026

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Сумському національному аграрному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор **Мельник Віктор Іванович**, Державний біотехнологічний університет, професор кафедри агроінженерії.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, академік Національної академії аграрних наук України, професор **Булгаков Володимир Михайлович**, Національний університет біоресурсів і природокористування України, завідувач кафедри механіки;

доктор технічних наук, професор **Аулін Віктор Васильович**, Центральноукраїнський національний технічний університет, професор кафедри експлуатації та ремонту машин.

Захист відбудеться 13 лютого 2026 року об 11.00 годині на засіданні спеціалізованої ради Д 23.073.01 при Центральноукраїнському національному технічному університеті за адресою: 25030, м. Кропивницький, пр. Університетський, 8.

З дисертацією та авторефератом можна ознайомитись у бібліотеці Центральноукраїнського національного технічного університету за адресою: 25030, м. Кропивницький, пр. Університетський, 8.

Автореферат розісланий 9 січня 2026 року.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 23.073.01



Каліч В.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. При виконанні робіт в польових умовах агрегати, в складі машина-трактор, рухаються по складним траєкторіям маневрів: прямолінійними ділянками та криволінійними зі змінною кривизною. Переміщення енергетичних засобів по прямим траєкторіям можна розглядати як один з випадків криволінійного руху, але з нульовою кривизною (нескінченості дорівнює радіус кривизни траєкторії).

Детально розглянута властивість колісної машини здійснювати повороти по траєкторіях якомога більшої кривизни за мінімально можливої площі на опорній поверхні, яка має назву повороткість. Найбільш небезпечними етапами виконання повороту є вхід і вихід з повороту.

Радіус мінімальний траєкторії повороту, відповідна швидкість, сила тяги, час, витрачений на поворот – це економічні показники енергетичного засобу руху по кривим траєкторіям, які взаємопов'язані.

Традиційно дослідники під час розробки математичної моделі дисертаційного дослідження, беручи до уваги все більше і більше врахування початкових параметрів, аргументують тим, що саме їхня модель дає більшу точність отриманим математичним залежностям. Але це не завжди так. Шляхом аналізу криволінійного руху енергозасобу встановлено, що основний вплив на формування траєкторії відіграє обмежена кількість параметрів (20%), у той час як більшість інших чинників (80%) мають мінімальний, або другорядний вплив.

Метою дисертаційного дослідження було створення та розробка малоресурсоемкісної математичної моделі криволінійного руху керування чотирьохколісним енергетичним засобом зі всіма керованими колесами.

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

Відповідно до принципу Парето збільшення кількості кінематичних показників агрегату під час дослідження, не забезпечує більшу точність отриманих значень результатів. За більшу точність результату відповідає менша кількість впливових показників, а збільшення показників дослідження призводить до збільшення похибки придатності даної математичної моделі на практиці. Тому необхідно завжди зберігати баланс: між ймовірністю отримання великої похибки обчислень і точністю траєкторії керування. Збільшення кількості кінематичних показників в математичній моделі збільшує складність їх визначення в початкових умовах без належної точності. Тому задачею досліджень передбачалось розробити спрощену та ефективну математичну модель криволінійного руху енергетичного засобу.

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

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

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

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

- провести аналіз математичних моделей криволінійного руху енергетичного засобу зі всіма керованими колесами з метою аналітичного вирішення рівнянь криволінійного руху енергетичного засобу під час маневрів;
- розробити математичну модель нелінійного руху центра ваги енергетичного засобу зі всіма керованими колесами у функції кута повороту остова машини з урахуванням інтенсивності повороту;
- розробити методи моделювання маневрів та провести експериментальні дослідження в польових умовах для перевірки розробленої математичної моделі нелінійного руху на адекватність;
- здійснити впровадження та визначити економічний ефект під час використання запропонованих алгоритмів управління криволінійним рухом для систем автоматизації.

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

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

Методи дослідження. При проведенні теоретичних досліджень використовувалися методи системного та структурного аналізу, математичної статистики, які базувалися на математичному моделюванні нелінійного руху польових агрегатів з використанням теорії диференціальних рівнянь вищої математики, основних положень теоретичної механіки, теорії машин, кінематики криволінійного руху. Експериментальні дослідження виконували в лабораторних і польових умовах відповідно до вимог діючих стандартів і розроблених методик планування експерименту. Математичне моделювання з використанням запропонованих алгоритмів для автоматичного водіння польових агрегатів та статична оцінка експериментальних досліджень проводили на персональному комп'ютері за допомогою систем комп'ютерної графіки та програми для роботи з електронними таблицями Microsoft Excel.

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

вперше:

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

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

удосконалено:

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

отримало подальший розвиток:

- функціональні зв'язки, які описують непрямолінійний рух центра ваги енергетичного засобу з чотирма керованими колесами, з врахуванням інтенсивності повороту керованих коліс, що дозволило покращити кінематичні характеристики експлуатації польових агрегатів та підвищити продуктивність;

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

Практичне значення отриманих результатів.

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

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

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

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

Особистий внесок здобувача. Основні положення, теоретичні та експериментальні результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист і складають наукову новизну виконаних досліджень, одержані здобувачем особисто. У публікаціях, які підготовлені за участі співавторів, особистий внесок, що належать здобувачеві, вказаний в списку опублікованих праць за темою дисертації.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались та отримали позитивні відгуки на: VI всеукраїнській НПК "Перспективи розвитку і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу с.г. машин і знарядь (м. Житомир, 2–3 квітня 2020 р.); міжнародній НАП молодих учених, (м. Мелітополь, 1–26 лютого 2021 р.); XXII міжнародній науковій конференції: «Сучасні проблеми землеробської механіки», присвяченої 121-й річниці з дня народження академіка П. М. Василенка, (м. Ніжин, 16–18 жовтня, 2021 р.); XIII міжнародній НПК «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації с.г. техніки» (м. Кропивницький, 10-12 листопада 2021 р.); 27 міжнародній НПУ "Технології XXI сторіччя" (м. Суми, 25–26 листопада 2021 р.); міжнародній III науково-практичній інтернет-конференції «Технічне забезпечення інноваційних технологій в АПК» (м. Мелітополь, 01–26 листопада 2021 р.); XXIII міжнародній науковій конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (м. Київ. Житомир. 16–18 жовтня 2021 р.); міжнародній НПК «Сучасна інженерія агропромислових і харчових виробництв» (м. Харків, 25–26 листопада 2021 року); міжнародній НПК «Технічне забезпечення інноваційних технологій в АПК» (м. Запоріжжя, 1–25 листопада 2022 р.); міжнародній НПК «Автомобільний транспорт в аграрному секторі: проектування, дизайн та технологічна експлуатація» (м. Харків, 1–2 грудня 2022 р.); міжнародній НПК «100-річчя Поліського НУ: здобутки, реалії, перспективи» (м. Житомир, 1 листопада 2022 р.); міжнародній НПК «Прогресивні технології в с.г.» (м. Суми, 23–25 листопада 2022 р.); IX міжнародній НПК «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу с.-г. машин і знарядь» (м. Житомир,

5 квітня 2023 року); міжнародній НПК «Інноваційні аспекти розвитку автомобільного транспорту України» (м. Кам'янське, 16–18 травня 2023 року); міжнародній НПК «AutoTRAK-2023» «Експлуатаційна та сервісна інженерія». (м. Київ, 4–5 травня 2023 року); IX Міжнародній НПК «Інноваційні технології в АПК» (м. Луцьк, 7–8 червня 2023 року); 6th International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange (High Tatras, Slovak Republic, June 6–9, 2023); XXV міжнародній науковій конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–19 жовтня 2024 року, НУБіП України, Київ).

