

*М. А. ПОДРИГАЛО, В. П. ГАРМАШ, С. А. ГОРЕЛИШЕВ, Д. С. БАУЛІН, Г. Г. ЯРОВОЙ, І. І. СИДОРЕНКО*

## ПОЛІПШЕННЯ МАНЕВРЕНОСТІ КОЛІСНОГО ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ ШЛЯХОМ ВДОСКОНАЛЕННЯ СПОСОБУ УПРАВЛІННЯ ПОВОРОТОМ

Дослідженню і вдосконаленню властивостей маневреності, яка є також комплексною (складною) властивістю, присвячено велику кількість наукових робіт і конструкторських розробок. Своєю часу необхідність зменшення будівельного об'єму потребувала встановлення поворотних коліс на передньому направляючому мосту автомобіля. Однак при цьому виник додатковий опір руху машини, що обумовлено неспівпаданням траєкторій руху передніх зовнішнього і внутрішнього направляючих коліс з їхніми траєкторіями при ідеальному повороті. Розвиток конструкцій електромобілів і гібридних автомобілів дозволяє забезпечити роздільне керування передніми колесами. Проведено аналіз всього різноманіття показників та критеріїв маневреності загалом та її окремих властивостей. На відміну від інших систематизацій цих показників та критеріїв запропоновано розділити ці показники та критерії на три основні групи. Всі показники та критерії, що використовуються для оцінки маневреності автомобілів, використовуються і для оцінки маневреності колісних тракторів, що мають центр мас, зміщений до задньої осі, і, отже, мають низьку керованість. Силкові та енергетичні критерії можуть бути використані при проектуванні автомобілів та тракторів для забезпечення здатності останніх здійснювати маневр. Крім того, у результаті дослідження удосконалений комбінований спосіб керування рухом двовісного поворотного візка колісного транспортного засобу за рахунок того, що його поворот здійснюється двома крутними керуючими моментами. Перший з цих крутних керуючих моментів створюється водієм через рульове керування і силовий гідроциліндр. Другий крутний керуючий момент створюється за рахунок різниці крутних моментів на колесах зовнішнього і внутрішнього бортів двовісного поворотного візка. Виконання цих правил регулювання розподілу тягових зусиль між бортами дозволяє подолати опір повороту двовісного поворотного візка і поліпшити якість керування рухом вказаного візка і колісного транспортного засобу.

**Ключові слова:** маневреність, роздільне керування, колісний транспортний засіб, спосіб керування, двовісний поворотний візок

*M. PODRUGALO, V. GARMASH, S. HORIELYSHEV, D. BAULIN, H. YAROVYI, I. SYDORENKO*

## IMPROVING MANEUVERABILITY OF A WHEELED VEHICLE BY IMPROVING TURN CONTROL METHOD

A large number of scientific works and design developments are devoted to the study and improvement of the properties of maneuverability, which is also a complex (complex) property. At one time, the need to reduce the building volume required the installation of swivel wheels on the front steering axle of the car. However, in this case, additional resistance to the movement of the machine arose, which is due to the discrepancy between the trajectories of the movement of the front outer and inner guide wheels with their trajectories during an ideal turn. The development of the designs of electric vehicles and hybrid vehicles allows for separate control of the front wheels. The analysis of the whole variety of indicators and criteria of maneuverability in general and individual properties was carried out. Unlike other systematization of these indicators and criteria, it is proposed to divide these indicators and criteria into three main groups. All indicators and criteria used to assess the maneuverability of vehicles are also used to assess the maneuverability of wheeled tractors with a center of mass shifted to the rear axle and, therefore, have low controllability. Force and energy criteria can be used in the design of cars and tractors to ensure the ability of the latter to maneuver. In addition, as a result of the study, a combined method for controlling the movement of a two-axle swivel bogie of a wheeled vehicle has been improved due to the fact that its rotation is carried out by two torque control moments. The first of these control torques is generated by the driver through the steering and power cylinder. The second torque control moment is created due to the difference in torques on the wheels of the outer and inner sides of the two-axle swivel bogie. The implementation of these rules for regulating the distribution of traction forces between the sides makes it possible to overcome the resistance to rotation of a two-axle swivel bogie and improve the quality of motion control of the specified bogie and wheeled vehicle.

**Keywords:** maneuverability, separate control, wheeled vehicle, control method, two-axle swivel bogie

**Вступ. Постановка проблеми.** Маневреність є однією з найбільш важливих експлуатаційних властивостей колісних машин, у тому числі і автомобілів. Ця властивість впливає не тільки на безпеку руху, але також і на продуктивність автомобільного транспорту.

Дослідженню і вдосконаленню властивостей маневреності, яка є також комплексною (складною) властивістю, присвячено велику кількість наукових робіт і конструкторських розробок. Проблеми, які встають перед розробниками колісних машин, наступні:

- забезпечення стійкості руху при маневруванні колісних машин;
- забезпечення потрібної керованості та поворотності колісних машин;
- зниження опору руху при маневруванні колісних машин;
- забезпечення зовнішньої та внутрішньої вписуваності.

Своєю часу необхідність зменшення будівельного об'єму потребувала встановлення поворотних коліс на передньому направляючому мосту автомобіля. Однак при цьому виник додатковий опір руху машини, що

обумовлено неспівпаданням траєкторій руху передніх зовнішнього і внутрішнього направляючих коліс з їхніми траєкторіями при ідеальному повороті. Винахід Шарля Жанто і Карла Бенца – рульова трапеція, що має раціональні геометричні параметри для одного значення параметрів колії переднього моста [1].

