

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-3>

УДК 631.3.004.6

D. Zhuravel, Dr. habil.

ORCID: 0000-0002-6100-895X

A. Bondar, PhD.

ORCID: 0000-0002-4761-9084

*Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University*e-mail: dmytro.zhuravel@tsatu.edu.ua

IMPROVEMENT OF THE CONTROL SYSTEM OF WHEEL TRACTORS

Summary. The scientific article substantiates the importance of adaptive steering for the controllability of wheeled tractors, in particular, taking into account important factors such as speed, gear ratio of the steering mechanism, external disturbing factors and others. The developed mathematical model allows you to effectively control the process of tracking the trajectory of the machine-tractor unit, ensuring compliance with agrotechnical requirements. When inter-row processing of corn, the deviation from straightness can be 10 cm when reaching a maximum speed of 4 m/s, which shows the importance of adaptive control to achieve the required accuracy and quality of processing.

Keywords: steering, gear ratio, maneuverability, baseline, movement speed, movement trajectory, deviation.

Introduction. Control systems of modern wheeled tractor are very diverse and in many respects determine the initial properties of the equipment – maneuverability, mass, dimensions, traction and traction properties; permeability; width of capture, speed and productivity of work, skidding, crushing of the upper layer and compaction of deep soil layers [1–5].

Agricultural energy means work in various loading and speed modes with increased non-safety movement and mandatory compliance with agrotechnical, ergonomic and energy indicators (narrow corridor, row spacing, crowding of people and animals, poor road conditions and off-road), therefore strict requirements are placed on the main parameters of their turn control systems.

Moreover, the rapid development of technology has recently led to a two- or even three-fold increase in external influences: power has increased – from 300 to 700 hp, weight – from 10–15 to 40–50 tons, the load on the axle has increased – from 10 to 20 t, road dimensions in width – from 2.5 to 3.5 m, the number of axles – from 2 to 3 or 4. Today, the increase in these parameters has reached its limits, and it is usually limited by the tractor control system.

At the same time, agricultural production needs further growth in productivity, yield, cost reduction, and the use of new technologies. But nature and existing structures cannot cope with this – the soil is over-compacted, there is not enough moisture, the working organs of machines constantly break, etc.

A radical improvement in increasing the speed and controllability of machines is possible based on the use of modern advances in automation. Thus, it is proposed to develop a steering drive that can provide high controllability of vehicles at all speed modes.

Recent research and publications analysis. The concept of controllability of a wheeled machine is ambiguous and is interpreted differently by different authors. Thus, researchers involved in the development of various means of automatic driving [6–12] believe that controllability is the ability of a unit operating under load to accurately follow a given trajectory. Others consider controllability as the ability of the car to withstand the trajectory set by the driver through the steering mechanism, including straight-line movement and turning mode with a given radius, including under the influence of external forces [13–18]. Some understand by controllability the ability of the unit to track the

position of the steered wheels, that is, a property that does not depend on the driver, but belongs to the unit as a dynamic system that interacts with the external environment.

Despite the fact that the concept of controllability differs somewhat among researchers, they all consider it as a property of the “man-unit-soil” system. Therefore, it is necessary to consider this concept in a complex manner, taking into account all components of this system. Given the fact that such an element as “man” is unstable in it, the management process itself is a rather subjective concept. Thus, if the driver is highly qualified, he can better ensure the movement of tractor with a slight deviation from the given trajectory of movement. But, if the working conditions are quite difficult (poor visibility, a lot of weeds, complex topography of the field, fatigue, etc.), then the driver may make various mistakes, and if the flow of information becomes too large and continues for a long time, then a disruption in work may occur person, there will be a deficiency in the form of bending of baselines, cutting of cultivated plants, etc.

The steering control is designed to maintain and change the direction of movement of the wheeled tractor in accordance with the actions of the operator. It is a part of the complex of mechanisms and aggregates of the tractor control system [1, 7, 9, 11, 19–22].

Purpose statement. Study of patterns of impact of tractor speed parameters in the longitudinal plane on the efficiency of agricultural technological operations.

Results and discussion. The maneuverability of the tractor is an important operational property of the wheeled machine, which determines the efficiency of their use and the safety of movement.

A large number of works are devoted to the study of the maneuverability of wheeled vehicles and machine-tractor units (based on wheeled tractors). The analysis of the results of these works made it possible to compile the structure of maneuverability as a complex operational property, which includes simpler (main) properties (Fig. 1) [23–26].

Analyzing the given scheme, it can be stated that the maneuverability of the machine-tractor unit is an important operational factor that affects the agrotechnical, operational and technical-economic indicators of its work. But at the same time, this is a very broad concept, because it includes such issues as actual controllability, turning, and fitability of the machine [27–33].

Having considered the designs of the existing steering controls [1, 2, 3, 13, 29], it can be concluded that none of them can completely resolve the technical contradiction between the maneuverability of a wheeled vehicle and its controllability – at high speeds, a reduced sensitivity of the steering control is necessary, and when maneuvering on the contrary, it is increased [2, 3, 29].

