

***I. В. КОЛЕСНИК, Ю. І. КОЛЕСНИК, А. І. МОТУЗЮК***

## **ТРИВАЛІСТЬ МАНЕВРУ ПОВОРОТУ КОЛІСНОГО ТРАКТОРА В НЕУСТАЛЕНОМУ РЕЖИМІ ПРИ СУМІЩЕННІ РОЗГОНУ І ГАЛЬМУВАННЯ**

У статті розглянуто процес виконання маневру повороту колісного трактора в неусталеному режимі руху за умов суміщення розгону та гальмування. Показано, що під час роботи трактора з навісним, напівнавісним або причіпним обладнанням значна частина робочого циклу припадає саме на такі маневри, особливо при виконанні навантажувально-транспортних і технологічних операцій в обмеженому просторі. Встановлено, що тривалість і радіус повороту істотно впливають на довжину траєкторії руху, динамічні навантаження на елементи ходової частини та загальну тривалість робочого циклу трактора.

Запропоновано поетапну структуру повороту, який починається і завершується за нульової швидкості та нейтрального положення керованих коліс. Розглянуто основні фази маневру: поворот із одночасним розгоном і збільшенням кута повороту керованих коліс, усталений поворот з мінімальним радіусом та поворот із гальмуванням і зменшенням кута керування. Для теоретичного аналізу прийнято припущення про рівноприскорений розгін і гальмування трактора та сталу кутову швидкість повороту керованих коліс.

Отримано аналітичні залежності для визначення тривалості неусталеного повороту, кутової швидкості та середнього радіуса повороту для тракторів з одним керованим мостом і з шарнірно-зчленованою рамою. Запропоновано також наближену емпіричну формулу, яка може використовуватися на ранніх етапах проектування або при інженерних розрахунках продуктивності. Результати розрахунків порівняно з експериментальними даними, що підтвердило їх достатню збіжність. Отримані залежності дозволяють уточнити методику визначення тривалості робочого циклу та можуть бути використані для підвищення ефективності експлуатації колісних тракторів.

**Ключові слова:** колісний трактор, неусталений поворот, маневрування, розгін, гальмування, тривалість повороту, радіус повороту, робочий цикл, продуктивність

***I. KOLESNIK, Yu. KOLESNIK, A. MOTUZIUK***

## **DURATION OF THE TURNING MANEUVER OF A WHEELED TRACTOR IN AN UNSTABLE MODE WHEN COMBINING ACCELERATION AND BRAKING**

The article discusses the process of performing a turning maneuver of a wheeled tractor in an unstable mode of movement under conditions of combined acceleration and braking. It is shown that when a tractor is working with mounted, semi-mounted, or trailed equipment, a significant part of the working cycle is devoted to such maneuvers, especially when performing loading, transport, and technological operations in a confined space. It has been established that the duration and radius of the turn significantly affect the length of the trajectory, the dynamic loads on the running gear components, and the total duration of the tractor's working cycle.

A step-by-step structure of the turn is proposed, which begins and ends at zero speed and with the steered wheels in a neutral position. The main phases of the maneuver are considered: turning with simultaneous acceleration and increase in the turning angle of the steered wheels, steady turning with a minimum radius, and turning with braking and a decrease in the steering angle. For theoretical analysis, the assumptions of uniformly accelerated acceleration and braking of the tractor and a constant angular speed of the steering wheels are made.

Analytical dependencies were obtained to determine the duration of an unstable turn, the angular velocity, and the average turning radius for tractors with a single steerable axle and an articulated frame. An approximate empirical formula is also proposed, which can be used in the early stages of design or in engineering calculations of performance. The results of the calculations were compared with experimental data, which confirmed their sufficient convergence. The obtained dependencies allow refining the methodology for determining the duration of the working cycle and can be used to improve the efficiency of wheeled tractors.

**Key words:** wheeled tractor, unstable turn, maneuvering, acceleration, braking, turn duration, turning radius, working cycle, productivity

**Вступ.** Під час роботи звичайного колісного трактора в агрегаті з навісним, напівнавісним або причіпним обладнанням (зокрема навантажувальним, лісозаготівельним чи транспортно-технологічним) істотна частина робочого циклу припадає на виконання поворотів, що відбуваються в неусталеному режимі руху. Такі повороти, як правило, супроводжуються

розгоном трактора на початковій ділянці маневру та гальмуванням у його завершальній фазі, що зумовлює складний характер зміни кінематичних і динамічних параметрів руху.

