



УДК 631.3.07

Д. П. Журавель, д.т.н.

ORCID: 0000-0002-6100-895X

А. М. Бондар, к.т.н.

ORCID: 0000-0002-4761-9084

Г. І. Дашивець, к.т.н.

ORCID: 0000-0003-2612-6077

В. В. Паніна, к.т.н.

ORCID: 0000-0001-9623-516X

*Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного*

e-mail: dmytro.zhuravel@tsatu.edu.ua

## ОБҐРУНТУВАННЯ ШВИДКІСНИХ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ МАШИННО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТУ

*Анотація.* У статті обґрунтовано швидкісні параметри машинно-тракторного агрегату (МТА) під час виконання технологічних операцій. Розглянуто найбільш поширені сільськогосподарські операції, які потребують підвищеної точності виконання. Розроблена схема руху МТА вздовж базової лінії, яка дала змогу розробити математичну модель руху транспортного засобу з традиційним та адаптивним рульовим керуванням. Проведені розрахунки руху МТА у віртуальному режимі: з використанням ЕОМ та польові випробування. Випробування МТА проводилися на різних швидкісних режимах (зміна відбувалося від 1 м/с до 3,6 м/с) під час виконання другої міжрядної обробки кукурудзи. Отримані результати підтверджують ефективність використання адаптивного рульового керування на підвищених швидкісних режимах.

*Ключові слова:* рульове керування, маневреність, траєкторія руху, базова лінія, міжрядний обробіток, агротехнічні вимоги.

*Постановка проблеми.* Інтенсифікація сільськогосподарського виробництва - це насамперед збільшення продукції з одиниці займаної площі при можливо менших витратах матеріальних засобів і праці. Якість робіт, які виконують механізми, багато в чому обумовлена стабільністю технологічних процесів [1-5].

Варто визначати межі оптимальних режимів роботи та знайти технологічні прийоми, які дозволять різко підвищити продуктивність праці. У зв'язку з переходом до комплексної механізації та автоматизації виробничих процесів стабільність сільськогосподарських процесів здобуває ключове значення.



В зв'язку з удосконаленням конструкцій машин, керування ними ускладнюється. З'являється проблема керування за допомогою машин. Однак автоматизація керування економічно вигідна лише за певних умов [6-10].

*Аналіз останніх досліджень.* Керованість трактора є важливим експлуатаційним фактором, який впливає на агротехнічні, експлуатаційні та техніко-економічні показники машинно-тракторного агрегату, але в той же час, це дуже широке поняття, тому що включає в себе такі питання як стійкість, стабільність руху та маневреність колісної машини. Розв'язанням проблем, пов'язаних із використанням рульових механізмів з нелінійною характеристикою займалися такі науковці, як: А. С. Литвинов, Д. Р. Еллис, І. В. Ходес, М. Н. Лисов, М. А. Подригало, Ч. М. Лавров, А. Т. Лебедев., М. А. Бахмутський, І. О. Ефремов, Ю. І. Судаков, В. М. Шабалов, В. О. Петров, М. М. Лубяний, В. Ф. Коновалов та ін. Ними було встановлено, що найбільш ефективними є рульові керування із плавною нелінійною характеристикою, а найбільш перспективними для вдосконалення є гідравлічні та гідрооб'ємні рульові керування [11-15].

Найбільш прогресивним є застосування двоканальної схеми рульового керування, яка дозволяє змінювати функціональні властивості рульового приводу залежно від технологічної потреби. Наприклад, змінювати передаточне число рульового механізму залежно від швидкості руху МТА.

Такий підхід дає змогу значно підвищити технологічні швидкості під час виконання сільськогосподарських операцій із повним дотриманням агротехнічних вимог до відповідних операцій [16-20].

*Формулювання цілей статті.* Підвищення ефективності роботи колісних тракторів при виконанні сільськогосподарських операцій за рахунок використання рульового керування із адаптивним передаточним співвідношенням.

*Основні матеріали дослідження.* Розрізняють стабілізуючу, програмну й стежачу системи керування. Стабілізуюча система зберігає регульовану величину незмінною. Система програмного керування змінює регульовану величину по заданій програмі. У системах стеження регульована величина також змінюється за часом, але закон зміни її заздалегідь невідомий.

Людина-оператор може застосовувати всі види керування, і залежно від ситуації переходити від одного виду керування до іншого [1-3].