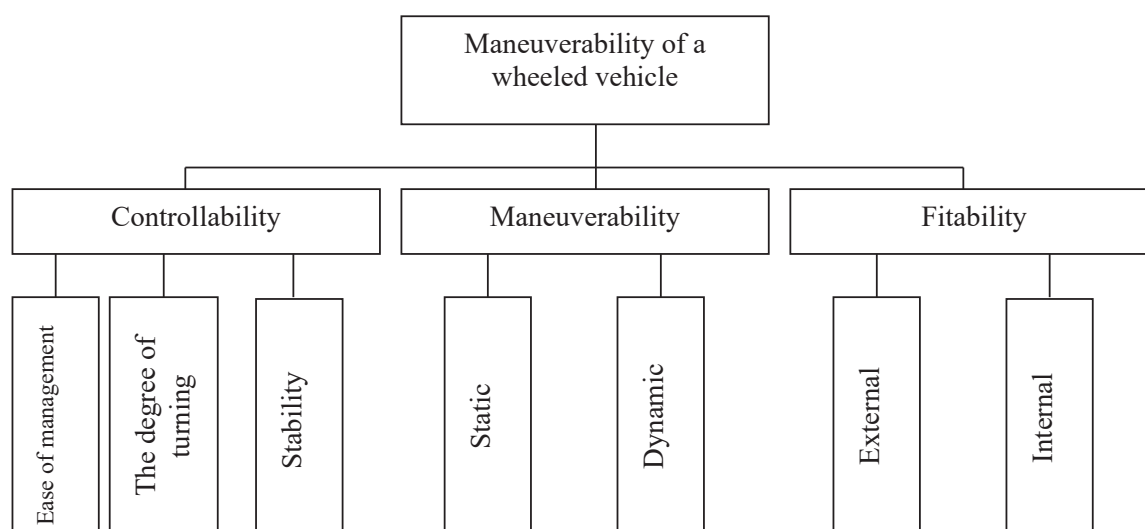


Fig. 1. Structure of tractor maneuverability properties (based on wheeled tractors)

It is known that a wheeled chassis with traditional steering as a control object is an integrator with variable parameters. The turning of the vehicle on the terrain is the result of accumulation in the course of longitudinal movement. This creates inconsistencies in the control process at different speeds. When maneuvering at low speeds (up to 10...20 km/h), the steering sensitivity (ξ) is insufficient, and at high speeds (ξ) it is excessive.

We note that sensitivity means the intensity of the control object's response to a single control influence. To control the direction of movement of the vehicle, the sensitivity of the steering control ω_r is the ratio of the change in the angular speed of the car to the angle of rotation of the steering wheel that caused it.

Within the framework of the existing mechanical schemes of steering drives, the sensitivity is set by the steering gear ratio W , as a rule, constant ($W = \text{const}$) (The gear ratio is the ratio of the angle of rotation of the steering wheel to the angle of rotation of the driven wheels of the chassis).

For convenience when maneuvering, it is desirable to reduce the gear ratio, and in transport (high-speed) – to increase it.

It is known that low-speed cars have a steering gear ratio of 4...6, and high-speed cars have up to 30. When designing the steering, the gear ratio is chosen to be large enough to ensure stability of movement at high speeds, which leads to inconvenience when maneuvering.

Thus, a variant of the steering drive is offered, which ensures high controllability of vehicles at all speed modes (Fig. 2).

Variants of execution of the summing mechanism are known [13–17, 29]: for heavy machines, you can use a two-circuit hydrovolume steering with a free spool. For this purpose, the servo pump dispenser is connected in parallel with the main dispenser pump.

The functional purpose of the adder is to compose the control influence (steering wheel rotation) and correction (from the servo drive) in order to ensure the necessary transmission ratio of the steering drive.

The servo drive makes a corrective effect, the value of which is regulated by its microprocessor.

The microprocessor uses information about the intensity of the control influence (VP1) and the speed of the vehicle (VP2), which comes from the corresponding measuring transducers.

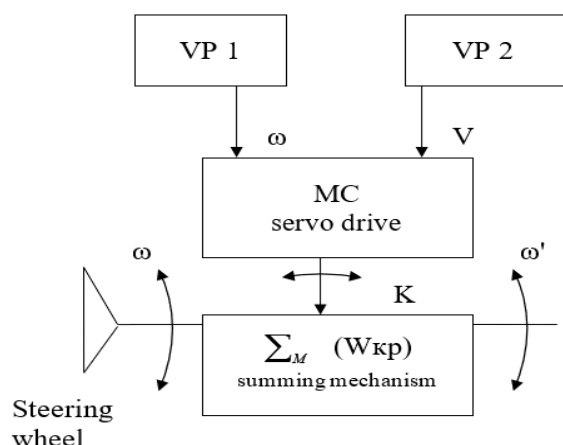


Fig. 2. Structural diagram of the steering drive

The structure of the steering drive includes the following devices:

- summing mechanism (Σ_m);
- servo drive with microprocessor control;
- measuring transducers for steering wheel rotation (VP1) and vehicle speed (VP2).

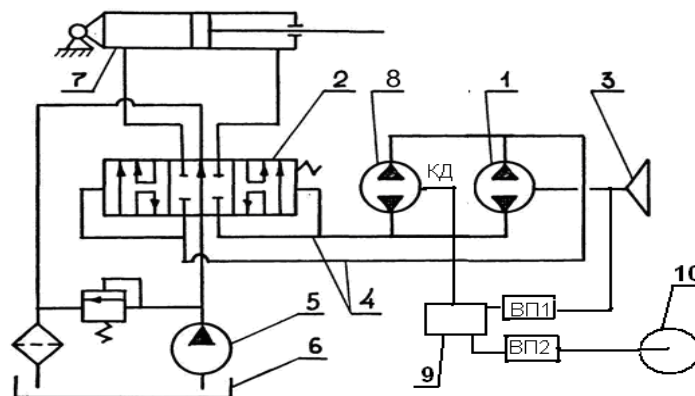


Fig. 3. Scheme of twochannel hydraulic power steering with constant sensitivity: 1 – the main dosing pump; 2 –hydraulically controlled spool; 3 – steering wheel; 4 – hydraulic channels of the main and correcting dosing pumps; 5 –feeding pump; 6 – crankcase; 7 – hydraulic cylinder of the steering mechanism; 8 – correcting dosing pump with a stepper motor; 9 – servo drive; 10 – steering wheel

The performance of experimental studies was ensured by the developed hydraulic volume steering with constant sensitivity [9, 29], the hydraulic scheme of which is shown in Fig. 3.