Найбільш характерно це проявляється під час виконання навантажувально-транспортних операцій, наприклад при завантаженні насипних матеріалів або переміщенні вантажів у межах обмеженого робочого простору. За відносно короткий робочий цикл тривалістю 25–50 с трактор може здійснювати від двох до чотирьох поворотів і неодноразово змінювати напрямок руху під час під'їзду та від'їзду від місця забору або розвантаження матеріалу. При цьому прямолінійні ділянки руху зводяться до мінімуму, а основна частина часу витрачається саме на маневрування.

У таких умовах середній радіус повороту та його тривалість істотно впливають на довжину траєкторії руху трактора, динамічні навантаження на ходову частину і агрегатоване обладнання, а також на загальну тривалість робочого циклу. Тому дослідження тривалості неусталеного повороту колісного трактора, суміщеного з процесами розгону і гальмування, є важливим для підвищення продуктивності, енергоефективності та зниження експлуатаційних навантажень під час виконання технологічних операцій.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблеми керованості, маневреності та поворотних режимів руху колісних тракторів тривалий час залишаються предметом досліджень як українських, так і закордонних науковців. У фундаментальних працях вітчизняних авторів [1–3] розглянуто загальні питання динаміки руху колісних машин, вплив конструктивних параметрів на стійкість і керованість, а також взаємодію ходової системи з опорною поверхнею. Ці дослідження заклали теоретичну основу для аналізу поворотів у різних режимах руху, однак переважно орієнтовані на усталені режими.

У роботах [4–6] значну увагу приділено дослідженню керованості та маневреності машинно-тракторних агрегатів під час виконання технологічних операцій. Автори зазначають, що повороти займають істотну частку робочого циклу, особливо в умовах обмеженого простору, проте тривалість повороту за умов суміщення розгону і гальмування не розглядається детально.

Питання експериментального дослідження режимів повороту та визначення відповідних показників розглянуто у працях [7, 8], де запропоновано методики оцінювання маневреності та траєкторій руху тракторів. Водночас ці методики здебільшого не враховують змінний характер швидкості руху під час повороту.

Закордонні дослідження зосереджені переважно на автоматизації керування та плануванні траєкторій руху сільськогосподарських машин [9–14]. У роботах [10–12] запропоновано алгоритми оптимізації поворотів на кінцях гону та в зоні розвороту, що дозволяє зменшити шлях і час маневрування. Проте більшість моделей базується на припущенні про сталу швидкість або квазіусталений режим руху.

У дослідженнях [15–18] аналізуються перехідні режими руху мобільних машин, зокрема зміна швидкості та кутових параметрів, однак без прямого визначення тривалості повороту як складової робочого циклу. Роботи [19, 20] підтверджують необхідність урахування неусталених режимів для підвищення точності розрахунків продуктивності та енергоефективності.

Таким чином, аналіз публікацій показує, що питання визначення тривалості повороту колісного трактора в неусталеному режимі при суміщенні розгону і гальмування залишається недостатньо вивченим і потребує подальшого теоретичного та експериментального дослідження.

**Мета та постановка задачі дослідження.** Метою даного дослідження є теоретичне та експериментальне обґрунтування закономірностей неусталеного повороту колісного трактора, що здійснюється з нульової швидкості та нейтрального положення керованих коліс і поєднується у часі з процесами розгону та гальмування, а також розроблення аналітичних і наближених залежностей для визначення тривалості та середнього радіуса такого маневру.

Для досягнення поставленої мети у роботі необхідно проаналізувати умови виконання поворотних маневрів колісного трактора в неусталеному режимі руху при суміщенні розгону і гальмування, обґрунтувати структуру такого повороту та виділити його основні етапи, розробити математичну модель неусталеного повороту з урахуванням зміни швидкості та кута повороту керованих коліс або частин шарнірно-зчленованої рами, отримати аналітичні залежності для визначення тривалості та середнього радіуса повороту для тракторів різних конструктивних схем, запропонувати наближені емпіричні формули для інженерних розрахунків і виконати порівняльний аналіз розрахункових та експериментальних даних з метою оцінювання точності й практичної придатності запропонованих залежностей.