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

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

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

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, мету, завдання дослідження, об'єкт і предмет досліджень, описано використані методи і методики досліджень та зв'язок роботи з науковими програмами, визначено наукову новизну і практичну цінність, наведено дані щодо апробації основних положень дисертаційного дослідження та загальна характеристика роботи.

В **першому розділі** «Стан питання кінематики криволінійного руху енергетичного засобу зі всіма керованими колесами та задачі дослідження» проведено аналіз та узагальнено науково-технічні джерела за темою дисертаційного дослідження.

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

Причина дослідження криволінійного руху – це впровадження в практику автоматичного керування польових агрегатів під час проведення польових операцій при технології вирощування сільськогосподарських культур.

У сучасній науковій літературі дослідники описують криволінійний рух машини аналітичними рівняннями.

Дослідженню та вивченню траєкторії повороту чи розвороту будь-якого енергетичного засобу чи польового агрегату під час польових робіт присвячено наукові праці вітчизняних дослідників: В.І. Піддубний, В.Я. Анілович, Ю.Т. Водолажченко, С.М. Григор'єв, І.Є. Кавчинський, Б.Я. Тат'янченко, М.Я. Довжик, А.Т. Лебедєв, А. Коробко, В.М. Булгаков, М.А. Подригайло, О.А. Бобошко, Є.І. Калінін та закордонних: Song M.Z., Yue M., Zhou Y., Wang Z.

В результаті проведеного аналізу методів отримання траєкторії криволінійного руху агрегату, науковцями були використані як наближені методи, так і математичні моделі, які ґрунтуються на методах отримання траєкторій та формулах для визначення параметрів кінематики повороту агрегату. Ці математичні моделі мають ряд недоліків для використання на практиці:

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

- деякі науковці використовують графічні методи отримання траєкторії руху, сегменти траєкторії замінюють параболічними кривими з супроводом наведених формул та алгоритмом програмування вихідних параметрів з визначенням точності отриманих кривих до вихідних лінійних ламаних - метод отримання параболічної кривої траєкторії криволінійного руху, але не наведено кінцеві математичні рівняння траєкторії руху агрегату;

- частина науковців використовують експеримент в якості планування траєкторії: отримують траєкторію руху трактора на поверхні поля, потім експериментальні координати перетворюють і отримують теоретичну траєкторію руху, але цей метод складний і не може бути використаний на практиці;

- для моделювання траєкторії руху агрегату інші науковці розглядають спрощену траєкторію повороту агрегату, яка складається з лінійної та колової ділянок з визначенням тільки оптимального радіусу повороту для агрегату, без перехідних ділянок маневру, в той час не встановлений взаємозв'язок між початково-вихідними даними і відсутні прості аналітичні рівняння криволінійного руху агрегату з усіма керованими колесами.

Провівши аналіз результатів наукових досліджень математичних моделей криволінійного руху, встановлено, що виникає необхідність в розробці ефективної малоресурсоемісної математичної моделі криволінійного руху керування чотирьохколісним енергетичним засобом зі всіма керованими колесами, яка використовує найменшу кількість впливових кінематичних параметрів агрегату з базовим програмним забезпеченням і реалізує достатню точність придатності даної математичної моделі на практиці.

В другому розділі «Теоретичне обґрунтування траєкторії криволінійного руху чотирьохколісного енергозасобу з усіма керованими колесами» виконано аналіз впливу кінематичних параметрів на траєкторію криволінійного руху чотирьохколісного енергетичного засобу; проведені дослідження найпростіших видів криволінійного руху; встановлені математичні залежності визначення кінематики криволінійного руху: кута повороту рами енергетичного засобу,

курсного кута, коефіцієнта інтенсивності зміни курсного кута, шляху маневру; отримані математичні рівняння траєкторії руху в параметричній формі координат x та y центру ваги енергозасобу з урахуванням коефіцієнту інтенсивності повороту керованих коліс; досліджено коловий рух енергетичного засобу зі всіма керованими колесами; змодельовано траєкторії руху різних маневрів чотирьохколісного енергетичного засобу зі всіма керованими колесами за допомогою табличного процесора Microsoft Excel: вхід (вихід) в лівий (правий) повороти з передніми (задніми), всіма керованими колесами та лівого (правого) крабовидного повороту.

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

Відомо два види найпростішого криволінійного руху чотирьохколісної машини: коловий рух по колу з постійним радіусом і незмінним положенням центра кривизни і, так званий, несталый (нелінійний) рух, при якому радіус кривизни траєкторії та інші параметри змінюються у часі.

Розглянемо незалежне керування колесами обох осей енергетичного засобу під час входу в лівий поворот з постійною швидкістю v центра мас C (рис. 1) без урахування відведення коліс. Приймаємо позначення: $\alpha_1 = 0,5(\alpha_{1e} + \alpha_{13})$ – середній кут повороту передніх коліс у довільній точці знаходження центра C з координатами (x, y) ; $\alpha_2 = 0,5(\alpha_{2e} + \alpha_{23})$ – відповідний середній кут повороту задніх коліс, $\alpha_{1e}, \alpha_{2e}, \alpha_{13}, \alpha_{23}$, – кути повороту внутрішніх, відносно кривизни траєкторії (показана пунктирною лінією), і зовнішніх коліс; φ – кут повороту рами енергетичного засобу; α – кут між вектором швидкості v і віссю енергетичного засобу (курсний кут); R_T – теоретичний радіус повороту енергетичного засобу, що визначається без урахування відведення коліс; R – миттєвий радіус кривизни траєкторії в точці C .

$$R_T = \frac{L}{\alpha_1 - \alpha_2}; \alpha = \frac{\overline{DC}}{R_T} = \frac{R_T \alpha_1 - \ell_1}{R_T} = \frac{\alpha_1 \ell_2 + \alpha_2 \ell_1}{L} \quad (1)$$