It is known that currently the use of natural experiments can take place only after they have been tested on various simulators. This allows you to save money and time, as well as identify a significant number of defects at the design stage. It is very important to develop simulators that would work in an interactive mode. This especially applies to the “man-machine” system. The purpose of developing such a system is to establish a relationship between the controllability of the machine-tractor unit on the one hand, the conditions of its movement, the design and parameters of the steering – on the other. Based on the above, – the “man-machine” system, which is connected with a large number of informational, psychological and physical processes, is subject to modeling. The most important and complex link of this system is a person, that is, an operator. This is explained by the fact that he needs to monitor the external conditions on the road and in the field, maintain the engine in optimal mode, despite the fact that the speed and load on the working organs are constantly changing. It is also necessary to monitor the working bodies and control devices of the tractor and timely perform corrective actions in accordance with the technological process and external conditions. And, of course, the driver receives additional psychological and physical stress when working at night, on slopes, and even more so in mountains.

The purpose of mathematical modeling is step-by-step calculation of the position of the vehicle relative to the baseline during movement. This allows you to get high-quality controllability indicators. To do this, you need to know the current value of the course angle α_1 and the displacement of the determined point of the vehicle Y. The calculation of each subsequent position is carried out depending on the properties of the steering wheel, movement parameters (speed), the current value of the control and disturbing influences. At the same time, the mathematical model must take into account the kinematic characteristics of the vehicle.

The construction of the mathematical model is based on a two-point “bicycle” model. Therefore, to determine the position of the object on the plane, it is necessary to know two points or one point and the heading angle [3, 29].

Accordingly, the diagram of the tractor management process along the baseline will have the following form (Fig. 4).

To build a mathematical model of the tractor movement process along the baseline, the following assumptions were made:

- the reaction speed of the tractor driver-operator is constant, does not depend on weather conditions and does not exceed 2.5 seconds;
- the influence of such factors as backlash in the steering mechanism, the connection between the elastic tire and the road surface, and the fluctuation of the lateral force on the tractor axles is comprehensively taken into account in the form of the input angle δ , which is generated by the program and has a normal distribution law.

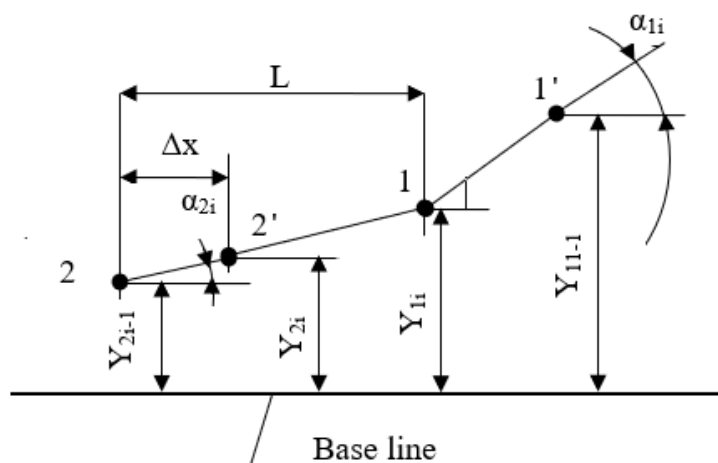


Fig. 4. Tractor movement scheme along the baseline: L – is the length of the wheel base of the tractor; α_1 – turning angle of the front steering wheels; α_2 – current value of course angle; Y_1, Y_2 – the current value of deviations from the baseline of the front and rear wheels of the tractor, respectively; Δx is the quantization step of the model by displacement

Limitation:

- tractor speed varies from 1 to 4 m/s (3.6 to 14.4 km/h);
- the gear ratio of the steering mechanism (traditional steering) is 19;
- the gear ratio of the steering mechanism (experimental version) changes in automatic mode from 2 to 19;
- disturbing effects of external factors affect the steering wheels and deviate them from the neutral position within $0-5^\circ$;
- the start of data generation will take place only after the tractor reaches the technological speed of movement.

The discrete mathematical model of traditional steering in this case looks like this:

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

where V is the tractor movement speed, m/s;

W – transmission ratio of the steering mechanism;

Δt – time quantization step (0.05 s);

δ is the value of the perturbing angle of insertion of elastic tires.

During movement, the machine-tractor unit deviates from the given trajectory due to the action of external disturbing factors on it. This leads to the fact that the operator must constantly perform corrective actions with the steering wheel.

With a two-channel steering scheme, the gear ratio will be calculated as follows:

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

where V_0 is the average value of the tractor speed range (const).

In order to conduct a study of the mathematical model, a computer simulator was developed, which allows you to conduct a virtual race in an interactive mode. At the same time, the results of the tractor control process were also compared with traditional steering and adaptive steering, that is, with a variable gear ratio of the steering mechanism.

