

**ВІДГУК  
ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА**

доктора технічних наук, професора кафедри експлуатації та ремонту машин  
Центральноукраїнського національного технічного університету

**АУЛІНА ВІКТОРА ВАСИЛЬОВИЧА**

на дисертацію *Калнагуза Олексія Миколайовича*

на тему «*Моделювання криволінійного руху польових агрегатів зі всіма  
керованими колесами*», що представлена до спеціалізованої вченої ради

Д 23.073.01 при Центральноукраїнському національному технічному університеті  
на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук  
зі спеціальності 05.05.11 – Машини і засоби механізації  
сільськогосподарського виробництва

**Актуальність дисертації**

В умовах сучасного розвитку економіки України аграрний сектор відіграє дедалі важливішу роль, а його частка у формуванні валового внутрішнього продукту має стійку тенденцію до зростання. Аграрне виробництво зазнає суттєвих трансформацій, що пов'язані з упровадженням інноваційних технологій, спрямованих на підвищення врожайності сільськогосподарських культур, адаптацію виробничих процесів до кліматичних змін та широке застосування високопродуктивної, енергоємної й вартісної сільськогосподарської техніки.

Характерною особливістю сучасного технічного забезпечення технологічних процесів є інтеграція в машинних агрегатах як передових технологічних рішень і складних інженерно-конструкторських розробок, так і досягнень інформаційних технологій. Це проявляється у впровадженні систем глобального позиціонування, геоінформаційних технологій, диференційованого виконання технологічних операцій, оптимізації траєкторій руху машинно-тракторних агрегатів, раціонального використання режимів роботи енергетичних засобів, розширення часових інтервалів їх ефективної експлуатації, а також у зменшенні витрат пального й інших матеріальних ресурсів. Разом із тим зазначені інновації зумовлюють суттєве зростання вартості технічних засобів.

За таких умов сучасний агробізнес орієнтується на максимально повне використання потенційних технічних можливостей машин, закладених у їх конструкцію та системи супроводження. Особливої актуальності набувають дослідження, спрямовані на оптимізацію режимів руху машинно-тракторних

агрегатів під час виконання ґрунтообробних технологічних операцій, які характеризуються підвищеною складністю з погляду витрат часу, пального, деформації верхнього шару ґрунту та формування раціональних траєкторій руху.

У зв'язку з цим дисертаційна робота є актуальною, присвячена пошуку оптимальних параметрів, що визначають маневрування ґрунтообробних агрегатів у процесі виконання технологічних операцій. Метою дисертаційного дослідження є встановлення найбільш ефективних параметрів руху агрегатів, розроблення математичних залежностей, які дозволяють комплексно врахувати фактори, що впливають на зміну траєкторій криволінійного руху, а також оцифрування таких траєкторій з метою подальшого формування програмного забезпечення для систем автоматичного керування та водіння агрегатів. Поставлені завдання вирішуються шляхом поєднання математичного моделювання та експериментальних досліджень, спрямованих на адекватне відтворення та перевірку теоретичних положень.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

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)).

### **Виконання індивідуального плану наукової роботи**

Індивідуальний план наукової роботи здобувача *Калнагуза О.М.* був затверджений рішенням вченої ради Сумського НАУ “25” листопада 2005 року (протокол № 6). Коригування теми та зміна наукового керівника відбулася на засіданні вченої ради Сумського НАУ “27” листопада 2017 року (протокол № 5).

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

**Наукові положення, розроблені особисто здобувачем, та їх новизна**

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

*вперше:*

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

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

*удосконалено:*

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

*отримало подальший розвиток:*

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

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

## **Обґрунтованість та достовірність положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації**

Автором проведені необхідні теоретичні та експериментальні дослідження з використанням розроблених і відомих методик. Наукові положення та рекомендації, представлені у дисертації, мають високий ступінь обґрунтованості та достовірності. Усі висновки роботи є логічним результатом проведених досліджень і підтверджуються розрахунками, моделюванням, експериментальними спостереженнями та практичними розробками.

Вони забезпечується підтвердженням достовірними експериментальними траєкторіями несталого руху модельного енергетичного засобу MANITOU зі 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.

Результати дисертаційної роботи є достатньо обґрунтованими, що підтверджується коректністю прийнятих припущень, використанням сучасної теорії аналізу, синтезу, математичного моделювання, теорії автоматичного комп'ютерного моделювання криволінійного руху, необхідною кількістю дисертаційних досліджень. Для розв'язання математичної моделі криволінійного руху енергетичного засобу використовувались чисельні методи.

Достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій підтверджуються збігом теоретичних результатів дисертаційного дослідження, отриманих в результаті використання альтернативних методів дослідження, а також відповідності результатів моделювання з даними, що отримані в польових умовах під час проведення експерименту.

Такий підхід дозволяє вважати наукові положення, висновки та рекомендації дисертації обґрунтованими, достовірними та практично значущими.

### **Апробація результатів дисертації**

Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались і

обговорювались та отримали позитивні відгуки на: VI всеукраїнській науково-практичній конференції "Перспективи розвитку і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу с.-г. машин і знарядь (м. Житомир, 2-3 квітня 2020 р.); міжнародній науково-практичній конференції молодих учених, (м. Мелітополь, 1-26 лютого 2021 р.); XXII міжнародній науковій конференції: «Сучасні проблеми землеробської механіки», присвяченої 121-й річниці з дня народження академіка П. М. Василенка, (м. Ніжин, 16-18 жовтня, 2021 р.); XIII міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки» (м. Кропивницький, 10-12 листопада 2021 р.); 27 міжнародній науково-практичній конференції "Технології XXI сторіччя" (м. Суми, 25-26 листопада 2021 р.); міжнародній III науково-практичній інтернет-конференції «Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі» (м. Мелітополь, 01-26 листопада 2021 р.); XXIII міжнародній науковій конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (м. Київ. Житомир. 16–18 жовтня 2021 р.); міжнародній науково-практичній конференції «Сучасна інженерія агропромислових і харчових виробництв» (м. Харків, 25–26 листопада 2021 року); міжнародній науково-практичній конференції «Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі» (м. Запоріжжя, 1-25 листопада 2022 р.); міжнародній науково-практичній конференції «Автомобільний транспорт в аграрному секторі: проектування, дизайн та технологічна експлуатація» (м. Харків, 1-2 грудня 2022 р.); міжнародній науково-практичній конференції «100-річчя Поліського національного університету: здобутки, реалії, перспективи» (м. Житомир, 1 листопада 2022 р.); міжнародній науково-практичній конференції «Прогресивні технології в сільському господарстві» (м. Суми, 23-25 листопада 2022 р.); IX міжнародній науково-практичній конференції «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу с.-г. машин і знарядь» (м. Житомир, 5 квітня 2023 року); міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні аспекти розвитку автомобільного транспорту України» присвячена 30-ти річчю кафедри автомобілі та автомобільне господарство (м. Кам'янське, 16-18 травня 2023 року); міжнародній науково-практичній конференції «AutoTRAK-

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

### **Повнота опублікування результатів дисертації, кількість наукових публікацій та конкретний особистий внесок здобувача**

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.

**Перелік публікацій за темою дисертації** із зазначенням особистого внеску 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.

### **Відповідність спеціальності**

Зміст дисертації, що представляється до захисту, повністю відповідає спеціальності 05.05.11 – Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва та її темі «Моделювання криволінійного руху польових агрегатів зі всіма керованими колесами».

### **Єдність змісту роботи, оцінка мови та стилю дисертації**

Дисертація та автореферат написані державною мовою. Мова дисертації ділова українська, стиль викладання лаконічний, послідовний з використанням загальноприйнятої науково-технічної термінології, з аргументацією положень, висновків і рекомендацій для практики, що забезпечує їх сприйняття та осмислення і відповідає вимогам до наукових праць.

## **Характеристика академічної доброчесності здобувача**

Дисертаційна робота Калнагуза О.М. є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

## **Оцінка змісту дисертації, її завершеність в цілому**

Основний зміст дисертації викладено у вступі, 5 розділах, висновках та додатках. Основна частина дисертації виконана на 167 сторінках, містить 25 рисунків та 60 таблиць. Також робота має 9 додатків, список використаних джерел з 110 найменувань. Загальний обсяг роботи складає 240 сторінок.

У *вступі*, відповідно до вимог, обґрунтовано актуальність теми та необхідність проведення досліджень, викладений зв'язок роботи з науковими програмами, сформульовано мету та основні завдання дослідження, встановлено предмет та об'єкт дослідження, відображено методи дослідження, визначено наукову та практичну цінність одержаних результатів. Наведено інформацію щодо особистого внеску здобувача в опублікованих працях, а також апробації результатів досліджень.