При зміні колії порушуються раціональні співвідношення між параметрами трапеції, що викликає підвищення опору руху машини при повороті. Це питання актуально для колісних машин, в яких проводиться зміна колії в процесі експлуатації. Але в деяких з цих машин будівельний об'єм достатній для повороту переднього направляючого моста на значні кути.

Розвиток конструкцій електромобілів і гібридних автомобілів дозволяє забезпечити роздільне керування передніми колесами. Це дозволяє полегшити керування автомобілем та зменшити керуюче зусилля за рахунок створення різних крутних моментів на передніх колесах і появи додаткового поворотного

© М. А. Подригало, В. П. Гармаш, С. А. Горелишев,  
Д. С. Баулін, Г. Г. Яровой, І. І. Сидоренко, 2023

моменту. Такий спосіб управління поворотом особливо актуальний для деяких колісних машин подвійного призначення.

Виходячи з цього, науково-практична задача у сфері управління автомобільним транспортом, а саме – поліпшення маневреності електромобілів і гібридних автомобілів, тобто удосконалення способу управління поворотом, яка є актуальною.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Маневреність, як зазначав професор Закін Я.Х. та інші автори [2–5], є складною (комплексною) експлуатаційною властивістю автомобіля, що включає в себе ряд більш простих властивостей – керованість, поворотливість і вписуваність. У свою чергу, зазначені експлуатаційні властивості також складні і складаються з більш простих властивостей. Наприклад, властивість керованості включає легкість управління, стійкість і повертаність. Повертаність характеризує властивість автомобіля здійснювати додатковий рух у площині дороги, обумовлений бічною еластичністю шин. Легкість керування автомобілів у класичній літературі [2–5] розглядають із позицій оцінки зусиль, що прикладаються до кермового колеса. Під час руху на повороті стійкість завжди розглядалася [2] як складова властивість керованості. Однак автори робіт [6–9] показали, що при прямолінійному усталеному русі стійкість автомобіля є більш складною властивістю, яка включає до себе керованість як більш просту властивість. Доведення цього твердження просте – водій використовує кермо для збереження заданого курсового кута. Однак при поганій керованості автомобіля зберегти заданий курсовий кут і, отже, курсову стійкість автомобіля неможливо.

Поворотливість у літературі [2, 10–13], присвяченій маневреності, розглядається як властивість автомобіля здійснювати поворот з мінімальним радіусом кривизни траєкторії. При повороті на місці розглядається статична поворотливість, а під час руху із заданою швидкістю – динамічна поворотливість.

Вписуваність (зовнішня і внутрішня) характеризує здатність автомобіля, а особливо автопоїзда, вписуватися в обмежений простір, що виділяється для його руху.

Комплексна експлуатаційна властивість автомобіля – маневреність, а також його складові властивості характеризуються своїми показниками та критеріями. Їх систематизація та класифікація має важливе значення для визначення шляхів поліпшення маневреності.

Крім того, для поліпшення маневреності постійно модернізуються і способи керування рухом поворотних двовісних візків транспортних засобів.

Наприклад, у [14] запропонований спосіб керування рухом чотиривісного транспортного засобу, що передбачає поворот двох двовісних поворотних візків незалежно одного від одного, що дозволяє здійснювати поворот транспортного засобу з малим радіусом, рух «крабом», «боком» і навколо власної вертикальної осі. Недоліком даного способу є те, що поворот поворотних двовісних візків здійснюється за рахунок зусилля силового гідروциліндру, яке створюється рульовим керуванням колісного

транспортного засобу. Оскільки опір повороту поворотних двовісних візків значно вищий, чим опір повороту направляючих коліс, то треба створювати значно вищі тиски робочої рідини в рульовому керуванні.

Інший спосіб висвітлений у [15], при використанні якого на колесах переднього поворотного мосту створюється різниця крутних моментів (тягових зусиль). Різниця тягових зусиль на колесах однієї осі забезпечує вхід до повороту і вихід з повороту переднього поворотного мосту. Однак даний спосіб неможливий для використання при керуванні рухом двовісного поворотного візка у зв'язку з необхідністю подолання великого опору повороту, який також створює зону нечутливості у стадіях входу до повороту і виходу з повороту.

Таким чином, проведений аналіз джерел показує, що проблема поліпшення маневреності автомобільного транспорту на теперішній час потребує більш детального дослідження.

*Мета дослідження* полягає в розробленні шляхів поліпшення маневреності колісного транспортного засобу шляхом удосконалення способу повороту двовісного поворотного візку. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- розробити нову класифікацію показників та критеріїв оцінки маневреності колісних машин;
- розробити новий спосіб керування рухом двовісного поворотного візку колісного транспортного засобу.

#### **Матеріали та методи дослідження щодо поліпшення маневреності колісних машин.**

**Класифікація показників та критеріїв оцінки маневреності колісних машин.** Для оцінки маневреності у роботі [16] запропоновані показники – сумарний час та середня швидкість здійснення маневру. Ці показники обрані [16] з міркувань, що маневр автомобіля може бути складним, тобто складатися з кількох простіших маневрів, що супроводжуються багаторазовим послідовним впливом на органи управління.

Як критерій оцінки тієї чи іншої властивості маневреності та маневреності в цілому може бути значення показника, що характеризує досягнутий світовий науково-технічний рівень в автомобіле- та тракторобудуванні.