У сучасних сільськогосподарських агрегатах в основному застосовують керування по розімкнутому циклу; автоматичне керування із замкнутим або комбінованим циклом і керування за участю людини по замкнутому циклу.

Сполучення звичайного рульового механізму з механізмом приводу для повороту направляючих коліс - це передача з виграшем у силі (звичайно з постійним передатним числом або з передатним числом, що змінюється по заданому постійному законі). При деяких значеннях повороту передаточне число може бути іншим, ніж при малих кутах повороту рульового колеса (рис. 1).



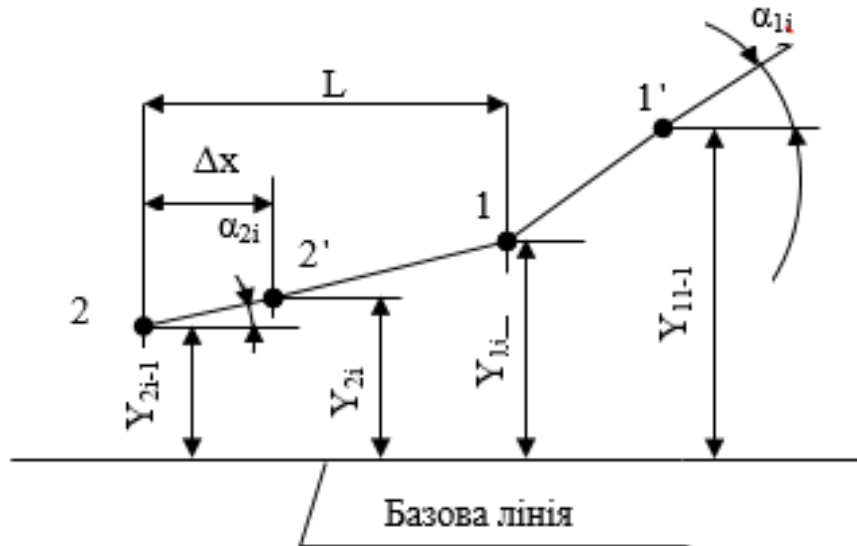
Рисунок 1. Структурна схема гідропідсилювача рульового керування

Гідравлічна система керування дозволяє задавати на вході будь-яку закономірність -  $M(t)$  або  $\omega(t)$  - та одержувати на виході збільшену копію цих функцій. Причому для виконання роботи на виході використовується енергія двигуна [4].

Відомо, що у даний час використання натурних експериментів може відбуватися лише після того, як буде виконана їх апробація на різноманітних симуляторах. Це дозволяє заощадити кошти та час, а також виявити значну кількість недоробок на етапі проектування. Дуже важливою є розробка симуляторів, які б працювали в інтерактивному режимі. Саме тому була розроблена математична модель з покроковим обчисленням положення транспортного засобу відносно базової лінії під час руху.

В основу побудови математичної моделі покладена схема двоточкової моделі. Тому для визначення положення об'єкта на площині необхідно знати дві точки або одну точку та курсовий кут [5,6].

Відповідно з цим, схема процесу керування МТА вздовж базової лінії буде мати наступний вигляд (рис.2).



$L$  – довжина колісної бази трактора;  $\alpha_1$  – кут повороту передніх керуючих коліс;  $\alpha_2$  – поточне значення курсового кута;  $Y_1, Y_2$  – поточне значення відхилень від базової лінії переднього та заднього коліс трактора відповідно;  $\Delta x$  – шаг квантування моделі по переміщенню

Рисунок 2. Схема переміщення МТА вздовж базової лінії

Дискретна математична модель традиційного рульового керування в даному випадку має вигляд (1):

$$\begin{cases} a_{1i} = \frac{a_i}{W}; & \Delta x = V_i \cdot \Delta t; \\ a_{3i} = \frac{(Y_{1i-1} - Y_2)}{L}; \\ Y_{1i} = Y_{1i-1} + (a_{3i} + a_{1i} + \delta_i) \cdot \Delta x; \\ Y_{2i} = Y_2 + a_{3i} \cdot \Delta x \end{cases} \quad (1)$$

де  $V$  – швидкість руху МТА;

$W$  – передаточне відношення рульового механізму;

$\Delta t$  – крок квантування по часу (0,05 с);

$\delta$  – значення збурюючого кута вводу еластичних шин.