Considering equation (2), system (1) can be written in the following form:

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

The developed software makes it possible to continuously conduct all three stages of research:

- data entry;
- simulation modeling;
- processing of results.

The purpose of the experiments is to confirm the adequacy of the mathematical model of the tractor movement in the longitudinal plane, as well as to substantiate the high-speed mode of operation during technological agricultural operations.

Research on a computer simulator consists of several stages:

- determination of the type of steering control, its parameters and parameters of the driving mode of the tractor model;
- conducting an experimental drive in the conditions of interactive information exchange between the computer and the operator, while the dynamics of changes in control influences and control quality indicators are recorded;
- processing the results of the interactive experiment using mathematical methods – dispersion and spectral analysis and obtaining quantitative indicators of controllability – quality factor.

The developed software (Fig. 5–6) makes it possible to continuously conduct all three stages of research.

The program starts with debugging the simulator (Fig. 5):

- the type of steering model is determined;
- machine parameters and driving modes;

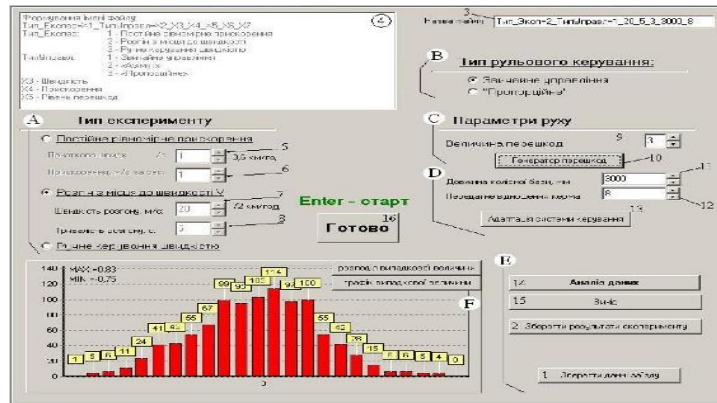


Fig. 5. The initial dialogue window of the simulator

- the relationship between the real and virtual steering wheel is established by determining the sensitivity of the mouse;
- the presence of disturbing influences is established;
- formation and fixation of experimental data files.

Setting initial data. The sequence of setting the initial data is not particularly important, but it is necessary to focus on the meaning of each element in more detail.

As you can see from the initial dialog window of the program (Fig. 5), to start the simulator, you need to select the following characteristics of the experiment:

Type of experiment (A). The choice of “*Constant uniform acceleration*” is allowed, according to which the speed begins to increase continuously until the machine-tractor unit leaves the road. After that, the experiment is stopped. The input data are initial speed 1 (m/s) and acceleration 6 (m/s²), that is, the model starts moving from the set speed with the specified acceleration.

The experiment “*Acceleration from a standstill to a specified speed*”, which refers to input data 7, is used when it is necessary to determine the controllability of the tractor with different types of steering and with different driving parameters. For the purpose of gradual acceleration, the input parameter “acceleration duration” 8 is adopted.

The type of experiment “*Manual speed control*” is necessary for the initial familiarization of the user with the capabilities of the program with different types of steering and driving parameters.

Steering type (B). The appropriate type of steering is installed.

Motion parameters (D). “*Interference magnitude*” 9 has a point form and, according to its value, after pressing the “Interference generator” button 10, an array of random disturbances will be obtained, which can be seen graphically and their maximum and minimum values in the field F can be estimated. This parameter is necessary to determine the stability of the control in case of obstacles of different levels.

Entering input data (C). “*Wheelbase length*” 11 does not need a full explanation – the value is self-explanatory.

“*Gear ratio of the steering mechanism*” 12 – how much you need to turn the steering wheel so that the angle of rotation of the wheels is 1°.

After setting the desired parameters, we proceed to the experiment.

Control quality is assessed by the ability of the machine-tractor unit model to keep along the baseline 25.

The dialog box presents auxiliary information: the current speed 21, the angle of rotation of the wheels 22, the name of the file 3, the number of experimental points 23 and a list of options for early exit from the program 24.



Fig. 6. Execution of the experiment

After the end of the active phase of the experiment, which can happen in two cases (the user himself stopped working or the tractor model exceeded the specified limits), the user returns to the main dialog box (Fig. 7), where he is asked to save the experimental data (E).

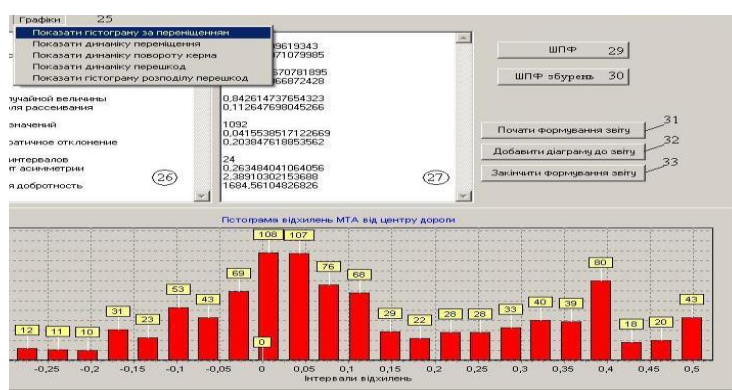


Fig. 7. “Save check-in results” dialog box for creating an experiment report and analyzing experimental data using the functions available in the program

When you click on the button «Save check-in results» 1, the data is saved to a text file with the extension *. txt.