У роботах [2, 10] було проведено аналіз всього різноманіття показників та критеріїв маневреності загалом та її окремих властивостей. На відміну від систематизації цих показників та критеріїв, виконаної у роботах [2, 10], пропонується розділити ці показники та критерії на три основні групи:

- силові;
- кінематичні;
- енергетичні.

Слід зазначити, що всі показники та критерії, що використовуються для оцінки маневреності автомобілів, використовуються і для оцінки маневреності колісних тракторів. Це особливо важливо для транспортних самохідних шасі, що мають центр мас, зміщений до задньої осі, і низьку керованість.

У табл. 1 наведено систематизацію показників та критеріїв маневреності, виконану за пропонуваннями ознаками, а у табл. 2 – пояснення до параметрів, наведених у табл. 1.

Таблиця 1 – Запропонована систематизація показників та критеріїв маневреності

№ з/п	Група показників та критеріїв	Позначення	Формула для розрахунку	Характеризована властивість маневреності
<b>Силові</b>				
1	Бічна сила на передній осі [2]	$R_{\delta_1}$		керованість
2	Повертаючий момент [5]	$M_{\text{пов}}$	$M_{\text{пов}} = \frac{mg\varphi}{\alpha} L \sin \alpha$	легкість управління
3	Дотична реакція на провідних колесах [17]	$R_{\text{квед}}$		легкість управління
4	Бічна сила на задньої осі [2, 5]	$R_{\delta_2}$		стійкість
<b>Кінематичні</b>				
5	Чутливість до виконання маневру [16]	$\mu, \mu_i$	$\mu = \frac{dk}{d\alpha_{pk}}, \mu_i = \frac{dk}{d\alpha}$ $\mu = \frac{dy}{d\alpha_{pk}}, \mu_i = \frac{dy}{d\alpha}$	керованість
6	Критерій керованості Смирнова Г.А. [17]	$y_m$	$y_m = \frac{\mu z}{t_n}$	керованість
7	Кутове прискорення повороту машини [17]	$\frac{d\omega_z}{dt}$		керованість
8	Граничне за умовами зчеплення кутове прискорення [17]	$\left(\frac{d\omega_z}{dt}\right)_{np}$		керованість
9	Гранична швидкість повороту керованих коліс [17]	$\alpha_{max}$		керованість
10	Передатна функція системи [17]	$W(P)$	$W(P) = \frac{\Delta\Psi}{\Delta\alpha_{pk}}$	керованість
11	Критична лінійна швидкість машини по ковзанню передніх коліс [17]	$(V_{X_1})_{kp}$		керованість
12	Різниця кутів уводу передньої та задньої осі [2, 18]	$\delta_1 - \delta_2$	$\frac{R_{\delta_1}}{K_{y_1}} - \frac{R_{\delta_2}}{K_{y_2}}$	ступінь повертаності
13	Критична лінійна швидкість машини під час маневру [11]	– з уводу [11, 18]	$V_{kp} = \sqrt{\frac{L}{m_2^n (K_{\varphi_2} - m_1^n) K_{\varphi}}}$	керованість, стійкість
		– зі заносу [11, 18]	$V_{зан} = \sqrt{R_c \varphi g} \times \sqrt{1 - R_X^2 \left(\frac{L}{qm\varphi g}\right)^2}$	
		– з перекидання [11, 19]	$V_{onp} = \sqrt{\frac{BR_c g}{2h}}$	
14	Кривизна траєкторії [5]	$K$	$K = \frac{tg(\alpha)}{L}$	статична поворотливість
15	Ступінь нестійкості [20]	$\Lambda$	$\Lambda = V - \frac{\varphi g L}{ V } / a + \frac{iz}{a}$	стійкість
16	Мінімальний радіус повороту [20]	$R_{min}$	$R_{min} = \frac{L}{tg(\bar{\alpha}_{nред})} = \frac{L}{\sqrt{(\varphi/f)^2 - 1}}$	статична поворотливість
17	Граничний кут повороту керованих коліс [17]	$\bar{\alpha}_{nред}$	$\bar{\alpha}_{nред} = arctg\left(\sqrt{(\varphi/f)^2 - 1}\right)$	статична поворотливість

№ з/п	Група показників та критеріїв	Позначення	Формула для розрахунку	Характеризована властивість маневреності
18	Лінійна швидкість руху на повороті заданого радіусу $R$ [2, 20, 17]	$V_R$		динамічна поворотність
19	Максимальна кутова швидкість повороту машини [17]	$\omega_{max}$		динамічна поворотність
20	Мінімальна площа опорної поверхні [2]	$F_{min}$		динамічна поворотність
21	Лінійна швидкість поперечного зміщення центру мас [17]	$V_{CV}$		поперечна рухливість
22	Час виконання маневру [16]	$T_M$		маневреність
<b>Енергетичні</b>				
23	Узагальнений критерій Фаробіна [2, 5]	$Y_{B-M}$	$Y_{B-M} = \alpha_1 \frac{V_z}{V_{max}} + \alpha_2 \frac{Q_{np}}{Q_S} + \alpha_3 \frac{\mathcal{E}_{np}}{\mathcal{E}_S}$	керованість
24	Відносне збільшення кінетичної енергії (потужності двигуна) під час виконання маневру [17]	$\delta W$	$\delta W = \left( 0.5 \frac{b^2}{L^2} + \frac{iz^2}{L^2} \right)$	легкість управління