Під час руху машинно-тракторний агрегат відхиляється від заданої траєкторії внаслідок дії на нього зовнішніх збурюючих факторів. Це призводить до того, що оператору необхідно постійно виконувати корегуючі дії рульовим колесом.

При застосуванні адаптивного рульового керування передаточне співвідношення розраховувалось наступним чином:

$$W_i = W \left( 1 + \frac{V}{V_0} \right), \quad (2)$$

де  $V_0$  - середнє значення швидкісного діапазону МТА (const).

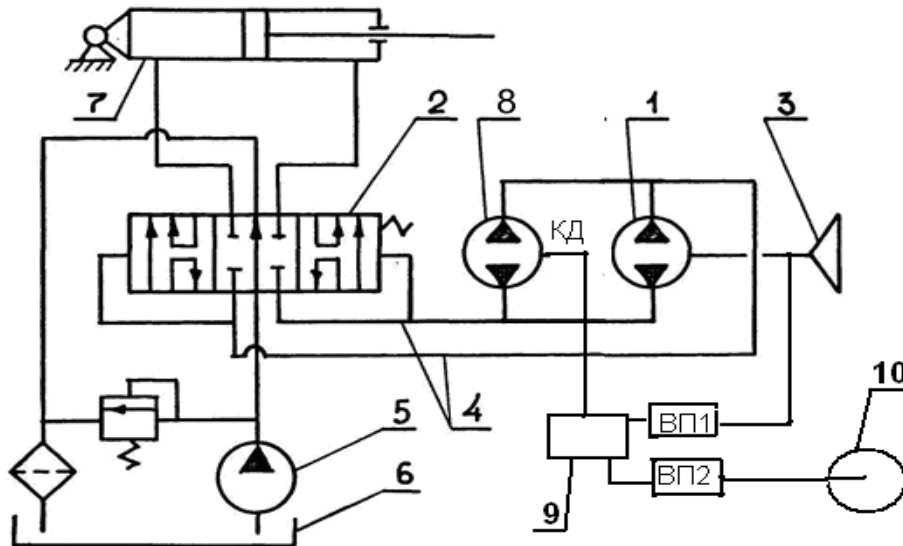
Для того, щоб провести дослідження математичної моделі був розроблений комп'ютерний імітатор, який дав змогу проводити віртуальний заїзд у інтерактивному режимі. При цьому також порівнювались результати процесу керування МТА із традиційним рульовим керуванням і адаптивним рульовим керуванням, тобто з перемінним передаточним співвідношенням рульового механізму.

Враховуючи рівняння (2), систему (1) можливо записати у наступному вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta x = V_i \cdot \Delta t; \\ W_i = W \left( 1 + \frac{V_i}{V_0} \right) \\ a_{1i} = \frac{a_i}{W_i}; \\ a_{2i} = \frac{(Y_{1i-1} - Y_2)}{L}; \\ Y_{1i} = Y_{1i-1} + (a_{3i} + a_{1i} + \delta_i) \cdot \Delta x; \\ Y_{2i} = Y_2 + a_{3i} \cdot \Delta x \end{array} \right. \quad (3)$$

Для вирішення питання організації адаптивного рульового керування була розроблена конструкція гідрооб'ємного рульового керування з постійною чутливістю [9-12]. Замість механічного диференціала в управлінні використовувалось одноконтурне гідрооб'ємне рульове керування з двома паралельно включеними насосами-дозаторами: основним і корегуючим. Це дає можливість корегувати чутливість рульового керування МТА на всіх швидкісних режимах.

Для цього додатковий насос-дозатор оснащений кроковим мікропроцесорним сервоприводом з двома вимірювальними перетворювачами, які пов'язані з рульовим валом та колесом транспортного засобу таким чином, щоб вимірювальні перетворювачі були пов'язані з мікропроцесорним сервоприводом, який керує кроковим двигуном (рис. 3).



1 – основний насос-дозатор, 2 – гідравлічно-керований золотник, 3 – рульове колесо, 4 – гідравлічні канали, 5 – підживлюючий насос, 6 – картер, 7 – виконавчий гідромеханізм, 8 – корегуючий насос-дозатор, 9 – мікропроцесорний сервопривод, 10 – керуюче колесо.