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

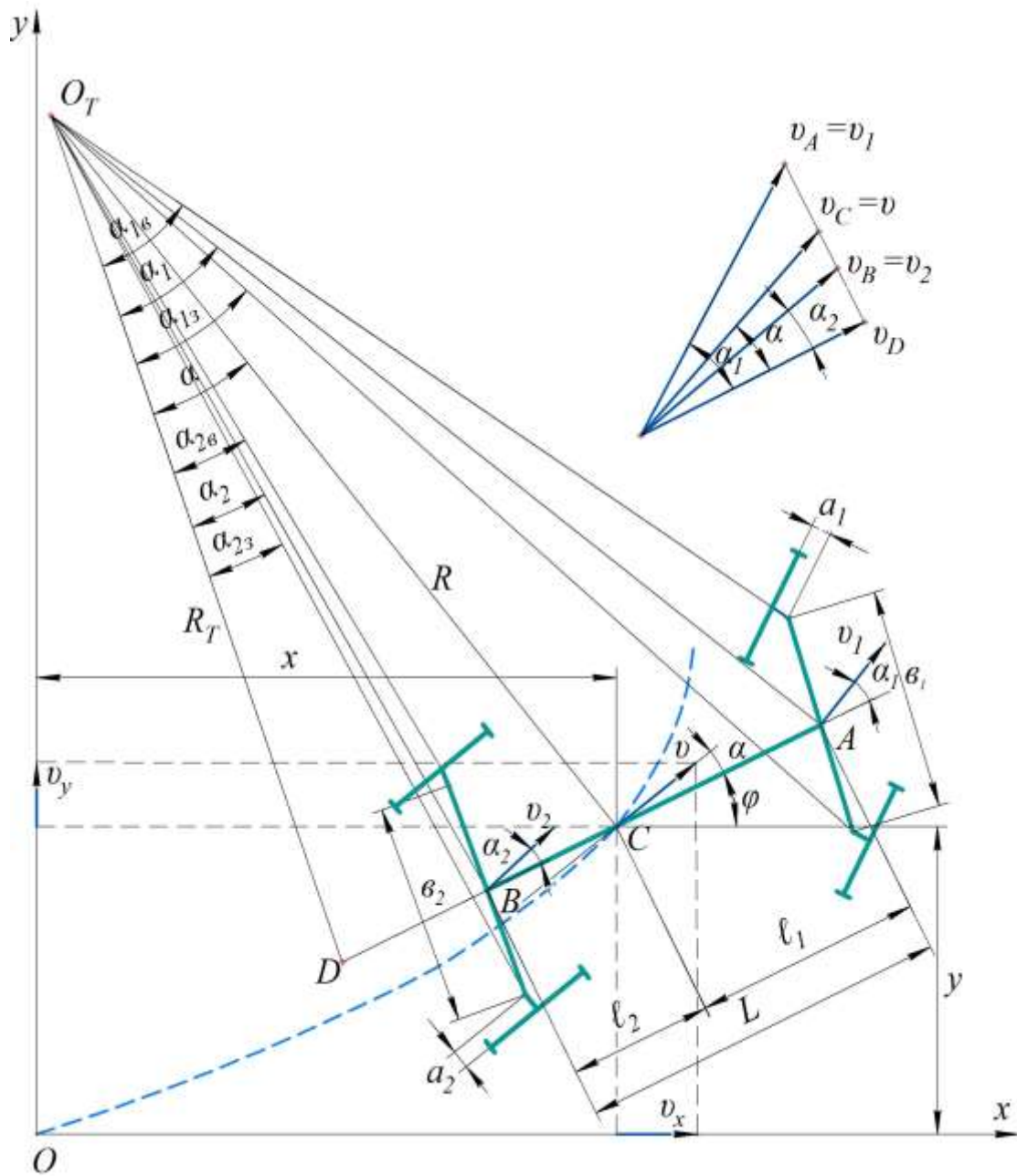


Рисунок 1 – Вхід в лівий поворот чотирьохколісного енергетичного засобу з усіма керованими колесами

Тангенси і синуси кутів α , α_1 , α_2 і φ приймаються рівними відповідним кутам в зв'язку з їх малістю, що тим більше допустимо для енергетичних засобів з жорсткою рамою.

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

$$\begin{aligned} v_x &= v \cos(\alpha + \varphi); \\ v_y &= v \sin(\alpha + \varphi); \end{aligned} \quad (2)$$

а самі координати будуть:

$$\begin{aligned}x &= \int v_x dt = v \int \cos(\alpha + \varphi) dt; \\y &= \int v_y dt = v \int \sin(\alpha + \varphi) dt.\end{aligned}\quad (3)$$

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

$$\alpha = \alpha_{\Pi} + \alpha_3 = \alpha_{OP} + k_{\Pi}t + \alpha_{O3} + k_3t = \alpha_o + kt \quad (4)$$

де $\alpha_o = \alpha_{OP} + \alpha_{O3}$ – початкове значення повного кута α на початку входу в поворот ($t=0$); α_{OP} і α_{O3} – початкові значення складових повного курсового кута, обумовлені поворотом, відповідно, передніх і задніх осей; $k = k_{\Pi} + k_3$ – повне значення коефіцієнта інтенсивності зміни курсового кута; k_{Π} і k_3 – коефіцієнти інтенсивності зміни складових повного курсового кута, обумовлені поворотом, відповідно, передніх і задніх коліс.

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

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= \alpha_{10} + k_1t; \\ \alpha_2 &= \alpha_{20} + k_2t,\end{aligned}\quad (5)$$

де α_{10} і α_{20} – початкові значення кутів α_1 і α_2 . Із співвідношень (1) маємо залежності:

$$\begin{aligned}k_{\Pi} &= \frac{\ell_2}{L} k_1 = \frac{\alpha_{\Pi K} - \alpha_{\Pi O}}{t}; \\ k_3 &= \frac{\ell_2}{L} k_2 = \frac{\alpha_{3K} - \alpha_{3O}}{t},\end{aligned}\quad (6)$$

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

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

$$\begin{aligned}dS &= R d\varphi = v dt; \\ R &= \frac{\overline{CD}}{\alpha} = \frac{\overline{CD}}{\alpha_o + kt}.\end{aligned}\quad (7)$$

Оскільки при вході в лівий поворот радіус кривизни траєкторії позитивний, а знаки відрізка $\overline{CD}$ і кута α однакові, то згідно (7) і з урахуванням (1), (3) і (4) маємо:

$$d\varphi = \frac{v}{\overline{CD}} \alpha dt = \frac{v}{L} (\alpha_{\Pi} - \alpha_3) dt = v \left(\frac{\alpha_{\Pi}}{\ell_2} - \frac{\alpha_3}{\ell_1} \right) dt = v \left(\frac{\alpha_{\Pi O} + k_{\Pi}t}{\ell_2} - \frac{\alpha_{3O} + k_3t}{\ell_1} \right). \quad (8)$$

Диференціал $d\varphi$ можна також виразити через час t , скориставшись планом швидкостей (рис. 1):

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

Тоді:

$$\varphi = v \left(\frac{\alpha_{II} t + 0,5 k_{II} t^2}{\ell_2} - \frac{\alpha_{30} t + 0,5 k_3 t^2}{\ell_1} \right) = v (mt + 0,5 nt^2), \quad (9)$$

звідки:

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

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

$$\text{де } m = \frac{\alpha_{II}}{\ell_2} - \frac{\alpha_{30}}{\ell_1}; n = \frac{k_{II}}{\ell_2} - \frac{k_3}{\ell_1}, [m] = \text{м}^{-1}; [n] = \text{м}^{-1} \text{с}^{-1}.$$

Тепер інтегральні рівняння (3) можна записати у вигляді:

$$x = v \int \cos \left[\alpha_0 + kt + \frac{v}{\ell_2} (\alpha_{II} t + 0,5 k_{II} t^2) + \frac{v}{\ell_1} (\alpha_{30} t + 0,5 k_3 t^2) \right] dt;$$

$$y = v \int \sin \left[\alpha_0 + kt + \frac{v}{\ell_2} (\alpha_{II} t + 0,5 k_{II} t^2) + \frac{v}{\ell_1} (\alpha_{30} t + 0,5 k_3 t^2) \right] dt. \quad (10)$$