В *першому розділі* «*Стан питання кінематики криволінійного руху енергетичного засобу зі всіма керованими колесами та задачі дослідження*» проведено ґрунтовні теоретичні дослідження наукових праць кінематики криволінійного руху вітчизняних та закордонних науковців. Проведений аналіз переваг і недоліків математичних моделей криволінійного руху енергетичних засобів, в результаті якого була встановлена необхідність у створенні спрощеної математичної моделі криволінійного руху агрегату зі всіма керованими колесами, яка не є ресурсоємкісною, і може бути застосована для автоматів керування енергетичних засобів.

У *другому розділі* «*Теоретичне обґрунтування траєкторії криволінійного руху чотирьохколісного енергозасобу з усіма керованими колесами*» проведено дослідження кінематичних параметрів енергетичного засобу під час криволінійного руху з розробкою нових математичних рівнянь центру ваги енергетичного засобу зі всіма керованими колесами траєкторії входу (виходу) з лівого (правого) поворотів, з обґрунтуванням придатності даних рівнянь для будь-

якого складного маневру енергетичного засобу з передніми, задніми та всіма колесами керування. Також виведені рівняння криволінійного руху з фіксованим положенням коліс (передніх, задніх, всіх) енергетичного засобу. На прикладі модернізованого трактора тягового класу 2 моделі ХТЗ 120/160 з колісною схемою 4x4 розглянуті всі прості маневри лівого, правого поворотів з використанням різних коліс керування під час здійснення маневрів та крабовий рух з наведенням вихідної схеми маневру та змодельованих траєкторій.

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

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

У *п'ятому розділі «Ефективність застосування запропонованих алгоритмів в системах автоматизованого водіння агрегатів»* визначені шляхи

підвищення ефективності використання машинно-тракторного агрегату при виконанні технологічних операцій вирощування сільськогосподарських культур шляхом застосування запропонованого методу моделювання для виконання різних маневрів польовим агрегатом в складі: трактора (Claas Xerion 5000) і борони (Lemken Gigant 10/1200 Heliodor). В результаті використання запропонованих алгоритмів були отримані рекомендації покращення експлуатаційних показників польового агрегату (на 1,2% коефіцієнт  $\varphi$ ; на 2,6% коефіцієнт  $\tau$  та година продуктивність машинно-тракторного агрегату збільшиться на 2,6%) на поворотних смугах та річний економічний ефект.

**У висновках** стисло сформульовані основні наукові та практичні результати дисертації. Висновки дисертаційного дослідження відображають сутність роботи, мають належний рівень наукової обґрунтованості та підтверджують суттєвий внесок автора у розвиток наукових основ кінематики криволінійного руху польового агрегату.

**У додатках** наведено додаткові матеріали, які доповнюють наукові результати досліджень, а також акти та довідки впровадження результатів досліджень у виробничий та навчальний процеси.

Дисертація є завершеною науковою роботою, в якій досліджується траєкторія криволінійного руху енергетичного засобу зі всіма керованими колесами. Проведено теоретичне моделювання криволінійного руху, результати якого перевірено експериментальними дослідженнями. Усі розділи взаємопов'язані, висновки логічно відображають процес розв'язання задач дослідження, що сприяє цілісному сприйняттю дисертації.

### **Зауваження та дискусійні положення щодо змісту дисертації**

1. Обґрунтування актуальності теми кандидатської дисертації, наведене у вступі, є цілком прийнятним, але можлива його подача в більш стислій формі.

2. Бажано б було в пункті 1.3, за аналізом літературних джерел навести аналітичний вигляд математичних моделей криволінійного руху машино-тракторного агрегату при виконанні сільськогосподарських операцій, які дали можливість дисертанту запропонувати свої варіанти моделей.

3. Не зовсім зрозуміло, як класифікацію поворотів агрегатів (рис.1.1) використано при математичному моделюванні в траєкторії руху машино-тракторного агрегату у даній дисертаційній роботі.

4. Достатньо актуальним є системи паралельного водіння та її переваги щодо водіння енергетичного засобу в складі машино-тракторного агрегату строго по лініям, як паралельним при першому проході агрегату (п.1.4) та за допомогою супутникової навігації проводити контроль руху агрегату як у прямолінійному так і криволінійному напрямках. Як це використано у дисертаційній роботі?

5. В теоретичному обґрунтуванні траєкторії криволінійного руху чотирьохколісного енергетичного засобу з усіма керованими колесами (розділ 2), слід було особливо виділити ті аналітичні вирази, математичні моделі, адекватність яких перевіряється в розділі 4. Це стосується і прикладів моделювання маневрів за допомогою отриманих універсальних рівнянь криволінійного руху.