Рисунок 3. Схема гідрооб'ємного рульового керування з постійною чутливістю

Розроблена математична модель адаптивного рульового керування забезпечує сумісність високої маневреності і стабільності руху МТА на підвищених технологічних швидкостях.

Експеримент проводився на ЕОМ, що дало змогу провести дослідження у повному обсязі, а також з урахуванням агротехнічних вимог. Результати експерименту наведено на рис. 4-6. Після завершення заїзду результати оброблялись розробленими програмами і наводились у наступному вигляді:

Тип рульового керування:	постійної чутливості
Величина перешкод:	2
Довжина колісної бази, м.:	2750
Передатне відношення керма	2 – 19
Кількість експериментальних точок, шт.:	1024

Дисперсія:	5,30043844722863E-5
Середнє квадратичне відхилення, м.:	0,012528041100984596
Коефіцієнт асиметрії:	2,11890430213473
Екссес:	8,46024030617446
Добротність, с <sup>-1</sup> :	80,365990913745743

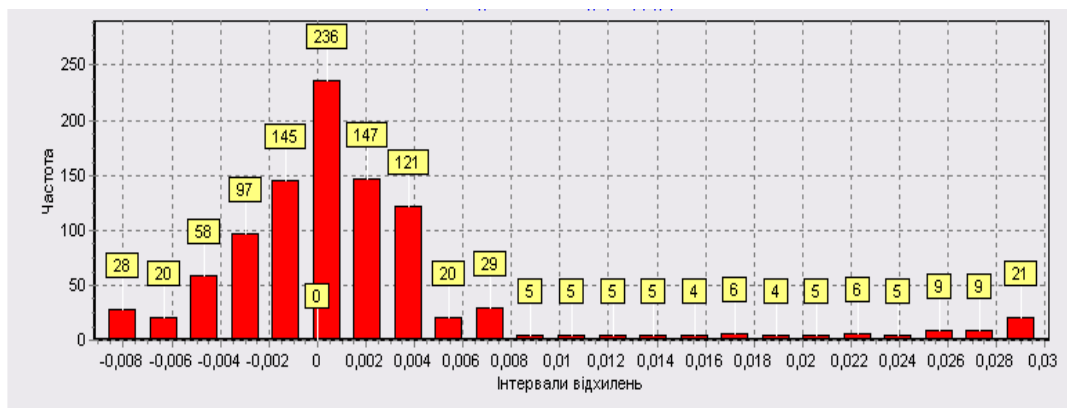


Рисунок 4. Гістограма вихідного відклику відхилень від середини дороги

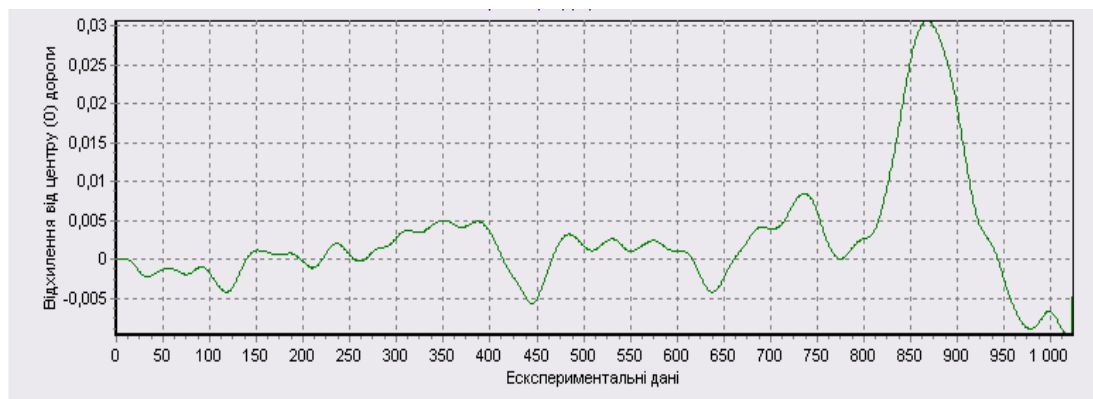


Рисунок 5. Траєкторія руху МТА

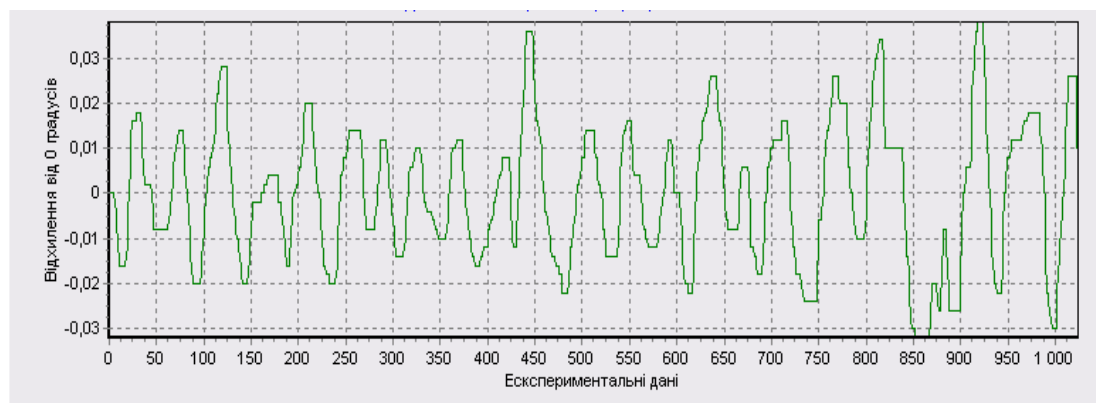


Рисунок 6. Динаміка повороту керма МТА

