

## **ВІДГУК**

офіційного опонента академіка НААН України,  
доктора технічних наук, професора, завідувача кафедри механіки Національного  
університету біоресурсів і природокористування України

**Булгакова Володимира Михайловича**

на дисертаційну роботу **Калнагуза Олексія Миколайовича**

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

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

Детальний аналіз дисертації дозволяє сформулювати наступні узагальнені  
висновки щодо актуальності, ступеня обґрунтованості основних наукових  
положень, висновків, рекомендацій, достовірності, наукової новизни,  
практичного значення, а також загальної оцінки роботи.

### **Актуальність теми дисертації**

Підвищення ефективності використання машинно-тракторних агрегатів  
належить до актуальних науково-прикладних проблем сучасної агроінженерії.  
Водночас питання результативності виконання маневру «поворот» під час  
криволінійного руху в межах технологічного циклу агрегатів залишаються  
недостатньо дослідженими та потребують подальшого наукового опрацювання і  
вдосконалення. Технологічний цикл транспортних і транспортно-технологічних  
агрегатів передбачає виконання руху як на робочих, так і на транспортних  
швидкостях, у структурі яких криволінійний рух є невід'ємною складовою. У  
зв'язку з цим одним із важливих наукових завдань є моделювання процесу  
повороту, що вимагає високоточного визначення траєкторії криволінійного руху  
агрегату.

На сучасному етапі розвитку техніки особливої актуальності набуває  
проблема комплексної автоматизації машинно-тракторних агрегатів. У провідних  
наукових дослідженнях значна увага приділяється автоматизації систем  
керування навісним і причіпним обладнанням, окремими механізмами трактора та

агрегатом у цілому. Разом із тим визначальною залишається необхідність ґрунтового дослідження криволінійного руху трактора під час розворотів агрегатів при виконанні польових робіт. Раціоналізація та оптимізація таких маневрів дає змогу зменшити непродуктивні витрати потужності, а також запобігти пошкодженню ґрунтового покриття на ділянках виконання розворотів. Ігнорування зазначених аспектів призводить до додаткових матеріальних і енергетичних витрат, пов'язаних із відновленням стану оброблюваних площ.

Розв'язання вказаних завдань можливе лише на основі поглибленого аналізу кінематичних і динамічних характеристик криволінійного руху машинно-тракторного агрегату. Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-технічної проблеми підвищення показників ефективності експлуатації машинно-тракторного агрегату під час виконання технологічних операцій з вирощування сільськогосподарських культур шляхом дослідження криволінійного руху енергетичного засобу зі всіма керованими колесами і моделювання траєкторій його криволінійного руху є актуальною науковою задачею, а її вирішення має важливе народногосподарське значення.

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

Актуальність теми дисертаційної роботи підтверджується також тим, що дослідження, які виконувалися на базі Сумського національного аграрного університету в рамках науково-дослідної роботи кафедри агроінжинірингу та фінансуються за рахунок коштів державного бюджету України, входять як складові державних наукових програм: «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.) та «Обґрунтування методології синтезу технології; складу елементів машинного парку та оптимального використання ґрунтів за умови максимуму врожайності конкретної сільськогосподарської культури» (НДР 0124U001116. (2024 – 2028 pp.).

## **Наукова новизна одержаних результатів та їх значення для науки та виробництва**

Аналіз матеріалів дисертаційної роботи свідчить про те, що автором на основі комплексу теоретичних досліджень, результатів експериментальних досліджень і методів комп'ютерного моделювання отримана наукова новизна, яка полягає в моделюванні маневрів криволінійного руху машинно-тракторного агрегату з побудовою малоресурсної моделі, яка дає можливість збільшити його продуктивність:

- вперше розроблені 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;

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

- удосконалені 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;

- отримали 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;

- отримав подальший розвиток 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.