6. У пункті 3.1 більш доцільно процес моделювання грушоподібного розвороту, із зазначенням маневрів і складових розвороту, з використанням передньої вісі, в лабораторних умовах подати у вигляді блок-схеми алгоритмів. Це стосується і другого маневру петлевидного розвороту з передніми керованими колесами та всіма керованими колесами по колу та третього маневру – крабового руху.

7. Методика використання GPS навігації потребує чіткості у виконанні дій, щоб отримати траєкторію петлеподібного розвороту модельного енергетичного засобу зі всіма керованими колесами у польових умовах.

8. В методиці проведення статистичної оцінки на відповідність координат змодельованої траєкторії маневрів модельного енергетичного засобу зі всіма керованими колесами, слід було зазначити, яке програмне забезпечення використано.

9. Розділи 2 і 4 перевантажені таблицями даних. По можливості, в цих розділах дати типові з них, а решту – розмістити в додатках. У назві таблиць розрахункових даних слід зазначити номери ділянок і маневрів повороту-розвороту машино-тракторного агрегату.

10. Щоб не нагромаджувати отримані числові дані розрахунків (п.п.4.1-4.3) слід навести номери формул за якими йде оцінка коефіцієнтів і показників.

11. Не зовсім точно сформульована назва п. 5.1, в якому розглядається поняття ефективності роботи машино-тракторного агрегату, його продуктивності при виконанні сільськогосподарських операцій і залежність від сукупності зазначених факторів, і методики розрахунку показників ефективності.

12. Раціонально висновки до розділів слід дати більш конкретними і по пунктам.

Наведені зауваження жодним чином не впливають на загальну позитивну оцінку отриманих результатів, не знижують наукової та практичної цінності дисертації та мають дискусійний характер.

#### **Відповідність змісту автореферату основним положенням дисертації.**

Автореферат в повній мірі відображає зміст та положення дисертації. Висновки автореферату та дисертації повністю ідентичні.

**Відповідність дисертації встановленим вимогам** постанови Кабінету Міністрів України № 567 від 24 липня 2013 року «Про затвердження Порядку присудження наукових ступенів», яка поширюється на осіб, які продовжують здобувати науковий ступінь кандидата наук відповідно до абзацу 3 пункту 3 постанови Кабінету Міністрів України № 567 від 27 липня 2016 року та Вимогам до оформлення дисертації, затвердженими наказом МОН України від 12.01.2017 № 40.

З огляду на важливість і актуальність поставленої задачі, достатній обсяг теоретичних та експериментальних досліджень, отримання наукових і практичних результатів, впровадження розробок в виробництво і навчальний процес вважаю, що дисертаційна робота *Калнагуза О.М.* є оригінальною, самостійно виконаною, завершеною науковою кваліфікаційною працею, у якій обґрунтовані результати дослідження та запропонований метод моделювання траєкторії нелінійного руху центра ваги енергетичного засобу польового агрегату зі всіма керованими колесами, запропонований та визначений здобувачем.

## Загальний висновок щодо відповідності встановленим вимогам

На підставі проведеного аналізу змісту дисертаційної роботи, її структури, рівня обґрунтованості наукових положень, достовірності отриманих результатів, їх новизни та практичної цінності, достатнього рівня апробації результатів досліджень на наукових міжнародних конференціях, відсутності порушення академічної доброчесності, вважаю, що дисертація є завершеним самостійним науковим дослідженням, яке відповідає вимогам до дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.

Дисертація здобувача **Калнагуза Олексія Миколайовича** за темою «*Моделювання криволінійного руху польових агрегатів зі всіма керованими колесами*» повністю відповідає вимогам наказу Міністерства освіти і науки України № 40 від 12 січня 2017 року «Про затвердження вимог до оформлення дисертації», постанови Кабінету Міністрів України № 567 від 24 липня 2013 року «Про затвердження Порядку присудження наукових ступенів», яка поширюється на осіб, які продовжують здобувати науковий ступінь кандидата наук відповідно до абзацу 3 пункту 3 постанови Кабінету Міністрів України № 567 від 27 липня 2016 року, а її автор – **Калнагуз Олексій Миколайович** заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.11 – Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва.

Офіційний опонент:  
професор кафедри  
експлуатації та ремонту машин  
Центральноукраїнського національного  
технічного університету,  
доктор технічних наук, професор



Віктор АУЛІН

Підпис проф. Ауліна В.В. засвідчую

проректор з наукової роботи та  
міжнародних зв'язків



Андрій ТИХИЙ