Також, окрім графіків, були отримані статистичні характеристики руху МТА у повздовжній площині за допомогою вбудованих в програму обчислюваних пакетів.

Було встановлено, що закономірності добротності керування машинно-тракторного агрегату залежно від швидкості його руху в цілому підкоряються закономірностям теорії руху колісної машини. Аналіз результатів імітаційного моделювання при використанні МТА, із традиційним рульовим механізмом та МТА в якому використане рульове керування з постійною чутливістю наведено в табл. 1.

Таблиця 1

## Результати імітаційного моделювання

Швидкість руху МТА, м/с, (км/год)	Добротність, $s^{-1}$ / Середньоквадратичне відхилення, м							
	МТА з традиційним рульовим керуванням				МТА з адаптивним рульовим керуванням			
	1	2	3	Середнє арифметичне	1	2	3	Середнє арифметичне
1 (3,6)	150/0,016	148/0,014	149/0,015	149/0,015	161/0,009	158/0,010	159/0,011	159/0,010
2 (7,2)	85/0,034	81/0,033	86/0,038	84/0,035	123/0,016	124/0,017	128/0,015	125/0,016
3 (10,8)	64/0,070	62/0,074	63/0,069	63/0,071	122/0,021	125/0,023	122/0,019	123/0,021
4 (14,4)	49/0,088	51/0,104	53/0,096	51/0,096	119/0,023	121/0,025	122/0,024	121/0,024

На підставі експериментальних даних були побудовані графіки добротності руху МТА залежно від швидкості його руху, в лабораторних умовах (рис.7).