**Основний матеріал та результати дослідження.** Головною відмітною особливістю розглянутих поворотів є нульова швидкість і розташування керованих коліс уздовж осі трактора на початку і в кінці маневру. Такий поворот включає в себе наступні основні етапи:

- поворот одночасно з розгоном трактора і збільшенням кута повороту керованих коліс;
- стабільний поворот (постійна швидкість, постійний максимальний кут повороту керованих коліс, мінімальний радіус повороту);
- поворот одночасно з гальмуванням трактора і зменшенням кута повороту керованих коліс.

Крім того, залежно від співвідношення тривалості розгону трактора до встановленої швидкості і тривалості повороту його керованих коліс на максимальний кут можуть бути додаткові елементи повороту:

- з встановленою швидкістю трактора при змінюваному куті повороту керованих коліс (збільшенні і зменшенні його);
- з максимальним кутом повороту керованих коліс при зміні швидкості трактора (розгоні або гальмуванні).

При теоретичному дослідженні такого повороту прийняті наступні припущення:

- тривалість повороту при розгоні і гальмуванні однакова, а радіуси повороту при розгоні і гальмуванні змінюються в функції часу як спадний і зростаючий гілки симетричної кривої;
- розгін (гальмування) трактора рівноприскорений (рівнозаповільнений);
- поворот керованих коліс здійснюється з постійною кутовою швидкістю.

Тривалість повороту трактора  $t_{\Pi}$ , що здійснюється одночасно з розгоном і гальмуванням при положенні керованих коліс уздовж осі трактора на початку і в кінці повороту:

$$t_{\Pi} = \frac{\theta - 2\theta_n}{\omega_y} + 2t_n, \quad (1)$$

де  $\theta$  – кут повороту трактора, рад;  $\theta_n$  – кут одного неусталеного повороту трактора (повороту зі змінною кутовою швидкістю), рад;  $t_{\Pi}$  – тривалість неусталеного повороту трактора, с;  $\omega_y$  – кутова швидкість повороту трактора при усталеному повороті (швидкість трактора максимальна, радіус повороту мінімальний), 1/с.

Кут неусталеного повороту трактора:

$$\theta_n = \int_0^{t_n} \omega dt \leq \theta / 2 \quad (2)$$

де  $\omega$  – поточна кутова швидкість повороту трактора, 1/с.

Тривалість неусталеного повороту:

$$\left. \begin{aligned} t_n &= v / a \text{ при } v / a \geq t_y \\ t_n &= t_y \text{ при } v / a < t_y \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

де  $v$  – усталена швидкість трактора при повороті, м/с;  $a$  – середнє прискорення розгону і гальмування трактора, м/с<sup>2</sup>;  $t_y$  – тривалість повороту керованих коліс (або частин рами) трактора з середнього положення в крайнє, с.

Кутова швидкість повороту трактора:

$$\omega = v_t / R \quad (4)$$

де  $v_t$  – поточна швидкість трактора при повороті, м/с;  $R$  – поточний радіус повороту трактора по його осі, м.

Поточна швидкість трактора при розгоні:

$$v_t = a_t \leq v \quad (5)$$

Поточні радіуси повороту по осі ведучого моста трактора з двома керованими колесами  $R'$  або з шарнірно-зчленованою рамою  $R''$ :

$$R' = B \cdot ctg \alpha; \quad (6)$$

$$R'' = B \cdot ctg \alpha / 2. \quad (7)$$

де  $B$  – база трактора, м;  $\alpha$  – поточний усереднений кут повороту двох керованих коліс або двох частин шарнірно з'єднаної рами відносно осі трактора, що визначається за формулою:

$$\alpha = \omega_c t \leq \alpha_m, \quad (8)$$

де  $\omega_c$  – середня кутова швидкість повороту керованих коліс або кутова швидкість повороту однієї частини шарнірно-зчленованої рами, 1/с.

На першому етапі повороту змінюються і швидкість трактора, і кут повороту керованих коліс. На наступних етапах при завершенні розгону (тривалість його  $t_p = v/a$ ) стабілізується швидкість трактора, а при завершенні повороту керованих коліс (тривалість повороту  $t_y = \alpha_m / \omega_c$ , де  $\alpha_m$  – максимальний усереднений кут повороту керованих коліс) стабілізується кут керованих коліс. Залежно від величини  $t_p$  і  $t_y$  змінюються межі інтегрування, тому є три варіанти визначення кута  $\theta_n$ .