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

Після спрощення ці рівняння можна записати у вигляді:

$$x = vt \left[\left(1 - \frac{\alpha_0}{2} \right)^2 - \frac{\alpha_0}{2} (k + vm)t - \frac{1}{6} (k^2 + \alpha_0 vn + 2kvm + v^2 m^2) t^2 - \right.$$

$$\left. - \frac{1}{8} vn(k + vm)t^3 - \frac{1}{40} v^2 n^2 t^4 \right]; \quad (11)$$

$$y = vt \left[\alpha_0 + \frac{1}{2} (k + vm)t + \frac{1}{6} vnt^2 \right].$$

Траєкторія колового руху енергетичного засобу зі всіма керованими колесами (рис. 2) з фіксованим положенням керма з урахуванням (4) і (9)

рівняння для колових траєкторій можна також отримати, вирішуючи інтегральні рівняння (3) і приймаючи $k_{II} = k_3 = 0$.

$$\begin{cases} x = \frac{\ell_1 \ell_2}{\ell_1 \alpha_{оп} - \ell_2 \alpha_{оз}} \left[\sin \left(\alpha_o + \frac{\ell_1 \alpha_{оп} - \ell_2 \alpha_{оз}}{\ell_1 \ell_2} \nu t \right) - \sin \alpha_o \right]; \\ y = -\frac{l_1 l_2}{\ell_1 \alpha_{оп} - \ell_2 \alpha_{оз}} \left[\cos \alpha_o - \cos \left(\alpha_o + \frac{\ell_1 \alpha_{оп} - \ell_2 \alpha_{оз}}{\ell_1 \ell_2} \nu t \right) \right]. \end{cases} \quad (12)$$

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

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

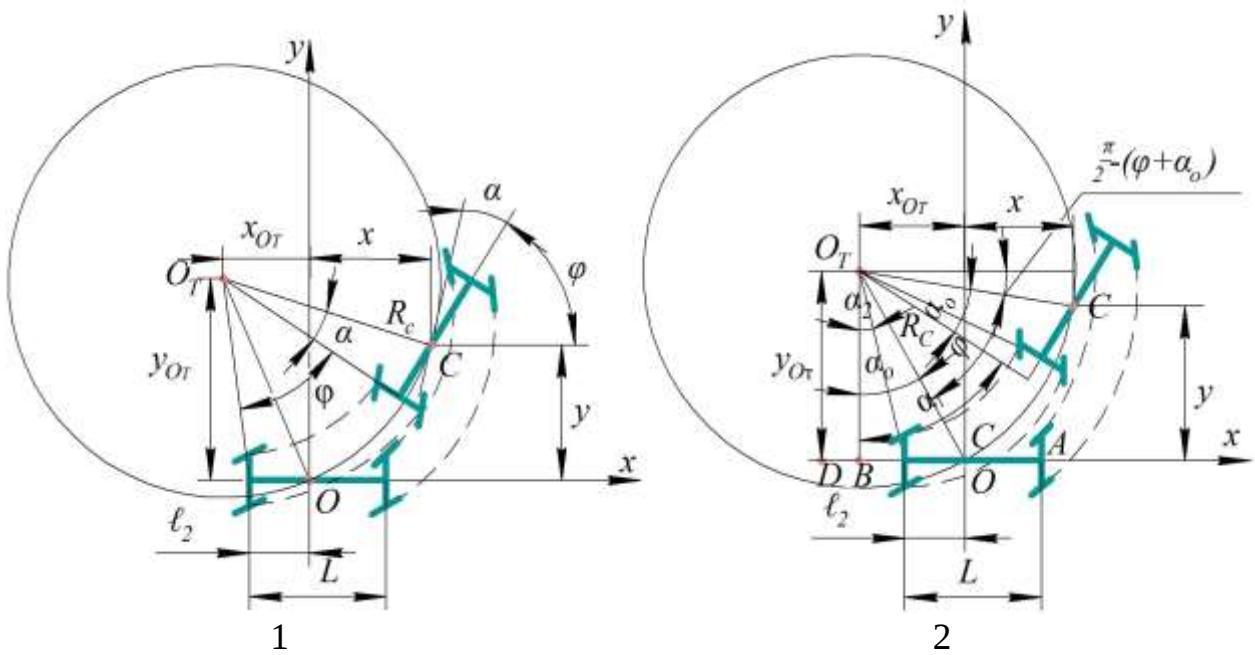


Рисунок 2 – До обґрунтування рівнянь колового руху енергетичного засобу з усіма керованими колесами: 1 – при $k = 0$; 2 – при $\varphi = 0$.

Виходячи з цих початкових параметрів, згідно інтегральних рівнянь (3) отримаємо:

$$\begin{cases} x = \frac{\nu}{k} [\sin(\alpha_o + kt) - \sin \alpha_o]; \\ y = \frac{\nu}{k} [\cos \alpha_o - \cos(\alpha_o + kt)]. \end{cases} \quad (13)$$

Моделювання маневрів здійснене за допомогою отриманих рівнянь траєкторії руху чотирьохколісного енергетичного засобу з усіма керованими

колесами: траєкторії входу (виходу) з лівого (правого) поворотів (рис. 3, 4) та траєкторія крабовидного маневру (рис. 5) на прикладі модернізованого трактора тягового класу 2 моделі ХТЗ 120/160 з колісною схемою 4х4. Розрахунок вхідних параметрів для окремих ділянок траєкторії маневрів виконуємо за формулами: (1), (4...6) і (9).

Вихідні параметри для всіх видів повороту: $\ell_1 = 1,72 \text{ м}$; $\ell_2 = 1,14 \text{ м}$; $L = 2,86 \text{ м}$; $v = 1,2 \text{ м/с}$. Мінімальний радіус повороту $R_{\min} = 6,55 \text{ м}$.

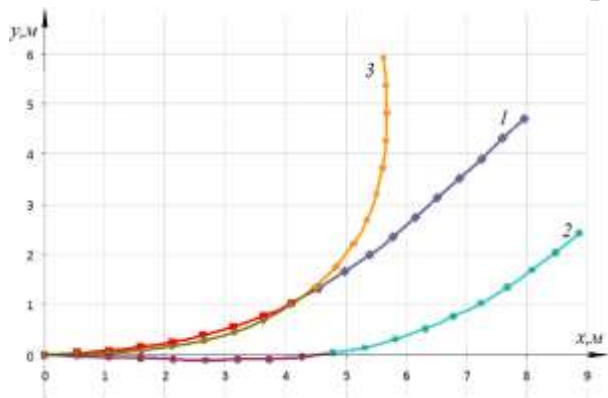


Рисунок 3 – Траєкторії входу в лівий поворот і виходу з повороту. Керовані колеса: 1 – передні, 2 – задні, 3 – всі.