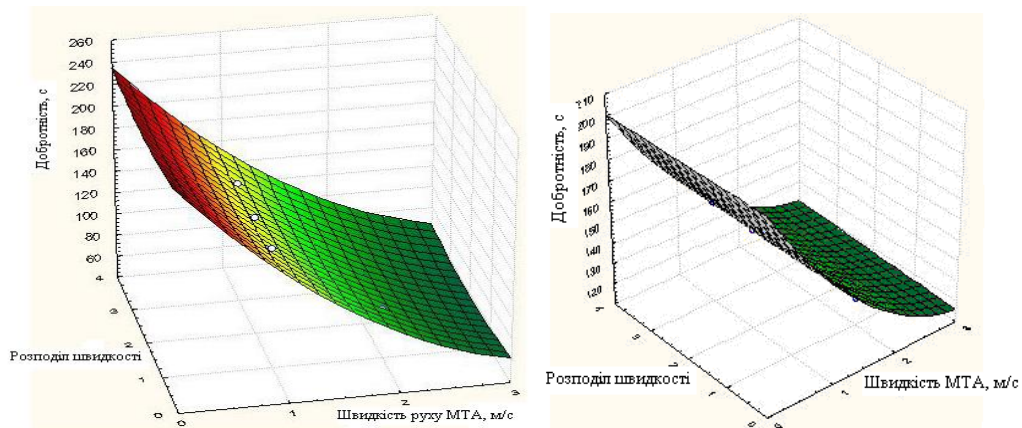


Рисунок 7. Добротність процесу руху МТА залежно від швидкості



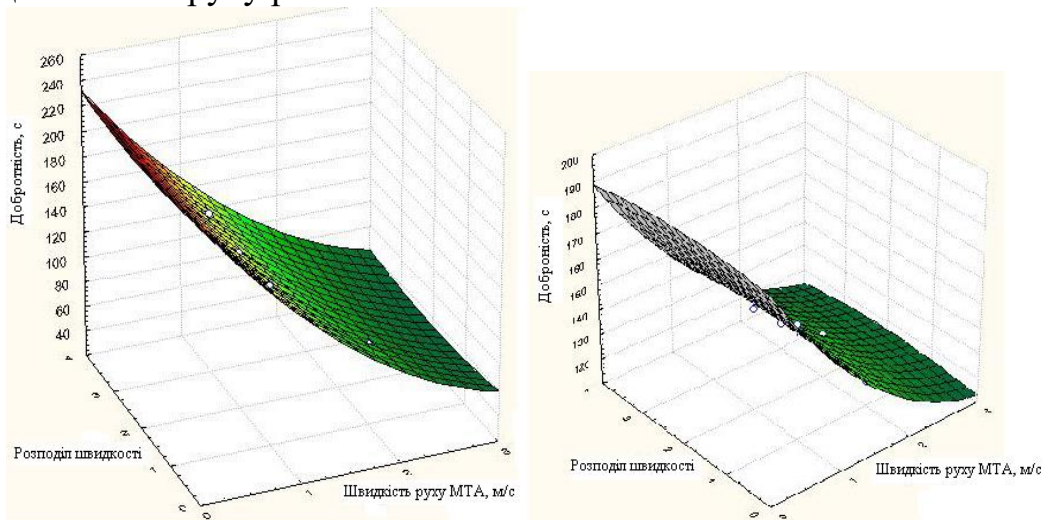
Для перевірки адекватності математичної моделі був проведений польовий експеримент, результати наведено в табл. 2.

Таблица 2

## Результати польових досліджень

Швидкість руху МТА м/с , (км/год)	Добротність, с <sup>-1</sup> / Середньоквадратичне відхилення, м							
	МТА з традиційним рульовим керуванням				МТА з адаптивним рульовим керуванням			
	1	2	3	Середнє арифметичне	1	2	3	Середнє арифметичне
1 (3,6)	146/0,019	144/0,014	147/0,017	146/0,016	156/0,0125	151/0,012	155/0,01	154/0,011
2 (7,2)	84/0,039	79/0,033	81/0,035	82/0,036	120/0,019	128/0,017	121/0,018	123/0,018
3 (10,8)	61/0,081	57/0,071	56/0,068	58/0,073	122/0,025	118/0,023	121/0,025	120/0,024
4 (14,4)	45/0,093	49/0,111	50/0,105	48/0,103	116/0,026	120/0,026	117/0,026	118/0,026

У результаті аналізу даних, отриманих під час польового експерименту, були побудовані графіки добротності МТА залежно від швидкості його руху рис. 8.



а) традиційне рульове керування; б) адаптивне рульове керування  
Рисунок 8. Добротність процесу руху МТА залежно від швидкості

Внаслідок проведених розрахунків встановлено, що залежності протікання процесу керування МТА є подібними. Ступінь співпадіння даних, отриманих за допомогою імітаційного моделювання та даних, які отримані під час польового експерименту складає 92-98 %. Це свідчить про добру відтворюваність процесу керування МТА під час виконання сільськогосподарських технологічних операцій, а різниця у



відсотках присутня внаслідок того, що були прийняті деякі припущення.

*Висновки.*

1. Аналіз конструкцій рульових керувань колісних тракторів українського та зарубіжного виробництва показав, що в сільськогосподарських МТА передбачено або фіксоване значення передаточного числа рульового механізму, або воно змінюється в незначних межах. Встановлено, що найбільш суттєві фактори які впливають на керованість МТА є - швидкість руху, передаточне відношення рульового механізму, зовнішні збурюючі фактори, чутливість рульового керування, тип рульового керування, а також людський фактор.

2. Розроблено новий спосіб, конструктивна схема та спроектований експериментальний зразок адаптивного рульового керування, яке забезпечує змінення передаточного співвідношення в межах 2...19, залежно від швидкості руху МТА при виконанні технологічних операцій, при обробці будь-яких просапних культур, які вирощуються в Україні.