Зробивши відповідні підстановки в рівняння (2), отримуємо значення цього кута для тракторів з двома керованими колесами  $\theta'_n$  і шарнірно-зчленованою рамою  $\theta''_n$

При  $t_n = t_p = t_y$ :

$$\theta'_n = \frac{\theta''_n}{2} = \int_0^{t_n} \frac{atdt}{Bctg\omega_c t} \approx \frac{at_n^2}{3B} \left( \alpha_m + \frac{\alpha_m^3}{5} \right) \quad (9)$$

При  $t_n = t_p > t_y$ :

$$\theta'_n = \frac{\theta''_n}{2} = \int_0^{t_y} \frac{atdt}{Bctg\omega_c t} + \int_{t_y}^{t_p} \frac{atdt}{Bctg\alpha_m} = \frac{at_y^2}{3B} \left( \alpha_m + \frac{\alpha_m^3}{5} \right) + \frac{a}{2Bctg\alpha_m} (t_p^2 - t_y^2) \quad (10)$$

При  $t_n = t_y > t_p$ :

$$\theta'_n = \frac{\theta''_n}{2} = \int_0^{t_p} \frac{atdt}{Bctg\omega_c t} = \int_{t_p}^{t_y} \frac{vdt}{Bctg\omega_c t} = \frac{at_p^2}{3B} \left( \omega_c t_p + \frac{\omega_c^3 t_p^3}{5} \right) + \frac{v}{B\omega_c} \ln \frac{\cos \omega_c t_p}{\cos \alpha_m}. \quad (11)$$

Для визначення середнього радіуса повороту трактора використовуємо формулу:

$$R_c = S / \theta \quad (12)$$

де  $S$  – лінійний шлях трактора (по середній лінії) при повороті, що визначається за формулою:

$$S = vt_{\Pi} - v^2 / a, \quad (13)$$

де  $v$  – встановлена швидкість трактора при повороті, м/с.

Підставляючи вирази з формул (1), (3), (10), (11) і (13) у залежність (12), розкриваємо значення  $R_c$  для різної тривалості неусталеного повороту:

а) при  $t_n = t_p > t_y$

- для трактора з одним керованим мостом:

$$R_c = R_m + \frac{at_y^2}{\theta} \left[ 1 - \frac{2R_m (\alpha_m + \alpha_m^3 / 5)}{3B} \right], \quad (14)$$

- для трактора з шарнірно-зчленованою рамою:

$$R_c = R_m + \frac{at_y^2}{\theta} \left[ 1 - \frac{4R_m (\alpha_m + \alpha_m^3 / 5)}{3B} \right], \quad (15)$$

б) при  $t_n = t_y > t_p$

- для трактора з одним керованим мостом:

$$R_c = R_m + \frac{2vt_y}{\theta} - \frac{v^2}{a\theta} - \frac{2R_m}{\theta} \cdot \left[ \frac{v^2}{3Ba} \left( \omega_c \frac{v}{a} + \frac{\omega_c^3 v^3}{5a^3} \right) + \frac{v}{B\omega_c} \ln \frac{\cos \omega_c v / a}{\cos \alpha_m} \right], \quad (16)$$

- для трактора з шарнірно-зчленованою рамою:

$$R_c = R_m + \frac{2vt_y}{\theta} - \frac{v^2}{a\theta} - \frac{4R_m}{\theta} \cdot \left[ \frac{v^2}{3Ba} \left( \omega_c \frac{v}{a} + \frac{\omega_c^3 v^3}{5a^3} \right) + \frac{v}{B\omega_c} \ln \frac{\cos \omega_c v / a}{\cos \alpha_m} \right], \quad (17)$$

де  $R_m$  – мінімальний радіус повороту трактора.