Таблиця 2 – Опис параметрів, що наведені у табл. 1

№ з/п	Позначення параметра	Розмірність	Назва параметра
1	$K$	–	кривизна траєкторії руху автомобіля
2	$\alpha_{pk}$	рад	кут повороту рульового колеса
3	$\alpha$	рад	середній кут повороту напрямних коліс
4	$Y$	м	координата бічного зміщення центру мас машини
5	$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$	рад	$\alpha_1 = 0.6, \alpha_2 = 0.2, \alpha_3 = 0.2$ [2,5] вагові показники у формулі Я.Є.Фаробіна
6	$V_S, Q_S, \mathcal{E}_S$		швидкість машини, витрата палива та енерговитрати (визначаються зусиллям на рульовому колесі його переміщенням) при проходженні спеціальної траси для оцінки керованості
7	$V_{max}, Q_{np}, \mathcal{E}_{np}$		швидкість машини, витрата палива та енерговитрати, що визначаються на горизонтальній, твердій, прямолінійній дорозі
8	$Z$		запас стійкості
9	$t_n$	с	час реакції машини за кутовою швидкістю повороту або кутовим прискоренням на керуючий вплив
10	$\Psi$	рад	курсний кут машини
11	$m_1^n, m_2^n$	кг	маси, приведені до колес передньої та задньої осі відповідно
12	$K_{y1}, K_{y2}$	Н/рад	коефіцієнти опору уводу коліс передньої та задньої осі відповідно
13	$R_c$	м	радіус повороту центру мас машини
14	$a, b$	м	відстань від передньої та задньої осі до проекції центру мас машини на горизонтальну площину
15	$h$	м	висота центру мас машини
16	$m$	кг	маса машини
17	$R_x$	Н	сумарна дотична реакція на колесах машини

Аналіз показників та критеріїв властивостей маневреності, наведених у табл. 1, показує, що найбільш об'єктивними показниками можуть бути наступні:

– кутове прискорення машини у площині дороги

$$\varepsilon_z = \frac{d\omega_z}{dt} \text{ для оцінки керованості;}$$

– кутова швидкість машини у площині дороги  $\omega_z$  для оцінки поворотливості;

– час виконання заданого маневру  $T_M$  для оцінки маневреності.

Силкові та енергетичні критерії можуть бути використані при проектуванні автомобілів та тракторів

для забезпечення здатності останніх здійснювати маневр. Енергетичний підхід до оцінки маневреності використовувався в роботах [21, 22], що дозволило визначити при проектуванні необхідний запас потужності двигуна та забезпечити високу динамічність автомобіля.

Силкові показники та критерії маневреності характеризують здатність автомобіля долати опір повороту. Найбільший опір виникає при вході машини у поворот.

До появи кутових прискорень та швидкості машини у площині дороги механізм управління маневром (поворотом) повинен забезпечити подолання сил та моментів опору.

Можна вважати, що це буде етапом подолання статичної рівноваги, що впливає на розмір зони нечутливості системи керування (рис. 1).

При одночасному (паралельному) керуванні поворотом машини за рахунок створення повертаючого моменту  $M_{пов}$  та повороті напрямних коліс зону нечутливості  $X_{неч}$  можливо прибрати. Загалом залежність  $\ddot{\psi}(X_{кер})$  стає лінійною (див. рис. 1, крива 2).

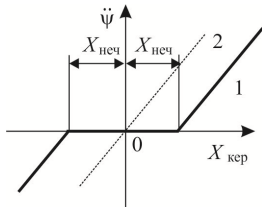


Рисунок.1 – Залежність кутового прискорення машини у площині дороги від керуючого зусилля:

- 1 – за наявності зони нечутливості;
- 2 – за відсутності зони нечутливості

Повертаючий момент [5, 16, 21] може створюватися різницею дотичних реакцій дороги на колесах протилежних бортів автомобілів та тракторів. Різниця дотичних реакцій, у свою чергу, може створюватися за рахунок гальмування коліс внутрішнього борту і за рахунок різниці моментів, що крутять, на колесах зовнішнього і внутрішнього бортів.

На колісних тракторах застосовують спосіб відключення зовнішнього заднього колеса від двигуна при повороті за рахунок установки на ньому обгінної муфти. При установці замість міжколісного диференціала на задній осі трактора диференціального механізму повороту з'являється можливість відключення від двигуна та загальмовування заднього внутрішнього колеса. У цьому випадку реалізується комбінований спосіб керування поворотом [5, 17, 21] та підвищиться керуваність колісного трактора.

**Спосіб керування рухом двовісного поворотного візку колісного транспортного засобу.** Базуючись на вищевикладеному, можливо удосконалити комбінований спосіб керування рухом двовісного поворотного візка колісного транспортного засобу за рахунок того, що поворот двовісного поворотного візка здійснюється двома крутними керуючими моментами. Перший з цих крутних керуючих моментів створюється водієм через рульове керування і силовий гідроциліндр. Другий крутний керуючий момент створюється за рахунок різниці крутних моментів на колесах зовнішнього і внутрішнього бортів двовісного поворотного візка.

Перший крутний момент використовується для створення кутового прискорення двовісного поворотного візка, а другий крутний момент для подолання опору повороту двовісного поворотного візка. Якщо

$$\frac{P_{k12}}{\Phi R_{z12}} < \left(1 + \frac{B^2}{L_T^2}\right)^{-0.5}, \quad (1)$$

де  $P_{k12}$  – сумарне тягове зусилля на колесах

двовісного поворотного візку;

$\Phi$  – коефіцієнт зчеплення;

$R_{z12}$  – сумарне вертикальне навантаження на колеса двовісного поворотного візка;

$B^2/L_T^2$  – відношення квадрату колії до квадрату бази двовісного поворотного візка,

то при вході до повороту необхідно загальмовувати колеса внутрішнього борту.