## **Аналіз змісту дисертації. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації**

Сформульоване наукове завдання, яке полягає в теоретичному обґрунтуванні та практичній реалізації питань щодо підвищення ефективності використання енергетичного засобу зі всіма керованими колесами при експлуатації машинно-тракторного агрегату, знайшло нове вирішення у представленому дослідженні. Основні теоретичні та практичні напрацювання автора ґрунтуються на критичному аналізі і узагальненні наукових праць вітчизняних і зарубіжних науковців, а також на результатах власних досліджень.

Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел з 110 найменувань і 9 додатків. Анотація викладена на 5 сторінках. Повний обсяг дисертації викладено на 240 сторінках комп'ютерного тексту (основна частина – 167 сторінок (7 друкованих аркушів)), в тому числі містить 25 рисунків, 60 таблиць.

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям механізації сільськогосподарського виробництва. Об'єкт, предмет та мета роботи логічно пов'язані. 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.

У **вступі** відображено сутність та актуальність науково-технічної проблеми, наведено наукову гіпотезу, визначено мету та завдання дослідження, методи дослідження, наукову новизну та практичну значущість роботи, наведено відомості щодо апробації дисертаційної роботи та публікації за темою дисертації.

У **першому розділі «Стан питання кінематики криволінійного руху енергетичного засобу зі всіма керованими колесами та задачі дослідження»** проведено ґрунтовний огляд та аналіз наукових літературних джерел, розкрита сутність наукової проблеми, у яких досліджуються питання кінематики криволінійного руху. Чітко обґрунтована необхідність в дослідженні траєкторії

криволінійного руху енергетичного засобу зі всіма керованими колесами при виконанні технологічних операцій, вдосконалення якої дозволить зменшити непродуктивні витрати потужності та забезпечить оптимізацію агрегату з базовим програмним забезпеченням.

У другому розділі *«Теоретичне обґрунтування траєкторії криволінійного руху чотирьохколісного енергозасобу з усіма керованими колесами»* проведено теоретичне обґрунтування кінематичних параметрів криволінійного руху енергетичного засобу зі всіма керованими колесами. Для обґрунтування кінематичних параметрів руху енергетичного засобу розроблена спрощена математична модель криволінійного руху центру ваги енергетичного засобу зі всіма керованими колесами, яка придатна на практиці для всіх можливих ділянок поворотів будь-яких керованих коліс енергетичного засобу під час здійснення складного маневру. Отримані рівняння для колового руху центра ваги енергетичного засобу зі всіма керованими колесами з фіксованим положенням керма. Графоаналітично змодельовані всі види найпростіших маневрів криволінійного руху та крабовий рух на прикладі енергетичного засобу другого тягового класу моделі ХТЗ-120/160 з колісною формулою 4х4 з використанням різних коліс керування.

У третьому розділі *«Програма та методика проведення експериментального дослідження траєкторії руху модельного енергетичного засобу»* розроблено програму експериментальних досліджень, наведено описи лабораторного обладнання та приладів, а також методики виконання моделювання розворотів і поворотів в лабораторних умовах за допомогою табличного процесора Microsoft Excel, проведення польових експериментів на базі модельного енергетичного засобу зі всіма керованими колесами з використанням GPS навігації та статистичного аналізу отриманих результатів. Розроблені методи моделювання трьох маневрів грушоподібного розвороту польового агрегату на базі модельного енергетичного засобу зі всіма керованими колесами.

У четвертому розділі *«Перевірка адекватності математичної моделі*

***криволінійного руху енергетичного засобу зі всіма керованими колесами»*** представлені результати моделювання змодельованих маневрів грушоподібного розвороту модельного енергетичного засобу з використанням передніх та всіх коліс керування за допомогою табличного процесора Microsoft Excel та отримані траєкторії цих маневрів в польових умовах з статистичною оцінкою на відповідність координат теоретичних маневрів модельного енергетичного засобу з координатами польових траєкторій.

У п'ятому розділі ***«Ефективність застосування запропонованих алгоритмів в системах автоматизованого водіння агрегатів»*** наведено економічне обґрунтування використання запропонованих алгоритмів для автоматичного управління при виконанні технологічної операції боронування польового агрегату в складі: трактора (Claas Xerion 5000) і борони (Lemken Gigant 10/1200 Heliodor), які дозволяють зменшити непродуктивні витрати на розворотах, що забезпечує покращення паливної економічності та підвищення продуктивності роботи агрегату.