3. Розроблена математична модель адаптивного рульового керування дає можливість за допомогою імітації збурюючих факторів, які впливають на прямолінійність руху МТА, кута його повороту та геометричних параметрів, а також швидкості руху, отримувати показники процесу, які забезпечують дотримання усіх агротехнічних вимог щодо підрізання культурних рослин та якості підгортання. Наприклад, при появі збурюючих факторів, які виникають при міжрядній обробці кукурудзи, основний показник процесу – відхилення від прямолінійності складає 10 см при досягненні МТА максимальної технологічної швидкості  $V_{max} = 4$  м/с.

4. Розроблено програмне забезпечення, яке дає змогу оцінити якісні показники процесу керування різних типів рульових механізмів. За рахунок вбудованих у нього прикладних програм можливо одночасно проводити всі три етапи експерименту: введення даних, виконання віртуального заїзду, розрахунок результатів.

5. У результаті проведення польових експериментів були отримані дані, які підтверджують адекватність математичної моделі. При цьому різниця результатів не перевищує 8%, що свідчить про добру відтворюваність процесу керування МТА під час виконання будь-яких сільськогосподарських операцій.

Список використаних джерел

1. Boltianska N. Integrated approach to ensuring the reliability of complex systems. *Current issues, achievements and prospects of Science and education: Abstracts of XII International Scientific and Practical Conference*. Athens, 2021. P. 231-233.



2. Журавель Д. П., Бондар А. М., Дашивець Г. І. Дослідження адаптивної роботи рульового управління транспортного засобу в швидкісному режимі. *Сучасні наукові дослідження на шляху до Євроінтеграції: матеріали міжнар. наук.-практ. форуму (21-22 червня 2019 р.): у 2-х ч. / ТДАТУ. Мелітополь, 2019. Ч. 1. С. 203-204.*
3. Бондар А. М. Обґрунтування показників експлуатаційної надійності енергетичних засобів. *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали II Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференції. Мелітополь: ТДАТУ, 2020. С. 467-473.*
4. Журавель Д. П., Бондар А. М. Несправності рульового керування та їх наслідки. *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали II Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференції. Мелітополь: ТДАТУ, 2020. С. 478-479.*
5. Бондар А. М. Технологія ремонту рульових рейок. *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали II Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференції. Мелітополь: ТДАТУ, 2020. С. 537-538.*
6. Данов Б. А. Электронные системы управления иностранных автомобилей. Москва: Телеком, 2002. 224 с.
7. Цизь І. Є., Тарасюк В. В. Ремонт сільськогосподарських машин: конспект лекцій. Луцьк: Луцький НТУ, 2014. 181 с.
8. Вахламов В. К. Автомобили. Конструкция и элементы расчета. Москва: Академия, 2006. 480 с.
9. Сідашенко О. І., Науменко О. А. Ремонт машин та обладнання: підручник. Київ: Агроосвіта, 2014. 665 с.
10. Черновол М. І., Власенко М. В., Наливайко В. М. Обладнання ремонтних підприємств. Київ: Урожай, 1996. 272 с.
11. Анализ и перспективы развития мехатронных систем управления торможением колеса / В. Г. Бутылин и др. *Мехатроника. Механика. Автоматика. Электроника. Информатика. 2000. № 2. С. 33-38.*
12. Buzzi B. F., Romero N. N., Martins D., de Souza Vieira R. Dimensional Synthesis of a Two-Axles Steering System. *Multibody Mechatronic Systems. MuSMe 2021. Mechanisms and Machine Science. 2021. Vol. 94. P. 57-64. DOI: 10.1007/978-3-030-60372-4\_7.*
13. Design and Optimization of Static Characteristics for a Steering System in an ATV / L. Rajeshkumar et al. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 954. 012009. DOI: 10.1088/1757-899X/954/1/012009.*
14. Wang X.-C., Chen X., Ge Z.-J., Ma R. Position Control of Gas Rudder Steering Gear Based on Extended State Observer. *Tuijin Jishu/Journal of Propulsion Technology. 2020. Vol. 1, № 10. P. 2341-2347.*



15. Xu B., Miao J. Design and Mechanical Characteristics of External Prestressed Reinforcement. Wuhan Ligong Daxue Xuebao (Jiaotong Kexue Yu Gongcheng Ban). *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering)*. 2020. Vol. 44, № 5. P. 881-885, 891.