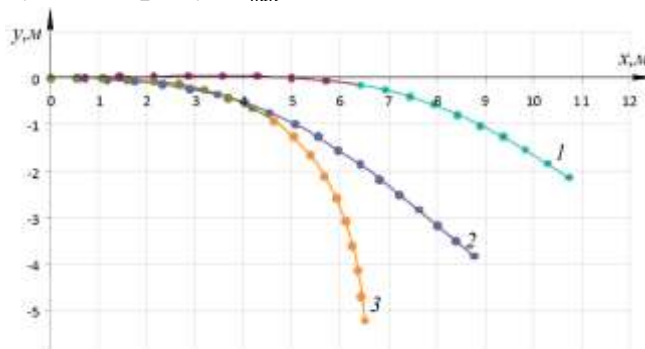


Рисунок 4 – Траєкторія входу в правий поворот і виходу з повороту. Керовані колеса: 1 – задні; 2 – передні; 3 – всі.

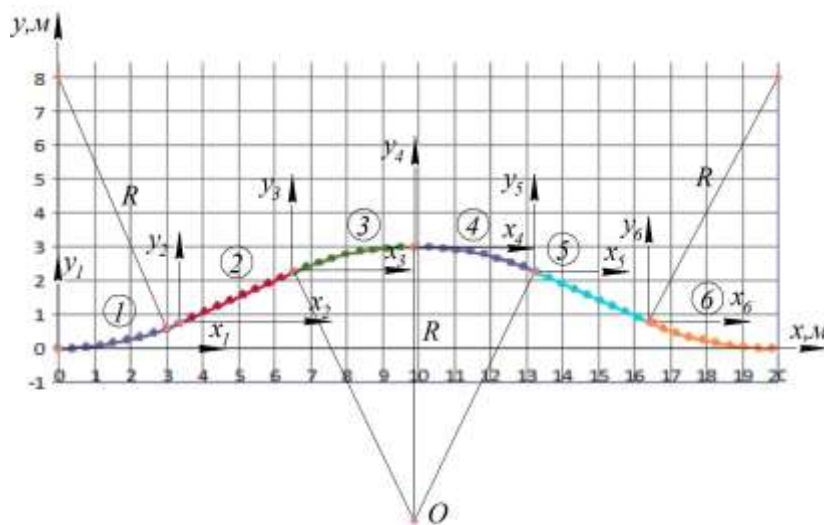


Рисунок 5 – Маневри крабовидного руху енергетичного засобу: 1 – лівий поворот; 2 – прямий хід; 3, 4 – правий поворот; 5 – прямий хід; 6 – лівий поворот.

У **третьому розділі** «Програма та методика проведення експериментального дослідження траєкторії руху модельного енергетичного засобу» наведено методику проведення моделювання грушоподібного розвороту з використанням передньої вісі в лабораторних умовах; методику використання GPS навігації для отримання траєкторії петлеподібного розвороту модельного енергетичного засобу зі всіма керованими колесами в польових умовах з проведенням статистичної оцінки на відповідність координат змодельованих траєкторій маневрів модельного енергетичного засобу зі всіма

керованими колесами до координат спряжених траєкторій, отриманих в польових умовах з використанням GPS навігації.

У четвертому розділі «Перевірка адекватності математичної моделі криволінійного руху енергетичного засобу зі всіма керованими колесами» наведено перевірку придатності отриманих математичних рівнянь нелінійного руху колісного трактора зі всіма керованими колесами шляхом: моделювання маневрів різних видів модельного енергетичного засобу в лабораторних умовах за заданими вхідними параметрами; порівняння відтворених та змодельованих траєкторій розвороту з визначенням кінематичних параметрів та статистичною оцінкою отриманих даних; визначення раціонального виду маневру для збільшення продуктивності використання польового агрегату за рахунок визначення мінімального шляху розвороту та ширини поворотної смуги на прикладі модельного енергетичного засобу зі всіма керованими колесами.

Відповідно до методів моделювання маневрів криволінійного руху були змодельовані три маневри руху модельного енергетичного засобу в лабораторних умовах:

- маневр 1 (рис. 6) - петлевидний розворот модельного енергетичного засобу зі всіма керованими колесами по колу та з використанням тільки передніх коліс;

- маневр 2 (рис. 7) - петлевидний розворот модельного енергетичного засобу - зі всіма керованими колесами по колу та з використанням передньої вісі для ділянок входу в лівий-правий поворот та виходу з лівого-правого повороту;

- крабовий маневр 3 (рис. 8) на прикладі модельного енергетичного засобу зі всіма керованими колесами.

Прийmemo вихідні параметри для всіх ділянок маневру 1: $v=1,7 \text{ м/с}$; $\ell=1,365 \text{ м}$; $R_{\min}=3,685 \text{ м}$; шлях $S=v t$.

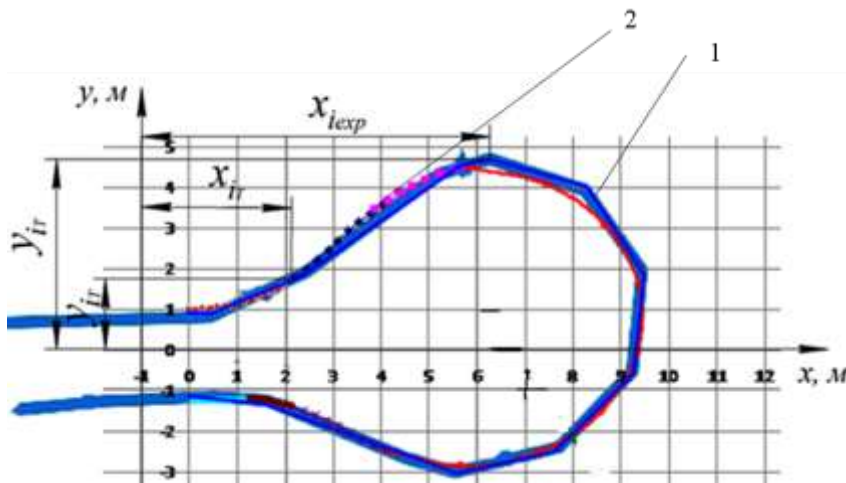


Рисунок 6 – Сумісний перебіг змодельованого та відтвореного розвороту модельного енергетичного засобу з передніми керованими колесами, маневр 1: 1 – експериментальна траєкторія, 2 – змодельована траєкторія; $S_{\text{exp}} = 25,99 \text{ м}$; $t_{\text{exp}} = 15,28 \text{ с}$; $S_T = 24,99 \text{ м}$;

$$t_T = 14,7 \text{ с}.$$

Прийmemo вихідні параметри для всіх ділянок маневру 2: $v=1,7 \text{ м/с}$; $\ell=1,365 \text{ м}$; $R_{\min}=3,685 \text{ м}$; шлях $S = vt$.

Прийmemo вихідні параметри для всіх ділянок маневру 3. Мінімальний радіус повороту навантажувача $R_{\min}=5,0 \text{ м}$. Максимальне значення кута повороту керованих коліс): $\alpha_{1\max} = \alpha_{2\max} = \frac{L}{R_{\min}} = \frac{2,81}{5,0} = 0,562 \text{ рад} = 32,22^\circ$.