Наукові положення, висновки та рекомендації представлені автором у роботі є достовірними та науковообґрунтованими. Кожен етап досліджень ґрунтується на об'єктивних даних та закономірностях, які достатньо повно висвітлені в роботі. Результати аналітичних досліджень збігаються із результатами натурних експериментів, а також із апробованими результатами, що опубліковані в наукових роботах. Наведені положення ґрунтуються на розрахунках, моделюванні та отриманих результатах теоретичних та експериментальних досліджень криволінійного руху енергетичного засобу. Це забезпечується застосуванням раціональної сукупності сучасних загальнонаукових і спеціальних методів та засобів наукового пізнання. Одержані здобувачем наукові результати відзначаються логічною послідовністю та належним рівнем аргументованості. Усі пункти висновків логічно випливають із результатів досліджень, приведених автором у дисертації. Наведені у висновках результати пройшли виробничу апробацію, що підтверджується відповідними документами.

Інформаційною базою роботи є 110 літературних джерел, в яких проаналізовано праці науковців з проблематики дослідження, що в свою чергу, забезпечило достатній рівень достовірності і обґрунтованості, як теми, так і дисертаційної роботи в цілому.

Таким чином, наукові положення, висновки та рекомендації, які отримані в результаті досліджень, є достовірними.

### **Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях**

Основні положення і результати дисертаційного дослідження в достатній мірі викладено в фахових виданнях. Теми публікацій відповідають змісту дисертації. За матеріалами дисертації опубліковано 23 наукові праці, серед яких 3 статті у наукових фахових виданнях України та 1 стаття у наукових фахових виданнях, які входять до міжнародної наукометричної бази даних Scopus, а також 19 тез доповідей на наукових міжнародних та всеукраїнських конференціях України.

Наукові публікації відповідають вимогам п. 2 Наказу МОН України від 23.09.2019 р. №1220 «Про опублікування результатів дисертацій на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук».

Основні положення роботи висвітлені в наукових фахових публікаціях та представлені на наукових конференціях.

### **Практичне значення і впровадження одержаних результатів дослідження.**

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).

Матеріали досліджень в дисертації, впровадженні в навчальний процес на кафедрі агроінжинірингу Сумського національного аграрного університету при викладанні освітніх компонентів: «Експлуатація машин і обладнання», «Геоінформаційні системи та технології», «Системи точного землеробства та їх використання в аграрному виробництві», «Інформаційні технології, штучний інтелект та системи точного землеробства», «Аналіз та оптимізація технологічних процесів в рослинництві» та «Апаратне і машинне забезпечення в системах точного землеробства» для спеціальності Н7 «Агроінженерія» за наступними освітньо-професійними програмами: ОПП «Агроінженерія» перший (бакалаврський) рівень вищої освіти та ОПП «Системи точного землеробства» другий (магістерський) рівень вищої освіти.

Результати дослідження та пропозиції автора, викладені у дисертаційній роботі, пройшли апробацію та прийняті до впровадження у виробництво в СТОВ «Вікторія» (с. Великий Бобрик, Сумського району) та ТОВ «ЮПІТЕР 9 АГРОСЕРВІС» (м. Суми). Акти впровадження датовані груднем 2022 року.

**Оцінка мови, стилю, оформлення дисертації та дотримання вимог академічної доброчесності.**

Мова дисертації ділова українська, стиль викладання лаконічний, послідовний з використанням загальноприйнятої науково-технічної термінології. Дисертаційна робота оформлена відповідно до затверджених вимог до оформлення дисертації (наказ МОН України від 3 лютого 2017 р. №40), структура роботи логічна, матеріали розділів викладено відповідно до мети і поставлених завдань, які відповідають сутності об'єкту і предмету дослідження. Ілюстрований матеріал має високий ступінь інформативності.