When clicking on the “Data analysis” button 14, the user goes to the corresponding dialog box (Fig. 7).

When calculating the main parameters of the angular movement of the steering wheel and the speed of movement of the MTZ-80 tractor, which works in a unit with a cultivator, the recommendations outlined in [2, 3, 18] were used.

The following tractor traffic conditions were chosen for the experiment:

- tractor speed, m/s – from 1 to 4 (3.6–14.4 km/h);
- the gear ratio of the steering mechanism is 2–8;
- the number of repetitions of each race is 3.

The results of each race are recorded by a computer and displayed in the following form:

Type of experiment: Acceleration to speed

Steering type: Constant uniform acceleration

PARAMETERS OF MOTION

The amount of obstacles: 2

Wheelbase length: 3500

Steering gear ratio: 12

Number of experimental points: 1083

Algebraic sum of experimental data values: 0.337420240023911

Mathematical expectation (arithmetic mean): 0.0003112732841549

Minimum data value: -0.00255117600777763

Maximum data value: 0.00284996145173058

Range of change of experimental data: 0.00540113745950821

Center of Scatter Field: 0.000149392721976472

Variance: 1.85741986833043E-6

Mean square deviation: 0.0186287191926844

Number of intervals: 24

Asymmetry coefficient: -0.273005879932086

Excess: 2.32932922884906

given Q factor: 53.8381233586602

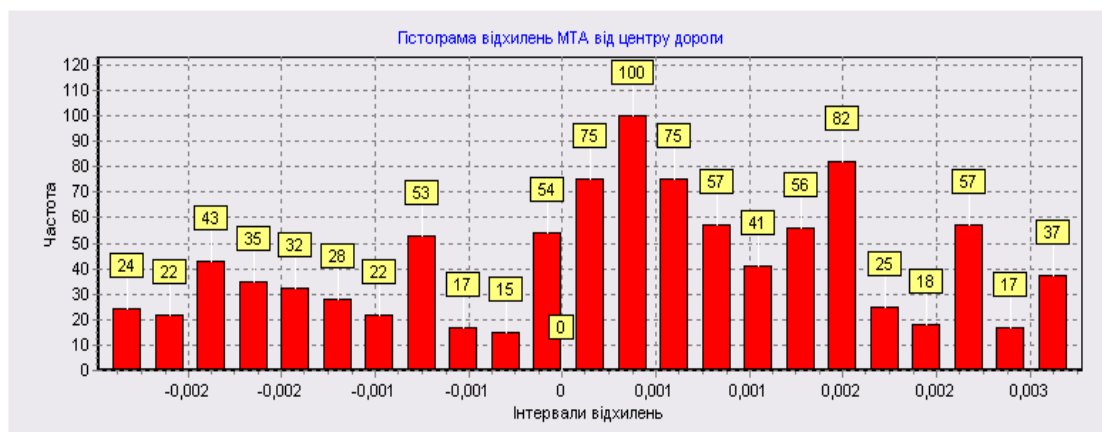


Fig. 8. Histogram of the initial response of deviations from the middle of the road