При

$$\frac{P_{k12}}{\Phi R_{z12}} \geq \left(1 + \frac{B^2}{L_T^2}\right)^{-0.5} \quad (2)$$

на колесах зовнішнього і внутрішнього бортів потрібно створювати різницю тяглових зусиль. Величина тяглових зусиль на колесах зовнішнього борту при цьому повинна бути більшою, ніж тяглові зусилля на колесах внутрішнього борту.

При виконанні умови (1) у випадку виходу з повороту колісного транспортного засобу необхідно загальмовувати колеса зовнішнього борту, а на колесах внутрішнього борту створити тягове зусилля (крутний момент). При виконанні умови (2) на колесах внутрішнього і зовнішнього бортів створюється різниця тяглових зусиль (крутних моментів); причому тяглові зусилля на колесах внутрішнього борту повинні бути більшими за величиною, ніж тяглові зусилля на колесах зовнішнього борту.

На рис. 2 наведено схему сил, що діють на двовісний поворотний візок при вході в поворот та виході з повороту, а на рис. 3 – схему дії керуючих поворотних моментів та моменту опору повороту двовісного поворотного візка.

На рис. 4 наведено графіки залежності доли тягової сили  $\frac{P'_{k1} + P'_{k2}}{P_{k12}}$ , що створюється на колесах внутрішнього борту при вході в поворот та частки тягової сили  $\frac{P''_{k1} + P''_{k2}}{P_{k12}}$ , що створюється на колесах зовнішнього борту при виході з повороту від відношення  $\frac{P_{k12}}{\Phi R_{z12}}$ .

Двовісний поворотний візок керується силовим гідроциліндром від рульового керування колісного транспортного засобу, а також за рахунок створення різниці тяглових зусиль на зовнішньому  $R''_{k1} + R''_{k2}$  і внутрішньому  $R'_{k1} + R'_{k2}$  бортах.

Керуючий крутний момент  $M_{пов1}$  створюється водієм через рульове керування і силовий гідроциліндр, завдяки чому виникає кутове прискорення двовісного візка

$$M_{пов1} = Y_z \cdot \ddot{\alpha}, \quad (3)$$

де  $Y_z$  – момент інерції двовісного поворотного візка відносно осі валу приводу повороту візка;

$\ddot{\alpha}$  – кутове прискорення двовісного поворотного

візку у площині дороги.