Зміст дисертації дозволяє констатувати глибину проведеного дослідження та суттєву новизну наукового доробку. Поставлена в роботі мета досягнута здобувачем, а визначені завдання вирішені. Об'єкт і предмет дослідження узгоджується з метою роботи. Зміст дисертації свідчить про глибокі знання



здобувача в галузі проблематики дослідження, вміння формулювати завдання дисертації і знаходити шляхи їх ефективного вирішення.

Аналіз змісту анотації засвідчує її відповідність основним положенням, які викладено в тексті дисертації. Анотація не містить положень чи ідей, які не зазначені в основному тексті дисертації. Мета дослідження відповідає темі дисертаційної роботи. Зміст сформульованих наукових завдань структурно і логічно узгоджений, їх кількість є достатньою для розкриття теми дисертації та досягнення поставленої мети.

Дисертаційна робота має логічну структуру, а її зміст повною мірою розкриває тему наукового дослідження. Між розділами та підрозділами роботи є належний взаємозв'язок, усі розділи містять рисунки, таблиці посилання на літературні джерела, які додатково презентують суть проведеного дослідження.

Дисертаційна робота містить оригінальні дослідження. Пройшла перевірку на дотримання вимог академічної доброчесності з використанням програми StrikePlagiarism, результати перевірки було надано для ознайомлення.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадиння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота здобувача Калнагуза Олексія Миколайовича є результатом самостійних досліджень і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

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

Зміст автореферату в достатній мірі відображає основні положення та результати дисертаційної роботи, висновки в дисертації та в авторефераті співпадають.

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

1. При обґрунтуванні актуальності обраної теми автор констатує про необхідність розробки малоресурсоємкої математичної моделі криволінійного руху чотирьохколісного енергетичного засобу зі всіма керованими колесами, але при цьому ні у вступі, ні в першому розділі дисертації немає посилань на

роботи, які стосуються саме оцінки ресурсоемкості відомих моделей, особливо в порівнянні кінематичних та динамічних моделей. Отже вибір на користь кінематики на наш погляд є недостатньо розкритим і обґрунтованим.

2. Зважаючи на сучасний стан рослинництва в Україні та у світі доля чотирьохколісних енергетичних засобів зі всіма керованими колесами є не значною. На сьогодні в Україні таких машин одиниці. По цій причині в експериментальній частині роботи довелося використовувати модельний енергетичний засіб. Отже виникає питання, чому криволінійний рух саме чотирьохколісних енергетичних засобів із жорсткою рамою та всіма керованими колесами обрано в якості об'єкту дослідження. Можливо, наприклад, енергозасоби із зламною рамою та передніми керованими колесами є більш перспективними для України й світу.

3. При розробці математичної моделі криволінійного руху (розділ 2) автор вводить до розгляду припущення, що тангенс і синуси кутів повороту передніх  $\alpha_1$  і задніх  $\alpha_2$  коліс, а також курсового кута  $\alpha$ , і кута повороту рами енергетичного засобу  $\varphi$  з огляду на їх малість прийнято рівними відповідним кутам. Таке припущення допустиме тільки для випадку старту агрегату за умови коли всі перелічені кути дорівнюють нулю, а всі маневри починаються і завершуються в процесі руху. Якщо, наприклад, спочатку викрутити руль, а потім стартувати, то такий маневр запропонована модель буде описувати зі значною похибкою. Ліпше було використати ряди Тейлора (Макларена), або многочлени Чебишова першого роду, тим більше, що в подальшому в іншому випадку автор ряди Макларена використовує для апроксимації тригонометричних функцій синуса і косинуса. В даному випадку запропонований автором варіант це окремий випадок, коли кількість членів полінома дорівнює одиниці.

4. В процесі математичного моделювання (розділ 2, вираз 2.3) наведено, що координати  $x$  та  $y$  функціонально пов'язані із трьома незалежними змінними, а саме курсовим кутом  $\alpha$ , кутом повороту рами енергетичного засобу  $\varphi$  і часом  $t$ .