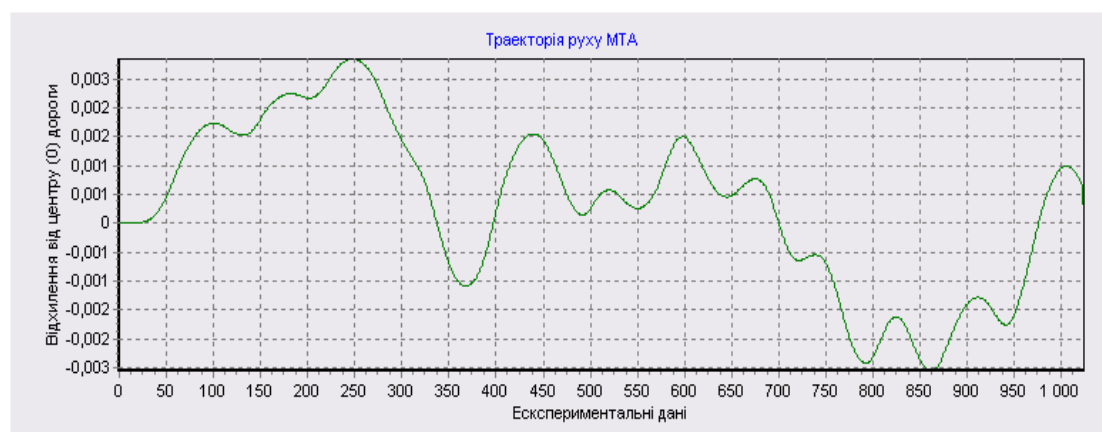


Fig. 9. Tractor movement trajectory

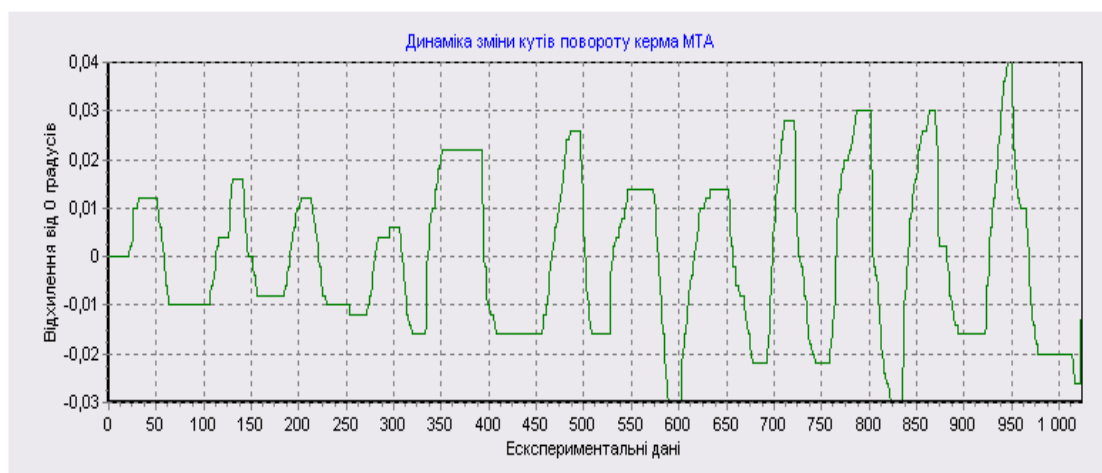


Fig. 10. Dynamics of tractor steering wheel rotation

Table 1

Comparative analysis of studies

Tractor movement speed m/s, (km/h)	Mean square deviation							
	Tractor with standard steering				Tractor with experimental steering			
	1	2	3	Average	1	2	3	Average
1 (3.6)	0.019	0.014	0.017	0.016	0.0125	0.012	0.01	0.011
2 (7.2)	0.039	0.033	0.035	0.036	0.019	0.017	0.018	0.018
3 (10.8)	0.081	0.071	0.068	0.073	0.025	0.023	0.025	0.024
4 (14.4)	0.093	0.111	0.105	0.103	0.026	0.026	0.026	0.026

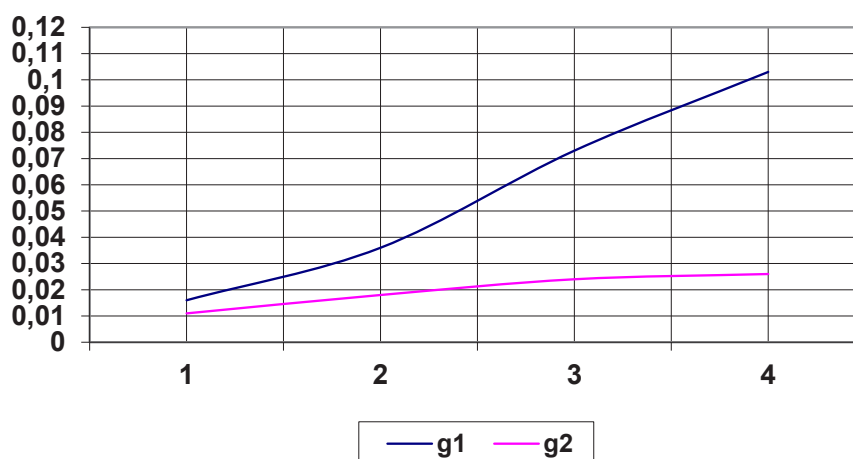


Fig. 11. Dependence of the mean square deviation on the tractor movement speed:
 σ_1, σ_2 – respectively, the mean square deviation of tractor from the baseline
when using standard and experimental steering

Conclusions. 1. The maneuverability of the test sample is significantly improved, because at the speed of the tractor $V = 1$ m/s (3.6 km/h), the gear ratio of the traditional steering $W_{tr} = 12$, and the gear ratio of the experimental steering $W_{ex} = 2$.

2. It was found that at low speeds of tractor movement ($V = 1-1.5$ m/s) the error is difficult to track, because it is approximately the same for both types of steering, but as the speed increases, it increases significantly for standard steering $\sigma_1 = 0.103$ cm and insignificantly for experimental $\sigma_2 = 0.026$ cm.

3. The use of steering with adaptive properties has a significant advantage over standard steering, especially at high speeds, it has a margin of stability of the controlled movement and provides ease of maneuvering, which significantly increases the productivity of the tractor.