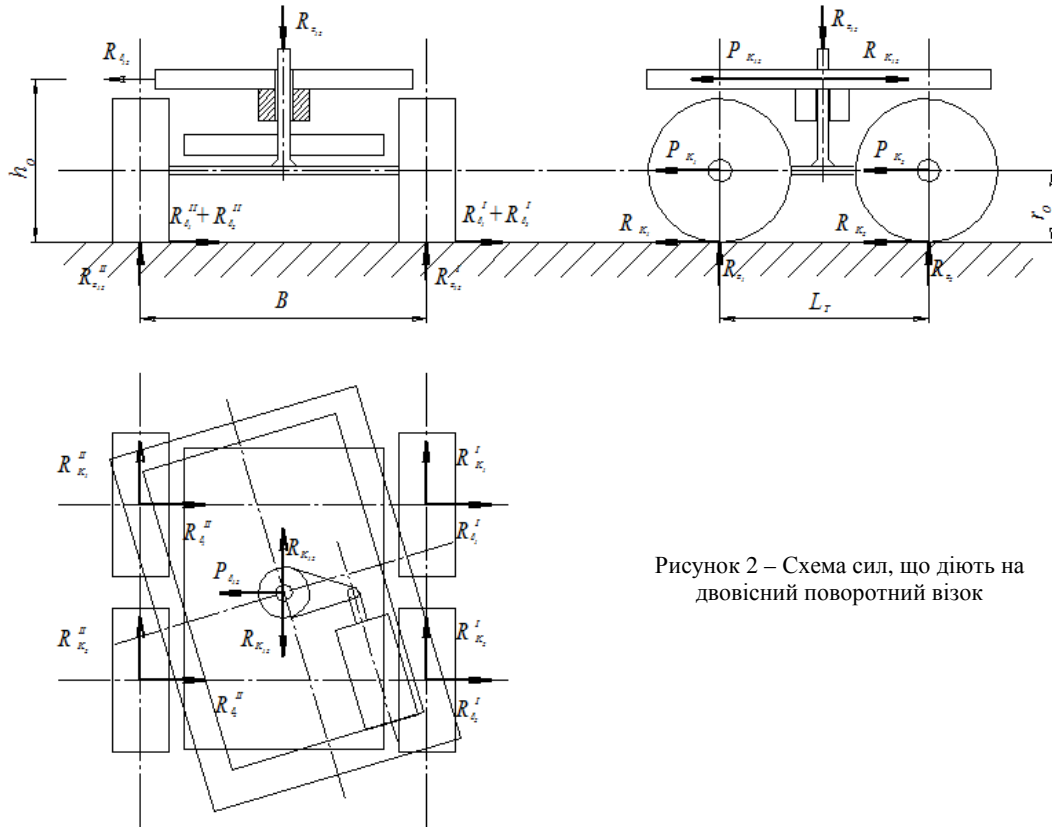


Рисунок 2 – Схема сил, що діють на двовісний поворотний візок

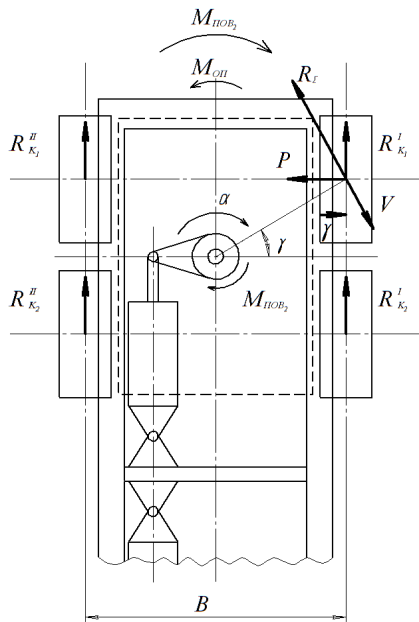


Рисунок 3 – Схема дії керуючих поворотних моментів та моменту опору повороту двовісного поворотного візка

Другий керуючий крутний момент  $M_{пов2}$  створюється різницею тягових зусиль на колесах зовнішнього і внутрішнього бортів двовісного поворотного візка (рис. 3)

$$M_{пов2} = \frac{B}{2} [(R_{k1}'' + R_{k2}'') - (R_{k1}' + R_{k2}')], \quad (4)$$

Другий керуючий крутний момент  $M_{пов2}$  йде на

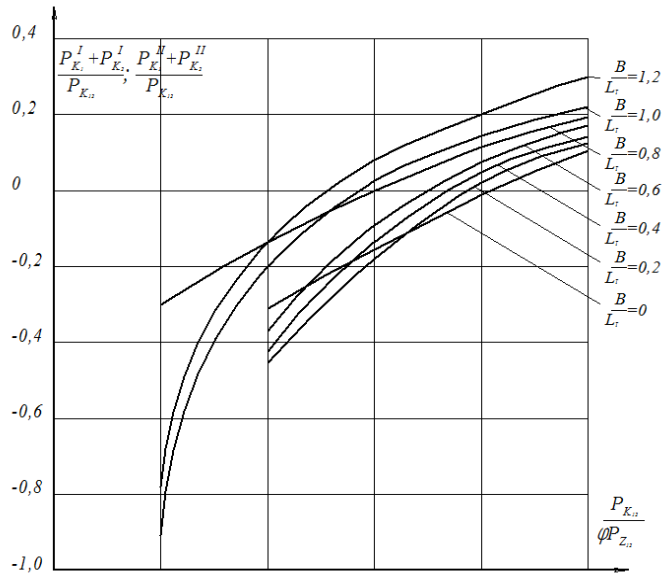


Рисунок 4 – Графіки залежності долі тягової сили, що створюється на колесах внутрішнього та зовнішнього борту від відношення  $\frac{P_{k12}}{\phi P_{z12}}$

подолання моменту опору повороту  $M_{оп}$  двовісного поворотного візка (див. рис. 3), який виникає за рахунок бічного ковзання коліс

$$M_{оп} = 0.5 \phi P_{z12} / \sqrt{\frac{1}{L_T^2} + \frac{1}{B^2}}. \quad (5)$$

З умови подолання моментом  $M_{пов2}$  моменту

$M_{оп}$  опору повороту визначено необхідну частку тяглого зусилля на колесах внутрішнього борту

$$K = \frac{R'_{k_1} + R'_{k_2}}{P_{k_{12}}} = 0.5 \left( 1 \pm \frac{\phi R_{zn}}{R_{k_{12}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + B^2/L_T^2}} \right). \quad (6)$$

Знак « $\rightarrow$ » відповідає входу до повороту, а знак « $\leftarrow$ » – виходу з повороту. З умови отримання

$$\frac{R'_{k_1} + R'_{k_2}}{P_{k_{12}}} > 0, \quad (7)$$

що означає відсутність необхідності гальмування коліс внутрішнього борту при вході у поворот, потрібно, щоб

$$\frac{P_{k_{12}}}{\phi R_{z_{12}}} > \left( \frac{1}{\sqrt{1 + B^2/L_T^2}} \right). \quad (8)$$

Ця умова також визначає відсутність необхідності гальмування коліс зовнішнього борту при виході колісного транспортного засобу із повороту:

$$\frac{P''_{k_1} + P''_{k_2}}{P_{k_{12}}} > 0. \quad (9)$$

При невиконанні умови (8) при вході до повороту необхідно загальмувати колеса внутрішнього борту двовісного поворотного візка, а при виході з повороту – колеса зовнішнього борту.

Виконання отриманих законів регулювання розподілу тягових зусиль між бортами дозволяє подолати опір повороту двовісного поворотного візка і поліпшити якість керування рухом вказаного візка і колісного транспортного засобу.

Таким чином, запропоноване технічне рішення дозволяє удосконалити відомі способи керування поворотом колісних транспортних засобів із двовісними поворотними візками і поліпшити їхнє маневрування.

## Висновки

1. Маневреність є однією з найбільш важливих експлуатаційних властивостей колісних машин. Ця властивість впливає не тільки на безпеку руху, але також і на продуктивність автомобільного транспорту.

Для оцінки маневреності проведено аналіз всього різноманіття показників та критеріїв маневреності загалом та її окремих властивостей та запропонована систематизація цих показників. Пропонується розділити ці показники та критерії на три основні групи: силові, кінематичні та енергетичні.

Всі показники та критерії, що використовуються для оцінки маневреності автомобілів, використовуються і для оцінки маневреності колісних тракторів. Це особливо важливо для тракторних самохідних шасі, що мають центр мас, зміщений до задньої осі, і низьку керованість.