Скоріш за все це є опечаткою, оскільки в подальшому функцію курсового кута  $\alpha$  прийнято як лінійну по відношенню до часу  $t$ . При цьому введено коефіцієнт пропорційності  $k$ , який є сумою аналогічних коефіцієнтів для передніх  $k_n$  і задніх  $k_z$  керованих коліс. В подальшому  $k_n$  та  $k_z$  автор розглядає як незалежні параметри запропонованої моделі. Насправді між інтенсивністю повороту передніх і задніх коліс є функціональний зв'язок і його характер залежить від налаштування системи рульового керування енергетичного засобу.

5. В другому розділі роботи розроблено досить універсальну математичну модель непрямолінійного руху енергетичного засобу. Ця математична модель при певному виборі параметрів може бути використаною для двовісних енергетичних засобів із передніми, задніми, або всіма керованими колесами, для тривісних енергозасобів (коли дві задні некеровані осі розглядають як одну) і навіть для гусеничних енергозасобів (коли гусеничний рушій розглядають, як одну вісь). Але не зрозуміло, чому не розглянуто оптимізаційну задачу. Якими мають бути параметри моделі і відповідно енергетичного засобу, аби маневр мав мінімальний радіус, чи мінімальну довжину шляху? Чому немає ніяких рекомендацій для виробників техніки стосовно компоновання енергозасобів та узгодження параметрів і режимів виконання маневру. Наприклад, можна було обґрунтувати функціональний зв'язок між параметрами  $k_n$  та  $k_z$  (коефіцієнтами інтенсивності повороту керованих коліс передньої і задньої осей).

6. Розділ 3 в якому викладено програму та методика проведення експериментальних досліджень переобтяжена загально відомою інформацією із математичної статистики, а розділ 4 де наведено результати досліджень переобтяжено цифровим матеріалом. Обидва розділи присвячені обґрунтуванню адекватності запропонованої математичної моделі але немає спроби її застосування з метою обґрунтування рекомендацій для виробництва (аграріїв та виробників сільськогосподарської техніки). Відповідно і у висновках ці питання не висвітлено.

7. В пункті 7 загальних висновків йдеться про ефективність застосування «... запропонованих алгоритмів математичної моделі криволінійного руху для

модельовання автоматичного керування польового агрегату сільськогосподарського призначення ...» але самого алгоритму в повному розумінні цього терміну в дисертації не наведено.

Однак, наведені зауваження жодним чином не впливають на загальну позитивну оцінку отриманих результатів, не знижують наукової та практичної цінності дисертації.

### **Загальний висновок та оцінка дисертації.**

В цілому дисертаційна робота **Калнагуза Олексія Миколайовича** *«Модельовання криволінійного руху польових агрегатів зі всіма керованими колесами»* є закінченою, самостійно виконаною науково-дослідною роботою, яка містить нові наукові положення, має теоретичне та практичне значення. Робота вирішує конкретну наукову задачу – підвищення показників ефективності експлуатації машинно-тракторного агрегату при виконанні технологічних операцій вирощування сільськогосподарських культур шляхом дослідження і модельовання траєкторії криволінійного руху агрегату зі всіма керованими колесами. За рівнем актуальності теми, новизною та закінченістю виконаних досліджень, обґрунтованістю і достовірністю висновків дисертаційна робота заслуговує позитивної оцінки.

Обрану тему дисертаційної роботи розкрито в повному обсязі, розв'язано поставлені завдання, досягнуто мету дослідження, отримані нові наукові результати, які мають теоретичне значення та практичну цінність. Зміст дисертації, її структура відповідають спеціальності 05.05.11 – Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва. Науковий рівень та практична цінність дисертації повністю відповідають вимогам пунктам 9, 11, 12, 13 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, пунктам 2, 3 та 4 Паспорту спеціальності 05.05.11 – Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва постанови ВАК України від

11.05.2005 №22-08/4, 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:  
завідувач кафедри механіки  
Національного університету біоресурсів  
і природокористування України,  
академік НААН України,  
доктор технічних наук, професор



Володимир БУЛГАКОВ