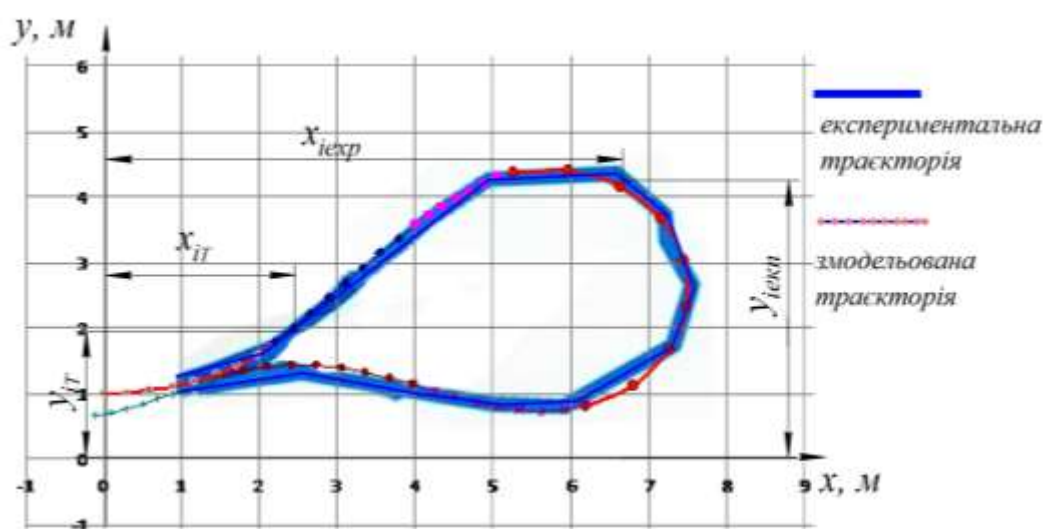


Рисунок 7 – Сумісний перебіг змодельованого та відтвореного розвороту модельного енергетичного засобу з передніми керованими колесами та все керовані колеса по колу, маневр 2: $S_{\text{exp}}=17,75 \text{ м}$; $t_{\text{exp}}=10,4 \text{ с}$; $S_T=18,8 \text{ м}$; $t_T=11,06 \text{ с}$

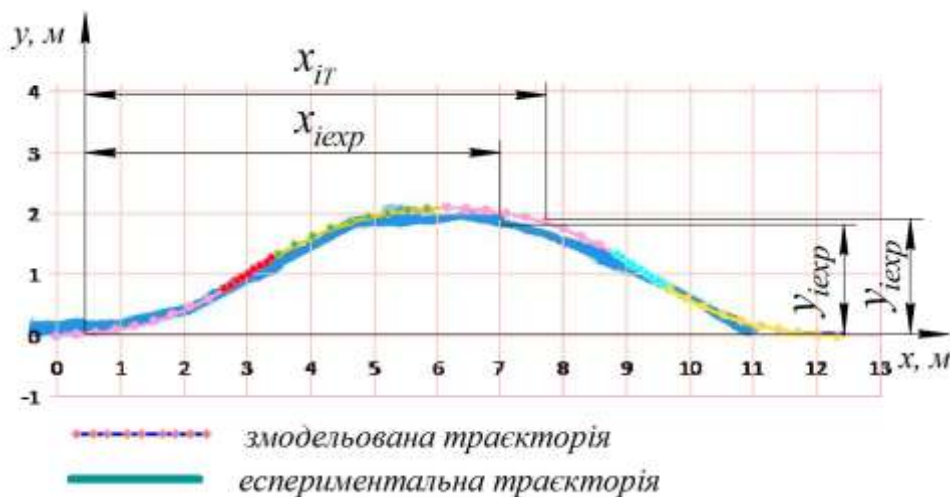


Рисунок 8 – Сумісний перебіг змодельованого та відтвореного крабового маневру 3 модельного енергетичного засобу: $S_{\text{exp}}=12,66 \text{ м}$; $t_{\text{exp}}=12,66 \text{ с}$; $S_T=13,24 \text{ м}$; $t_T=13,24 \text{ с}$

Відповідно до методики проведення експериментальних досліджень, за темою дисертаційного дослідження були отримані експериментальні координати центра ваги енергетичного засобу для кожного з трьох маневрів криволінійного руху, та проведена порівняльна оцінка цих координат до

теоретичних (змодельованих) кожного маневру за допомогою коефіцієнта кореляції Пірсона.

Під час проведення статистичної обробки даних координат змодельованих траєкторій маневрів на відповідність до координат експериментальних маневрів: 1 – грушопобідний розворот з передніми керованими колесами, 2 – вхід (вихід) в лівий (правий) поворот з передніми керованими колесами та рух по колу зі всіма керованими колесами та 3 – крабовий рух, були отримані: значення коефіцієнту кореляції Пірсона, значення критерію узгодженості Пірсона та рівня значущості p-value.

Для маневру – 1 коефіцієнт кореляції Пірсона склав 0,9996; для маневру 2 – 0,9889; для маневру 3 – 0,9744. Оскільки коефіцієнт кореляції Пірсона може змінюватись у діапазоні $[-1; 1]$ і при цьому чим більшим є його абсолютне значення, тим істотніше зв'язок між двома досліджуваними величинами, в даному випадку множинами розрахункових та фактичних координат точок траєкторій маневрів. Отримані значення дають можливість стверджувати, що у всіх в трьох випадках між теоретичними і експериментальними даними існує суттєвий зв'язок.

Для маневру 1 – критерій узгодженості Пірсона дорівнював $\chi^2 = 1,6725 < \chi^2_{кр} = 15,1$; для маневру 2 – $\chi^2 = 0,1534 < \chi^2_{кр} = 13,277$; для маневру 3 – $\chi^2 = 1,1935 < \chi^2_{кр} = 11,345$. Оскільки значення критерію узгодженості Пірсона всіх трьох маневрів менші за критичні допустимі значення і складають малі величини, то немає підстав відхиляти нульову гіпотезу. Тобто різниця між координатами центра ваги енергетичного засобу зі всіма керованими колесами змодельованої траєкторії маневрів та експериментальними координатами траєкторій цих маневрів практично не значна і є узгодженою, а невеликі відхилення вписуються в випадкові коливання. Виявлено що, зі зменшенням значення критерію узгодженості Пірсона координати змодельованої траєкторії не відрізняються від експериментальних.

Рівень значущості нульової гіпотези отриманих на практиці розподілів оцінювали використавши апроксимації p-value для кожного значення χ^2 , отриманого за порівнянням координат теоретичних маневрів з координатами польових маневрів. Визначено, що для маневру 1 – значення p-value складало 0,892; для маневру 2 отримали 0,997; для маневру 3 – 0,7546.

Максимальне значення перевірки нульової гіпотези за допомогою рівня значущості p-value для всіх маневрів складає 1 (100%). Значення цієї величини для всіх 3-х маневрів знаходиться в діапазоні від 75,46% до 99,7%. Рівень значущості становить $\alpha = 0,01$. Це свідчить про те, що відсоток відхилення від встановленого значення вказує на користь нульової гіпотези. Тобто координати відтвореної траєкторії польових маневрів енергетичного засобу зі всіма керованими колесами з координатами змодельованих траєкторій маневрів узгоджені фактично не суперечать експериментальним даним.