Bibliography

1. Петров В. О. Постійна чутливість рульового керування мобільних машин у транспортному режимі. *Праці Таврійської державної агротехнічної академії* / відп. за вип. В. Т. Надикто. Мелітополь, 2006. Вип. 43. С. 98–102.
2. Петров В. О. Постійна чутливість рульового керування мобільних машин у транспортному режимі. *Праці Таврійської державної агротехнічної академії* / відп. за вип. В. Т. Надикто. Мелітополь, 2006. Вип. 43. С. 98.
3. Петров В. О. Синтез ергономічних рульових управлінь для мобільних машин. *Праці Таврійської державної агротехнічної академії* / відп. за вип. В. Т. Надикто. Мелітополь, 2000. Вип. 1, т. 17. С. 60–64.
4. Лубяний М. М. Аналіз функціонування системи «водій – рульове керування» МТА. *Праці Таврійської державної агротехнічної академії* / відп. за вип. В. Т. Надикто. Мелітополь, 2000. Вип. 1, т. 17. С. 21–27.
5. Петров В. О. Рульове управління колісного шасі яке реалізує керування напрямком руху по положенню. *Праці Таврійської державної агротехнічної академії* / відп. за вип. В. Т. Надикто. Мелітополь, 2001. Вип. 1, т. 24. С. 83–86.
6. Galina Gritsaenko, Igor Gritsaenko. Mechanism for the Maintenance of Investment in Agriculture / Modern Development Paths of Agricultural Production. *Springer Nature Switzerland AG.*, 2019. P. 29–40.
7. Kyrylo Samoichuk, Olga Viunyk, Dmytro Milko. Research on milk homogenization in the stream homogenizer with separate cream feeding. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*, 2020. Vol. 14. P. 142–148.
8. Kyrylo Samoichuk, Yulia Postol. Revealing new patterns in resourcesaving processing of chromium-containing ore raw materials by solidphase reduction. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020. Vol. 1/12 (103). P. 24–29.
9. Oleksandr Sclyar., Radmila Sclyar., Ganna Pedchenko. Results of the nutritional preservation research of the alfalfa laying on storage with two-phase compaction. *INMATEH – Agricultural Engineering*. National Institute of Research-Development for Machines and Installations Designed to Agriculture and Food Industry. INMA Bucharest, Vol. 60, no. 1 / 2020. P. 269–274.
10. Kyrylo Samoichuk, Nadiya Palyanichka, Vadim Oleksienko, Serhii Petrychenko. Improving the quality of milk dispersion in a counter-jet homogenizer. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*, 2020. Vol. 14. P. 633–640.
11. Дашивець Г. І. Обґрунтування швидкісних параметрів роботи машино-тракторного агрегату. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету* : електронне наукове фахове видання / ТДАТУ. Мелітополь : ТДАТУ, 2021. Вип. 11, том 2. С. 85–97. 13 с. DOI: 10.31388/2220-8674-2021-2-16.
12. Dmytro Zhuravel. Research of lubricant properties of used tractor motor oils. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету* : електронне наукове фахове видання / ТДАТУ. Мелітополь : ТДАТУ, 2021. Вип. 11, том 2. 18 с. DOI: 10.31388/2220-8674-2021-2-5.
13. Kuznetsov, M., Lysenko, O. Ensuring power balance in a hybrid power system with a backup generator. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021. Vol. 6 (8 (114)). P. 6–15. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.245557>.
14. Дашивець Г. І. Методика обробки емпіричних даних якісних показників роботи колісної машини. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету* : електронне наукове фахове видання / ТДАТУ; гол. ред. д-р техн. наук, проф. В. М. Кюрчев. Мелітополь : ТДАТУ, 2022. Вип. 12, том 2. 13 с. DOI: 10.31388/2220-8674-2022-2-2.
15. Samoichuk K., Hutsol T., Kuboń M., Niemiec M., Mykhailova L., Gródek-Szostak Z., Sorokin D. Modeling of Diesel Engine Fuel Systems Reliability When Operating on Biofuels. *Energies*, 2022. Vol. 15. P. 1795. <https://doi.org/10.3390/en15051795>.
16. Kaþlan M., Klimek K., Maj G., Lemeshchenko-Lagoda V., Boltianskyi B., Boltianska L., Syrotyuk H., Syrotyuk S., et al. Method of Evaluation of MaterialsWear of Cylinder-Piston Group of Diesel Engines in the Biodiesel Fuel Environment. *Energies*, 2022. Vol. 15. P. 3416. <https://doi.org/10.3390/en15093416>.



17. Дашивець Г. І. Дослідження адаптивної роботи рульового керування транспортного засобу в швидкісному режимі. *Сучасні наукові дослідження на шляху до євроінтеграції* : матеріали міжнар. наук.-практ. форуму (21–22 червня 2019 р.): у 2 ч. / ТДАТУ. Мелітополь, 2019. Ч. 1. С. 203–204.
18. Бондар А. М. Фактори поліпшення керованості МТА. *Вісник Дніпропетровського державного аграрного університету*. Дніпропетровськ, 2009. № 2-09. С. 150–160.
19. Бондар А. М. Надійність людини-оператора в складній технічній системі. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь, 2009. Вип. 9, т. 5. С. 13–18.
20. Бондар А. М. Вдосконалення рулевих механізмів із перемінним передаточним відношенням. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь, 2010. Вип. 10, т. 2. С. 13–18.
21. Сухенко Ю. Г. та ін. Надійність обладнання харчової галузі : навчальний посібник. Київ : ЦП «Компринт», 2019. 372 с.
22. Дідур В. А. та ін. Гідравліка : підручник. Херсон : ОЛДІ-ПЛЮС, 2015. 624 с.
23. Дідур В. А. та ін. Технічна механіка рідини і газу : підручник для здобувачів ступеня вищої освіти закладів вищої освіти. Мелітополь : ТОВ «Колор Принт», 2019. 468 с.
24. Гідравліка, гідро- та пневмоприводи : підручник для здобувачів вищої освіти / Д. П. Журавель, І. П. Паламарчук, С. М. Уманський, В. І. Паламарчук; за ред. Д. П. Журавля. Київ : ЦП «Компринт», 2021. 448 с., іл.
25. Паніна В. В. та ін. Взаємозамінність, стандартизація та технічні вимірювання : навчально-методичний посібник до лабораторного практикуму для самостійної роботи. Мелітополь : Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2019. 84 с.
26. Журавель Д. П., Бондар А. М. Моделювання керованості колісних тракторів шляхом використання адаптивного рульового керування. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету* : наукове фахове видання / ТДАТУ; гол. ред. д-р техн. наук, проф. В. М. Кюрчев. Запоріжжя : ТДАТУ, 2024. Вип. 24, т. 3. С. 18–38. DOI: 10.32782/2078-0877-2024-24-3-2.
27. Журавель Д. П., Бондар А. М. Техніко-економічне обґрунтування доцільності використання адаптивного рульового керування колісного трактора. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету* : наукове фахове видання / ТДАТУ; гол. ред. д-р техн. наук, проф. В. М. Кюрчев. Запоріжжя : ТДАТУ, 2024. Вип. 24, т. 2. С. 7–17. DOI: 10.32782/2078-0877-2024-24-2-1.
28. Igor Palamarchuk, Fu Yuanxia, Ievgenii Petrychenko, Roksolana Blishch, Anatoliy Holovatyuk, Olexander Domin, Tatiana Kostiuk. Spectroscopic assessment and quantitative analysis of the trace element composition of vegetable additives to meat products. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. 2024. Vol. 18. P. 480–496. DOI: <https://doi.org/10.5219/1965>.
29. Журавель Д. П., Бондар А. М. Підвищення керованості колісних тракторів шляхом використання адаптивного рульового керування : монографія. Запоріжжя : ТДАТУ, 2024. 154 с., іл.
30. Poliakov A., Volokh V., Andreev A., Rebenko V., Kurllov V., Yamshinskij M., Lukianenko I., Ivanchenko D., Zhuravel D., & Kovalenko I. Identifying patterns in the structural-phase transformations when processing oxide doped waste with the use of carbon reducer. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 5. No. 12 (131). P. 25–30. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.313449>.
31. Алдошин А. С. Ремонт блоків циліндрів з тріщинами верхніх перемичок. *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі* : матеріали III Міжнар. наук.-практ. інтернет-конференц. Мелітополь, 2021. С. 480–482.
32. Алдошин А. С. Дослідження руйнувань в корінних опорах двигунів. *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі* : матеріали III Міжнар. наук.-практ. інтернет-конференц. Мелітополь, 2021. С. 491–493.
33. Алдошин А. С. Ремонт чавунних блоків з тріщинами водяних сорочок. *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі* : матеріали III Міжнар. наук.-практ. інтернет-конференц. Мелітополь, 2021. С. 514–516.