Формули (14)–(17) не завжди можна використовувати, оскільки на початку проектування трактора можуть бути невідомі всі параметри, що входять до цих формул. Тому пропонується наближена емпірична формула для розрахунку середнього радіуса повороту трактора:

$$R_c = R_m + \frac{k_e v_3 t_y}{\theta}, \quad (18)$$

де  $k_e$  – поправочний коефіцієнт (для тракторів з конструктивною масою до 8 т  $k_e = 0,3$ );  $v_3$  – поточна швидкість (м/с) трактора в момент завершення повороту керованих коліс ( $t = t_y$ ), що визначається за формулами:

- при  $v \leq at_y$  :

$$v_3 = v; \quad (19)$$

- при  $v > at_y$  :

$$v_3 = at_y. \quad (20)$$

Підставляючи значення  $R_c$  у формули (12) і (13), знаходимо наближену формулу для визначення тривалості повороту:

$$t_{II} = \frac{\theta R_m}{v} + k_e t_y \frac{v_3}{v} + t_n. \quad (21)$$

Для двох граничних умов ця формула має вигляд:

- при  $t_n = t_y > t_p$  :

$$t_{II} = \frac{\theta R_m}{v} + t_y (k_e + 1), \quad (22)$$

- при  $t_n = t_p > t_y$  :

$$t_{II} = \frac{\theta R_m}{v} + \frac{k_e at_y^2}{v} + \frac{v}{a}. \quad (23)$$

Після проведених розрахунків результати заносимо у таблицю 1. У таблиці наведено значення тривалості повороту трактора з потужністю двигуна близько 60 к.с. на кут  $\pi/2$  при різних швидкостях  $v$ : розрахунковій, обчисленій за точними (1), (3), (4), (10) (11) і наближеними (22), (23) формулами, та експериментальній. При розрахунках прийняті отримані експериментально вихідні дані ( $t_y = 1,1$  с,  $a = 1,3$  м/с<sup>2</sup>,  $R_m = 4,3$  м).

Таблиця 1 – Значення тривалості повороту трактора на кут  $\pi/2$  при різних швидкостях  $v$

Дані	Тривалість повороту (с) при $V$ , м/с							
	0,61	0,72	0,84	0,94	1,58	1,74	2,28	2,69
Експериментальні	2,94	2,54	2,24	2,19	1,61	1,51	1,34	1,36
Розрахункові за точними формулами	2,82	2,55	2,32	2,14	1,58	1,5	1,39	1,37
Розрахункові за наближеною формулою	3,18	2,77	2,43	2,22	1,56	1,47	1,33	1,32

Розрахункові та експериментальні дані збігаються цілком задовільно.

Проведені дослідження нестабільного повороту з одночасним розгоном і гальмуванням дозволяють уточнити формули для визначення тривалості циклу роботи трактора.

**Висновки.** У роботі виконано комплексне теоретичне та експериментальне дослідження маневру повороту колісного трактора в неусталеному режимі руху за умов суміщення розгону і гальмування. Показано, що саме такі режими є характерними для більшості технологічних

операцій, пов'язаних з навантаженням, транспортуванням і маневруванням у стиснених умовах, де прямолінійні ділянки руху мають незначну тривалість.

Встановлено, що поворот, який починається і завершується за нульової швидкості та нейтрального положення керованих коліс, має складну структуру і складається з кількох фаз, співвідношення тривалості яких визначається параметрами розгону трактора та швидкістю повороту керованих коліс. Запропонована математична модель дозволяє враховувати змінний характер кутової швидкості та радіуса повороту, що забезпечує більш точне визначення тривалості маневру порівняно з усталеними схемами розрахунку.

Отримано аналітичні залежності для визначення тривалості повороту та середнього радіуса траєкторії руху для тракторів з одним керованим мостом і з шарнірно-зчленованою рамою. Запропоновано наближені емпіричні формули, які доцільно використовувати на етапах попередніх інженерних розрахунків і оцінювання продуктивності колісних тракторів конструктивною масою до 8 т. Порівняння розрахункових і експериментальних даних показало їх задовільну збіжність, що підтверджує адекватність запропонованих залежностей.

Результати дослідження можуть бути використані для уточнення методик визначення тривалості робочого циклу, підвищення точності розрахунку продуктивності, а також для оптимізації параметрів керування і маневрування колісних тракторів у реальних умовах експлуатації.