16. Design of Automatic Steering System Based on Direct Connection of DC Motor and Full Hydraulic Steering Gear / Y. Yang et al. *Nongye Jixie Xuebao/Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*. 2020. Vol. 51, № 8. P. 44-54, 61.

17. Bhalerao S., Paramane A., Chavan A. Design and Development of Steering System for Formula-Styled Vehicle. *Reliability and Risk Assessment in Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. P. 275-283. DOI: 10.1007/978-981-15-3746-2\_25.

18. Tuan N. X., Dinh H. T., Van Bang N. Research on Dynamic Modelling for Hydraulic Power Automotive Steering Systems with Nonlinear Friction. *Advances in Engineering Research and Application. ICERA 2019. Lecture Notes in Networks and Systems*. 2020. Vol. 104. P. 620-627. DOI: 10.1007/978-3-030-37497-6\_71.

19. Muenster M., Lehner M., Rixen D. Requirement derivation of vehicle steering using mechanical four-poles. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019. Vol. 133. 106231. DOI: 10.1016/j.ymssp.2019.07.012.

20. Lee B. Development of hybrid power steering system for commercial vehicle. *SAE Technical Papers 2019-01-1415, 2019*. DOI: 10.4271/2019-01-1415.

Стаття надійшла до редакції 1.12.2021 р.

**D. Zhuravel, A. Bondar, H. Dashyvets, V. Panina**  
**Dmytro Motornyi Tavria state agrotechnological university**

## **JUSTIFICATION OF HIGH-SPEED PARAMETERS OF MACHINE-TRACTOR UNIT OPERATION**

### *Summary*

The article analyzes the state and perspective directions of development of steering wheel tractors and determines the factors that affect the control process of the machine-tractor unit (MTA) during the transport mode and when performing technological operations. The most common agricultural operations requiring increased accuracy are considered. Particular attention is paid to inter-row cultivation of row crops, as they require increased precision. On the example, of the second inter-row processing of corn. A new method of vehicle control has been developed, which ensures the adaptability of the steering gear ratio depending on the speed of movement. A kinematic diagram of the MTA movement along the baseline has been developed, which made it possible to develop a mathematical model of vehicle movement, both with traditional and adaptive



steering. A mathematical model of the MTA movement in the longitudinal plane with a new method of steering has been investigated. Comparative tests of the stability of the movement of the MTA in virtual mode and field tests were carried out. The study in virtual mode was carried out using a computer and the corresponding programs built into it. At the same time, the program allows obtaining data with a time quantization of 0.05 s, which is significantly less than the operator's response time to external disturbances. Virtual and field tests of the MTA were carried out at different speed modes - the change occurred from 1 m / s to 3.6 m / s when performing the second inter-row corn cultivation. The results obtained confirmed the effectiveness of the use of adaptive steering at high speed modes in accordance with agro technical requirements. The results obtained confirm the effectiveness of the use of adaptive steering at high speed modes.

**Key words:** steering, maneuverability, trajectory of movement, baseline, inter-row processing, agro technical requirements.

**Д. П. Журавель, А. Н. Бондарь, Г. И. Дашивец, В. В. Панина**  
**Таврический государственный агротехнологический университет**  
**имени Дмитрия Моторного**

## **ОБОСНОВАНИЕ СКОРОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ МАШИННО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТА**

### *Аннотация*

В статье исследовано движение машинно-тракторного агрегата (МТА) при выполнении технологических операций и влияние возмущающих факторов, влияющих на параметры его движения. Рассмотрены наиболее распространенные сельскохозяйственные операции, требующие повышенной точности выполнения. Разработана схема движения МТА вдоль базовой линии, позволяющая разработать математическую модель движения транспортного средства с традиционным и адаптивным рулевым управлением. Произведены расчеты движения МТА в виртуальном режиме: с использованием ЭВМ и полевые испытания. Испытания МТА проводились на разных скоростных режимах (изменение происходило от 1 м/с до 3,6 м/с) при выполнении второй междурядной обработки кукурузы. Полученные результаты подтверждают эффективность использования адаптивного рулевого управления на повышенных скоростных режимах.

**Ключевые слова:** рулевое управление, маневренность, траектория движения, базовая линия, междурядная обработка, агротехнические требования.