У п'ятому розділі «Ефективність застосування запропонованих алгоритмів в системах автоматизованого водіння агрегатів» проведено аналіз класичних методик розрахунку техніко-експлуатаційних показників

використання машинно-тракторного агрегату, в результаті якого встановлено, що на продуктивність відповідного машинно-тракторного агрегату впливають багато факторів, таких як: витрата палива (на одиницю площі під час виконання технологічної операції) G_{ga} та коефіцієнти: використання часу зміни і робочих ходів τ та φ , які залежать від холостого ходу агрегату, а саме від його довжини, на поворотних смугах під час виконання технологічних операцій.

Виявлено, що основним резервом для підвищення продуктивності МТА є коефіцієнт використання робочих ходів, який показує ступінь використання корисної роботи загального шляху агрегату в заїнці. Важливою характеристикою обраного способу руху машинно-тракторного агрегату є відношення сумарного робочого шляху агрегату на заїнці до всього пройденого шляху.

Для оцінки ефективності застосування розробленої математичної моделі криволінійного руху енергетичного засобу на базі запропонованого методу моделювання для виконання різних маневрів польовим агрегатом в складі: трактора (Claas Xerion 5000) і борони (Lemken Gigant 10/1200 Heliodor) були змодельовані два маневри петлеподібного розвороту з використанням тільки передніх керованих коліс та зі всіма керованими колесами.

Застосування результатів теоретичних досліджень при налаштуванні автоматичного керування машинно-тракторного агрегату в складі: трактора (CLAAS XERION 5000) і борони (Lemken Gigant 10/1200 Heliodor) дозволило зменшити розворотну полосу на 11 метрів в разі використання всіх керованих коліс під час розвороту.

В разі використання тільки передніх коліс під час петлеподібного розвороту були отримані такі результати: коефіцієнт використанні робочих ходів $\varphi = 0,9505$; коефіцієнт використання часу зміни $\tau = 0,843$; продуктивність роботи машинно-тракторного агрегату за 1 годину змінного часу $\omega_{год} = 13,36 \text{ га/год.}$.

В разі використання всіх керованих коліс були отримані такі результати: коефіцієнт використанні робочих ходів $\varphi = 0,9623$; коефіцієнт використання часу зміни $\tau = 0,865$; продуктивність роботи машинно-тракторного агрегату за 1 годину змінного часу $\omega_{год} = 13,71 \text{ га/год.}$.

ВИСНОВКИ

В дисертації викладено теоретичні узагальнення та новий розв'язок наукового завдання, яке полягає в розробці малоресурсоемкісної математичної моделі криволінійного руху енергетичного засобу зі всіма керованими колесами. Це дозволило раціоналізувати маневри польового агрегату під час виконання всіх технологічних операцій вирощування культур та покращити кінематичні характеристики енергетичного засобу під час виконання маневрів, тим самим підвищити продуктивність його роботи.

В результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень отримали наступні висновки:

1. Шляхом аналізу математичних моделей криволінійного руху енергетичного засобу зі всіма керованими колесами встановлено: для отримання траєкторії руху польового агрегату застосовуються наближені методи, математичні моделі, графічні методи та сучасні, за допомогою сучасних систем супутникової навігації, але всі вони мають ряд недоліків для використання на практиці і не мають кінцевих математичних рівнянь в параметричній формі для моделювання раціональних маневрів. Тому виникає необхідність у створенні математичної моделі криволінійного руху польового агрегату зі всіма керованими колесами.

2. Розроблена математична модель криволінійного руху у вигляді системи універсальних нових математичних рівнянь залежності координат траєкторії від кута повороту корпусу машини та курсового кута для центра ваги будь-якого енергетичного засобу зі всіма керованими колесами. Ці рівняння описують рух агрегату: вхід в поворот, вихід з повороту, крабовий рух та рух по колу, незалежно від того, які колеса керовані. Отримана система рівнянь враховує інтенсивність повороту керма та дає можливість моделювати за допомогою табличного процесора Microsoft Excel маневри будь-якої складності.

3. На прикладі модернізованого трактора тягового класу 2 моделі ХТЗ-120/160 з колісною формулою 4x4 (зі всіма керованими колесами) за допомогою отриманих математичних рівнянь змодельовані основні прості маневри лівого та правого поворотів з керованими передніми, задніми та всіма колесами та крабовидний поворот з відтворенням схем цих маневрів.

4. Для моделювання маневрів центра ваги енергетичного засобу в лабораторних та польових умовах запропоновані методи на базі табличного процесора Microsoft Excel з використанням створеної математичної моделі криволінійного руху. Для модельного енергетичного засобу зі всіма керованими колесами шляхом використання розробленої методики змодельовано траєкторії трьох складних маневрів з визначенням вихідних параметрів для кожної ділянки та кінцевих параметрів маневру: довжини та часу.

5. Відповідно до розробленої методики шляхом польових досліджень для трьох маневрів (1 – рух з передніми керованими колесами; 2 – петлевидний розворот з передніми керованими колесами та рух по колу зі всіма керованими колесами; 3 – крабовий рух) відтворено траєкторії центра ваги модельного енергетичного засобу за допомогою GPS навігації та програмного забезпечення до планшету. Довжина маневру склала: маневр 1 $S_{EKC} = 23,9\text{м}$; маневр 2 $S_{EKC} = 16,0\text{м}$ та маневр 3 $S_{EKC} = 12,7\text{м}$.

6. Статистична обробка на відповідність координат змодельованої траєкторії до експериментальної становила: маневр 1 (коефіцієнт кореляції Пірсона $0,9996 \rightarrow 1$, критерій узгодженості Пірсона дорівнював $\chi^2 = 1,6725 < \chi^2_{kp} = 15,1$, рівень значимості p-value $0,892 \rightarrow 1$ (100%)); маневр 2 (коефіцієнт кореляції Пірсона $0,9889 \rightarrow 1$, критерій узгодженості Пірсона дорівнював $\chi^2 = 0,1534 < \chi^2_{kp} = 13,277$, рівень значимості p-value $0,997 \rightarrow 1$

(100%)); маневр 3 (коефіцієнт кореляції Пірсона $0,9744 \rightarrow 1$, критерій узгодженості Пірсона дорівнював $\chi^2 = 1,1935 < \chi^2_{кр} = 11,345$, рівень значимості p-value $0,7546 \rightarrow 1$ (100%)). Виконана статистична обробка підтвердила відповідність змодельованих координат траєкторій до експериментальних і встановила: суттєвий зв'язок між координатами; наявні відхилення незначущі і пояснюються випадковими коливаннями, фактично вони не суперечать експериментальним значенням. Це свідчить про адекватність розробленої математичної моделі криволінійного руху центру ваги енергетичного засобу зі всіма керованими колесами і придатність даної моделі для будь-якого енергетичного засобу з будь-якою колісною формулою.

7. Використання запропонованих алгоритмів математичної моделі криволінійного руху для моделювання автоматичного керування польового агрегату в складі: трактора (CLAAS XERION 5000) і борони (Lemken Gigant 10/1200 Heliodor) дозволило підвищити продуктивність МТА на 100 га під час виконання операції боронування на 2,6%, коефіцієнт робочих ходів на 1,2% та коефіцієнт часу зміни на 2,6% за рахунок скорочення ширини поворотної смуги на 11 м, під час виконання петлевидного розвороту з застосуванням всіх керованих коліс.