#### Список літератури:

1. Кальченко Б. І. Динаміка руху колісних тракторів: монографія / С91 Б. І. Кальченко, О. Ю. Ребров, А. Г. Мамонтов, А. П. Кожушко, М. Є. Якунін. – Харків. Видавець: О. А. Мірошніченко, 2021. – 320 с
2. Кальченко Б. І. Дослідження динамічної стійкості та плавності руху колісних тракторів / Б. І. Кальченко, А. П. Кожушко // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – № 44 (1266). – С. 110-115.
3. Григор'єв О. Л. Динаміка руху мобільних енергетичних засобів. Вісник аграрної науки. 2020. № 6. С. 45–52.
4. Масалабов, В. М. До методики експериментального визначення показника режиму повороту машинно-тракторного агрегату / В.В. М. Масалабов // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. - Кіровоград: КНТУ, 2015. - Вип. 45, ч. 1. - С. 246-252.
5. Кравчук В.І., Луценко М. В. Вплив режимів руху на продуктивність МТА. Техніка і технології АПК. 2018. № 3. С. 21–26.
6. Zhu J., Feng T., Kang S., Chen D., Ni X., Wang L. Design and Simulation of Steering Control Strategy for Four-Wheel Steering Hillside Tractor. Agriculture. 2024; 14(12):2238. DOI: 10.3390/agriculture14122238.
7. Масалабов В.М. Методика експериментального визначення режимів повороту МТА. Сільськогосподарські машини. 2015. № 34. С. 84–90.
8. Коваленко І.С. Експериментальні дослідження траєкторій руху тракторів. Механізація та електрифікація сільського господарства. 2017. № 9. С. 58–63.
9. Noguchi N. Agricultural vehicle automation and control. Computers and Electronics in Agriculture. 2016. Vol. 125. P. 1–12.
10. Wang H., Noguchi N. Adaptive turning control for agricultural tractors. Int. J. of Agricultural and Biological Engineering. 2018. Vol. 11(3). P. 45–53.
11. Boryga M. Trajectory planning for tractor turning. Agricultural Engineering. 2023. Vol. 27(1). P. 15–24.
12. Zhou J. et al. Path planning for headland turning of agricultural vehicles. Computers and Electronics in Agriculture. 2023. Vol. 204.
13. Alonge F. Autonomous tractor steering systems. Biosystems Engineering. 2020. Vol. 195. P. 1–14.
14. Zhang Q. Motion control of autonomous farm vehicles. IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 102345–102356.
15. Wong J. Y. Theory of Ground Vehicles. 4th ed. Hoboken : Wiley, 2008. 560 p.
16. Gillespie T. D. Fundamentals of Vehicle Dynamics. Warrendale : SAE, 1992. 495 p.
17. Sharp R. S., Valtetsiotis V. Vehicle transient handling. Vehicle System Dynamics. 2015. Vol. 53(9). P. 1235–1258.
18. Pacejka H. Tire and Vehicle Dynamics. Oxford : Elsevier, 2012. 672 p.
19. Li B. Analysis of non-steady turning of wheeled vehicles. Mechanism and Machine Theory. 2019. Vol. 134. P. 1–12.
20. Kim Y. Dynamic analysis of tractor maneuvering. Journal of Terramechanics. 2022. Vol. 98. P. 23–31.
21. Колеснік Ю. І. Особливості функціонування тракторних поїздів в перехідних режимах руху / Ю. І. Колеснік // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Автомобіле- та тракторобудування = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Automobile and Tractor Construction : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". – Харків : НТУ "ХПІ", 2025. – № 1. – С. 129-138.