Стаття надійшла до редакції 03.03.2025 р.



Д. Журавель, А. Бондар
Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного

УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ КОЛІСНИХ ТРАКТОРІВ

Анотація

У статті наведено значення адаптивного рульового керування для керованості колісних тракторів, зокрема враховуючи важливі фактори, як-от швидкість руху, передаточне відношення рульового механізму, зовнішні збурюючі фактори та інші. Розроблена математична модель дає можливість ефективно контролювати процес відслідковування траєкторії машинно-тракторного агрегату, забезпечуючи відповідність агротехнічним вимогам. За міжрядного обробітку кукурудзи відхилення від прямолінійності може становити 10 см із досягненням максимальної швидкості 4 м/с, що показує важливість адаптивного керування для досягнення необхідної точності та якості обробки. Розроблене програмне забезпечення дає змогу отримувати показники керованості в інтерактивному режимі, змінювати параметри віртуальних заїздів та знаходити оптимальні варіанти. Також були вибрані відповідні технічні засоби для проведення випробувань. Зроблені висновки та доведена перспективність використання адаптивного рульового керування. Сільськогосподарські енергетичні засоби працюють у різних навантажувальних і швидкісних режимах із підвищеною небезпекою руху й обов'язковим дотриманням норм агротехнічних, ергономічних та енергетичних показників (вузький коридор, міжряддя, скупчення людей і тварин, погані дороги та бездоріжжя), тому до основних параметрів їх систем керування поворотом висуваються жорсткі вимоги. Маневреність опитного зразку значно поліпшується, тому що за швидкості трактора $V = 1$ м/с (3,6 км/год) передаточне співвідношення традиційного рульового керування $W_{\text{тр}} = 12$, а передаточне співвідношення експериментального рульового керування $W_{\text{екс}} = 2$. Вдалося дослідити, що добротність експериментального рульового керування за невеликих швидкостей руху ($V = 1\text{--}3$ м/с) спочатку підвищується, а з досягненням технологічної швидкості $V = 4$ м/с стає постійною. За використання традиційного рульового керування з підвищенням швидкості добротність значно погіршується і перебуває у зворотно-пропорційному зв'язку зі швидкістю руху трактора. Добротність експериментального зразку рульового керування перевищує добротність традиційного на технологічній швидкості $V = 4$ м/с приблизно у 5 разів і становить $D_{\text{екс}} = 154 \text{ с}^{-1}$, $D_{\text{тр}} = 39 \text{ с}^{-1}$. Встановлено, що за малих швидкостей руху трактора ($V = 1\text{--}1,5$ м/с) похибку складно відстежити, тому що вона для обох типів рульового керування приблизно однакова, але зі збільшенням швидкості руху вона значно зростає для стандартного рульового керування $\sigma_1 = 0,103$ см і незначно для експериментального $\sigma_2 = 0,026$ см. Використання рульового керування з адаптивними властивостями має значну перевагу над стандартним рульовим керуванням, особливо на підвищених швидкостях руху, має запас стійкості керованого руху та забезпечує зручність маневрування, що значно підвищує продуктивність роботи трактора. Таким чином, пропонується впровадити кермовий привод, який зможе забезпечити високу керованість транспортних засобів на всіх швидкісних режимах.

Ключові слова: рульове керування, передаточне співвідношення, маневреність, базова лінія, швидкість переміщення, траєкторія руху, відхилення.