8. Розрахункова економічна ефективність застосування запропонованих алгоритмів автоматичного водіння польового агрегату під час виконання операції боронування на площі 3868 га в СТОВ «Вікторія» Сумського району Сумської області становить 24755,2 грн.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Стаття у періодичному науковому виданні, проіндексованому у наукометричній базі даних Scopus:

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

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

Статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України:

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

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

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

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

4. Зубко В.М., Сіренко Ю.В., & **Калнагуз О.М.** (2023). Використання алгоритмів під час моделювання маневрів польовими агрегатами. Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів, (3 (53), 32-39. <https://doi.org/10.32782/msnau.2023.3.6>.

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

Тези і матеріали конференцій:

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

6. **Калнагуз О.М.**, Сіренко Ю.В. Отримання траєкторії повороту експериментальним шляхом. Технічне забезпечення інноваційних технологій в АПК: матеріали I Міжнар. наук.-практ. конференції молодих учених (Мелітополь, 01-26 лютого 2021 р.) / ТДАТУ: ред. кол. В.М. Кюрчев, В.Т. Надикто, [та ін.]. - Мелітополь: ТДАТУ, 2021. - 229 с. (с. 213).

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

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

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

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

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

12. **Калнагуз О.М.,** Довжик М.Я., Сіренко Ю.В. Продуктивність машинних агрегатів. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Сучасна інженерія агропромислових і харчових виробництв» (25–26 листопада 2021 року). – Харків: ДБТУ, 2021. – 263 с. (с.125-128).

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

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

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

16. **Калнагуз О.М.,** Сілюченко В.М. Поворот енергетичного засобу та способи його виконання // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Автомобільний транспорт в аграрному секторі: проектування,

дизайн та технологічна експлуатація». – (1-2 грудня 2022 року) Харків: ДБТУ, 2022. – 189 с. (с. 159-160).

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

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

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

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

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

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

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

АНОТАЦІЯ

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

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

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

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

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

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

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

В порівнянні з великими полями, при здійснюванні сільськогосподарських робіт на маленьких полях суттєву частину від всього обсягу робіт займає криволінійний рух (розвороти). При роботі агрегату на полі розвороти

займають десятки кілометрів шляху та входять до непродуктивних втрат, і потребують досконалого вивчення. На ущільнених, деформованих площах полів (розворотних ділянок) маємо зменшення показників родючості. Раціоналізація криволінійного руху польового агрегату не повністю досліджена в наукових працях, тому вивчення економічних показників ефективності використання МТА все більш актуальне.

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

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

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

В даній роботі створений метод аналітичного рішення рівнянь диференційної форми криволінійного руху польових агрегатів. Для ділянок (вхід та вихід) повороту з несталим кутом повороту керуючих коліс центру маси енергетичного засобу зі всіма керуючими колесами були виведені математичні залежності визначення параметрів траєкторії. Ці рівняння дають можливість проводити аналіз характеристик показників під час повороту МТА різних конфігурацій для зниження витрат; моделювати маневри агрегатів при виконанні операцій вирощування культур; для автоматизації управління. Розроблені аналітичні рівняння забезпечують вибір раціонального способу руху енергетичного засобу в залежності від складу МТА.

Також були проведені дослідження аналітичних рівнянь енергетичного засобу по кривим траєкторіям, відтворений чисельний розв'язок рівнянь на прикладі модельного енергетичного засобу з колісною схемою 4x4. Змодельовані траєкторії за допомогою створеної математичної моделі можуть бути використані для створення програм автоматизації переміщення польовим агрегатом по кривим траєкторіям.

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

ABSTRACT

Kalnahuz O.M. Modeling of Curvilinear Motion of Field Aggregates with All Steerable Wheels. – Qualification scientific work submitted as a manuscript.

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

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

Modern power units perform turning maneuvers by rotating the steerable wheels using the so-called kinematic steering method, in which the wheels are oriented parallel to the plane of motion relative to the tractor frame. Four-wheeled tractors and machines with a front steering frame are widely used. Therefore, this dissertation focuses on the investigation of tractors with 4K2 and 4K4 wheel configurations. When studying the motion of a power unit along curvilinear trajectories, it is necessary to obtain analytical equations for the entry into and exit from a turn, as well as for turning with a constant heading angle. The prerequisites for developing trajectory equations for non-steady motion are based on two main factors. The first factor is related to the implementation of automated control of a field aggregate during crop production operations. At present, such attempts are realized by guiding the aggregate along trajectories parallel to the initial straight line of the cultivated field edge. Efforts are also being made to automate turning maneuvers during the

execution of working cycles. For full automation of aggregate motion without a tractor operator throughout the entire working process relative to the initial reference line, accurate data on the exact position of the MTA are required. The control trajectory represents a predefined line of precise motion of the power unit, serving as a theoretical representation of curvilinear motion under any conditions of positional change.

In comparison with large fields, when agricultural operations are performed on small fields, curvilinear motion (turning maneuvers) constitutes a significant portion of the total amount of work. During field operation of the aggregate, turning maneuvers account for tens of kilometers of travel distance and are classified as non-productive losses, thus requiring thorough investigation. On compacted and deformed field areas, particularly headlands (turning zones), a reduction in soil fertility indicators is observed. The rationalization of curvilinear motion of field aggregates has not been sufficiently investigated in scientific studies; therefore, the analysis of economic efficiency indicators of MTA utilization is becoming increasingly relevant.

The way of working cycles and the way during turns with disengaged working implements often have a curvilinear shape. They should be as short and as economical as possible. The choice of the aggregate's mode of motion during the performance of operations should ensure that work requirements are met, such as: minimizing costs per unit of completed work while achieving maximum productivity, ensuring operator safety; reducing environmental impact. The dissertation presents an analysis of published studies and scientific works devoted to the curvilinear motion of power units. In the works of contemporary researchers, there is an effort to describe curvilinear motion using mathematical equations in the form of velocity projections onto coordinate axes; however, these equations are often presented without being solved. In this study, a method for the analytical solution of differential-form equations describing the curvilinear motion of field aggregates is developed. For the turning sections (entry and exit) with a non-steady steering angle of the center of mass of a power unit equipped with fully steerable wheels, mathematical relationships for determining trajectory parameters are derived. These equations make it possible to analyze performance characteristics during turning of MTA with different configurations in order to reduce operating costs, to model aggregate maneuvers during crop production operations, and to enable automation of control. The developed analytical equations provide a basis for selecting a rational mode of motion of the power unit depending on the composition of the MTA.

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

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

Підписано до друку 06.01.2026 р.

Формат 60х90 1/16. Тираж 50 прим.

Друк цифровий. Папір офсетний.

Видавництво та друк — ФОП Вождаєв Ю. М.
40001, Україна, м. Суми, вул. Холодноярської бригади, 24/1

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготівників
і розповсюджувачів видавничої продукції

ДК № 7366 від 21.05.2019 р.

Тел.: +38 (050) 407 56 57

papirus.sumy.ua@gmail.com

www.papirus.org.ua