## References (transliterated):

1. Kalchenko B. I. Dynamika rukhu kolisnykh traktoriv: monohrafiia / S91 B. I. Kalchenko, O. Yu. Rebrov, A. H. Mamontov, A. P. Kozhushko, M. Ye. Yakunin. – Kharkiv. Vydavets: O. A. Miroshnychenko, 2021. – 320 s
2. Kalchenko B. I. Doslidzhennia dynamichnoi stiikosti ta plavnosti rukhu kolisnykh traktoriv / B I. Kalchenko, A. P. Kozhushko // Visnyk NTU «KhPI». – Kharkiv: NTU «KhPI», 2017. – № 44 (1266). – S. 110-115.
3. Hryhoriev O. L. Dynamika rukhu mobilnykh enerhetychnykh zasobiv. Visnyk ahrarnoi nauky. 2020. № 6. S. 45–52.
4. Masalabov, V. M. Do metodyky eksperymentalnoho vyznachennia pokaznyka rezhymu povorotu mashynno-traktornoho ahrehatu / V.V. M. Masalabov // Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn: zahalnodерж. mizhvid. nauk.-tekhn. zb. - Kirovohrad: KNTU, 2015. - Vyp. 45, ch. 1. - S. 246-252.
5. Kravchuk V.I., Lutsenko M. V. Vplyv rezhymiv rukhu na produktyvnist MTA. Tekhnika i tekhnolohii APK. 2018. № 3. S. 21–26.
6. Zhu J., Feng T., Kang S., Chen D., Ni X., Wang L. Design and Simulation of Steering Control Strategy for Four-Wheel Steering Hillside Tractor. Agriculture. 2024; 14(12):2238. DOI: 10.3390/agriculture14122238.
7. Masalabov V.M. Metodyka eksperymentalnoho vyznachennia rezhymiv povorotu MTA. Silskohospodarski mashyny. 2015. № 34. S. 84–90.
8. Kovalenko I.S. Eksperymentalni doslidzhennia traektorii rukhu traktoriv. Mekhanizatsiia ta elektryfikatsiia silskoho hospodarstva. 2017. № 9. S. 58–63.
9. Noguchi N. Agricultural vehicle automation and control. Computers and Electronics in Agriculture. 2016. Vol. 125. P. 1–12.
10. Wang H., Noguchi N. Adaptive turning control for agricultural tractors. Int. J. of Agricultural and Biological Engineering. 2018. Vol. 11(3). P. 45–53.
11. Boryga M. Trajectory planning for tractor turning. Agricultural Engineering. 2023. Vol. 27(1). P. 15–24.
12. Zhou J. et al. Path planning for headland turning of agricultural vehicles. Computers and Electronics in Agriculture. 2023. Vol. 204.
13. Alonge F. Autonomous tractor steering systems. Biosystems Engineering. 2020. Vol. 195. P. 1–14.
14. Zhang Q. Motion control of autonomous farm vehicles. IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 102345–102356.
15. Wong J. Y. Theory of Ground Vehicles. 4th ed. Hoboken : Wiley, 2008. 560 p.
16. Gillespie T. D. Fundamentals of Vehicle Dynamics. Warrendale : SAE, 1992. 495 p.
17. Sharp R. S., Valtetsiotis V. Vehicle transient handling. Vehicle System Dynamics. 2015. Vol. 53(9). P. 1235–1258.
18. Pacejka H. Tire and Vehicle Dynamics. Oxford : Elsevier, 2012. 672 p.
19. Li B. Analysis of non-steady turning of wheeled vehicles. Mechanism and Machine Theory. 2019. Vol. 134. P. 1–12.
20. Kim Y. Dynamic analysis of tractor maneuvering. Journal of Terramechanics. 2022. Vol. 98. P. 23–31.
21. Koliesnik Yu. I. Osoblyvosti funktsionuvannia traktornykh poizdiv v perekhidnykh rezhymakh rukhu / Yu. I. Koliesnik // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Serii: Avtomobile- ta traktorobuduvannia = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Automobile and Tractor Construction : zb. nauk. pr. / Nats. tekhn. un-t "Kharkiv. politekhn. in-t". – Kharkiv : NTU "KhPI", 2025. – № 1. – S. 129-138.

*Надійшла (received) 10.12.2025 р.*

*Відомості про авторів / About the Authors*

**Колеснік Іван Васильович (Koliesnik Ivan)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет біоресурсів і природокористування України, доцент кафедри тракторів і автомобілів, м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4192-1773>; e-mail: [ivankolesnik@nubip.edu.ua](mailto:ivankolesnik@nubip.edu.ua)

**Колеснік Юліана Ігорівна (Koliesnik Yuliana)** – доктор філософії (PhD), Національний університет біоресурсів і природокористування України, асистент кафедри тракторів і автомобілів, м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9915-2455>; e-mail: [julianakolesnik@nubip.edu.ua](mailto:julianakolesnik@nubip.edu.ua)

**Мотузюк Арсеній Ігорович (Motuziuk Arsenii)** – Національний університет біоресурсів і природокористування України, здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти, м. Київ, Україна; e-mail: [arseniycivic@gmail.com](mailto:arseniycivic@gmail.com)