2. У процесі дослідження удосконалено комбінований спосіб керування рухом двовісного

поворотного візка колісного транспортного засобу за рахунок того, що поворот двовісного поворотного візка здійснюється двома крутними керуючими моментами. Перший з цих крутних керуючих моментів створюється водієм через рульове керування і силовий гідроциліндр. Другий крутий керуючий момент створюється за рахунок різниці крутних моментів на колесах зовнішнього і внутрішнього бортів двовісного поворотного візка.

Запропонований спосіб керування рухом двовісного поворотного візка дозволяє подолати опір повороту поворотного візка і поліпшити якість керування рухом вказаного візка і колісного транспортного засобу.

У результаті досліджень встановлено, що запропоноване технічне рішення дозволяє удосконалити відомі способи керування поворотом колісних транспортних засобів із двовісними поворотними візками і поліпшити їхнє маневрування.

## Список літератури

1. Млодзевский, Б.К. Къ теории рулевого управления въ автомобиляхъ. *Вѣстникъ инженероувъ*. 1917. Томъ III, № 2. С. 37–41. Доступ URL: <https://etudes.ru/data/localdocs/engineers-bulletin-1917.pdf>
2. Подригало, М. А., Волков, В. П., Бобошко, А. А. [та інш.]. Динамика автомобіля. Харків. *Харківський Національний автомобільно-дорожній університет*, 2008. 424 с.
3. Ясній, П. В., Гудь, В. З., Пиндус, Ю. І., Гудь, М. І. [та інш.]. Методи моніторингу та розрахунку експлуатаційних впливів і динаміки руху колісних транспортних систем при транспортуванні великогабаритних вантажів. Навчальний посібник. Тернопіль. *Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя*. 2018. 168 с.
4. Glazkov, YU. E., Glazkova, M. M. and Popov, M. A. Analysis of the stability of the road train with a controlled semitrailer. *Trends in the development of science and education*. 2020, 01. Doi: 10.18411/lj-12-2020-91
5. Бобошко, А. А. Нетрадиционные способы маневрирования колесных машин. Харьков. *Харківський Національний автомобільно-дорожній університет*. 2006. 172 с.
6. Подригало, М. А., Клец, Д. М., Гацько, В. И. Взаимосвязь свойств устойчивости и управляемости автомобиля. *Вестник СевНТУ. Зб. наукових праць. Серія: Машиноприладобудування та транспорт*, 2012, № 134. С. 28–31.
7. Гацько, В. И. Влияние эксплуатационных факторов на керованість вантажного автомобіля при сталому русі: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.22.20. Харків. *Харківський Національний автомобільно-дорожній університет*. 2015. 20 с.
8. Сахно, В. П., Поляков, В. М., Костенко, А. В. [та ін.]. Експлуатаційні властивості автотранспортних засобів. в 3 ч. Ч. 3. навчальний посібник. *Донець. ЛАНДОН-XXI*, 2015. 400 с.
9. Подригало, М. А., Клец, Д. М., Гацько, В. И. Управляемость колесных машин при установившемся движении. *Автомобильный транспорт. Сборник научных трудов*. 2011. Вып. 29. С. 117–125.
10. Gillespie, Thomas. *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. SAE International. 1992. 520 p. ISBN 1560911999.
11. Milliken, William F., Milliken, Douglas L., Kasprzak, Edward M., Metz, L. Daniel. *Race Car Vehicle Dynamics – Problems, Answers and Experiments*. SAE International. 2003. 294 p. ISBN 0768011272.
12. Rajesh Rajamani. *Vehicle Dynamics and Control*. Second Edition. Springer Dordrecht. 2012. 497 p. ISSN 0941-5122.
13. Massimo Guiggiani. *The Science of Vehicle Dynamics. Handling, Braking, and Ride of Road and Race Cars*. Springer Dordrecht. 2014. 356 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-8533-4>.
14. Пат. №151941 на корисну модель України МКІВООТ 1/00. Спосіб керування рухом чотиривісного транспортного засобу.
15. Пат. №151645 на корисну модель України МПК (2006.01) B60W 10/20. Спосіб керування повороту автомобіля.
16. Подригало М.А., Клец Д.М. Маневренность и управляемость колесных машин. Определение понятий и критерии оценки.

- Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета, 2012. Вып. 35. С. 15–21.
17. Бобошко О.А. Підвищення маневреності колісних тракторів і самохідних шасі : Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02. Харків. Харківський Національний автомобільно-дорожній університет. 2008. 19 с.
  18. Kesheng Yang, Ting Peng, Heng Wu, Taoyan Zhou. Anti-Skid Stability Analysis of Running Vehicles at the Exit of Spiral Tunnel in Snowy Weather. *Proceeding of 21st COTA International Conference of Transportation Professionals*. 2021. Xi'an, China. <https://doi.org/10.1061/9780784483565.128>
  19. Scott G. Shadle, Lloyd H. Emery and Howell K. Brewer. Vehicle Braking, Stability and Control. *SAE Transactions*. 92, 2. 1983. pp. 670–705.
  20. Koiter W.T. and Pacejka H.B. (1968) Skidding of Vehicles Due to Locked Wheels, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Conference Proceedings*, 183, iss. 8, pp 3–18, [https://doi.org/10.1243/PIME\\_CONF\\_1968\\_183\\_135\\_02](https://doi.org/10.1243/PIME_CONF_1968_183_135_02)
  21. Клец Д.М. Концепція забезпечення стабільності показників стійкості та керуваності автомобілів. Дис. ... доктора техн. наук: 05.22.20. Харків. Харківський Національний автомобільно-дорожній університет, 2015. 528 с
  22. Мазін О.С. Підвищення енергоефективності автомобілів при маневруванні зниженням непродуктивних втрат енергії дис. ... канд. техн. наук: 05.22.20. Харків. Харківський Національний автомобільно-дорожній університет. 2020. 186 с
- References (transliterated)**
1. Mlodzeevskyy, B.K. (1917). K" teorii rulevoho upravleniya v" avtomobilyakh". V"stnyk" yzhenerov". Tom" III, no. 2, pp. 37–41. Dostup URL: <https://etudes.ru/data/localdocs/engineers-bulletin-1917.pdf>
  2. Podryhalo, M. A., Volkov, V. P., Boboshko, A. A. [ta insh.]. (2008). Dynamika avtomobilya. Kharkiv. Kharkivs'kyy Natsional'nyy avtomobil'no-dorozhniy universytet, 424 p.
  3. Yasniy, P. V., Hud', V. Z., Pyndus, YU. I., Hud', M. I. [ta insh.]. (2018). *Metody monitorynhu ta rozrakhunku ekspluatatsiynyykh vplyviv i dynamiky rukhu kolisnykh transportnykh system pry transportuvanni velykohabarynykh vantazhiv. Navchal'nyy posibnyk*. Ternopil'. Ternopil's'kyy natsional'nyy tekhnichnyy universytet imeni Ivana Pulyuya. 168 p.
  4. Glazkov, YU. E., Glazkova, M. M. and Popov, M. A. (2020). Analysis of the stability of the road train with a controlled semitrailer. *Trends in the development of science and education*, vol. 01. Doi: 10.18411/lj-12-2020-91
  5. Boboshko, A. A. (2006). Netradytsyonnye sposoby manevrovannya kolesnykh mashyn. Khar'kov. Kharkivs'kyy Natsional'nyy avtomobil'no-dorozhniy universytet, 172 p.
  6. Podryhalo, M. A., Klets, D. M., Hats'ko, V. Y. (2012). Vzymosvyaz' svoystv ustoychivosti y upravlyaemosti avtomobyylya. *Vestnyk SevNTU. Zbirnyk naukovykh prats'. Seriya: Mashynopryladobuduvannya ta transport*, vol. 134, pp. 28–31.
  7. Hats'ko, V. I. (2015). Vplyv ekspluatatsiynyykh faktoriv na kerovanist' vantazhnoho avtomobilya pry stalomu rusi: Avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk: spets. 05.22.20. Kharkiv. Kharkivs'kyy Natsional'nyy avtomobil'no-dorozhniy universytet, 20 p.
  8. Sakhno, V. P., Polyakov, V. M., Kostenko, A. V. [ta in.]. (2015). Ekspluatatsiyni vlastyivosti avtotransportnykh zasobiv. v 3 ch. CH 3. navchal'nyy posibnyk. *Donetsk. LANDON-XXI*, 400 p.
  9. Podryhalo, M. A., Klets, D. M., Hats'ko, V. Y. (2011). Upravlyaemost' kolesnykh mashyn pry ustanovvyshemysya dvyzheny. *Avtomobyl'nyy transport. Sbornyk nauchnykh trudov*, vol. 29, pp. 117–125.
  10. Gillespie, Thomas. (1992). Fundamentals of Vehicle Dynamics. *SAE International*, 520 p. ISBN 1560911999.
  11. Milliken, William F., Milliken, Douglas L., Kasprzak, Edward M., Metz. L. Daniel. (2003). Race Car Vehicle Dynamics – Problems, Answers and Experiments. *SAE International*, 294 p. ISBN 0768011272.
  12. Rajesh Rajamani. (2012). *Vehicle Dynamics and Control. Second Edition*. Springer Dordrecht, 497 p. ISSN 0941-5122.
  13. Massimo Guiggiani. (2014). *The Science of Vehicle Dynamics. Handling, Braking, and Ride of Road and Race Cars*. Springer Dordrecht, 356 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-8533-4>.
  14. Pat. №151941 na korysnu model' Ukrayiny MKYVOOT 1/00. *Sposib keruvannya rukhom chotyryvisnoho transportnoho zasobu*.
  15. Pat. №151645 na korysnu model' Ukrayiny MPK (2006.01) V60W 10/20. *Sposib keruvannya povorotu avtomobilya*.
  16. Podryhalo M.A., Klets D.M. (2012). Manevrennost' y upravlyaemost' kolesnykh mashyn. Opredelenye ponyaty y kryteryu otsenky. *Uchenye zapysky Krymskoho yzhenero-pedahohicheskoho unyversyteta*, vol. 35, pp. 15–21.
  17. Boboshko O.A. (2008). *Pidvyshchennya manevrenosti kolisnykh traktoriv i samokhidnykh shasi* : Avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.20.02. Kharkiv. Kharkivs'kyy Natsional'nyy avtomobil'no-dorozhniy universytet, 19 p.
  18. Kesheng Yang, Ting Peng, Heng Wu, Taoyan Zhou. (2021). Anti-Skid Stability Analysis of Running Vehicles at the Exit of Spiral Tunnel in Snowy Weather. *Proceeding of 21st COTA International Conference of Transportation Professionals*. Xi'an, China. <https://doi.org/10.1061/9780784483565.128>
  19. Scott G. Shadle, Lloyd H. Emery and Howell K. Brewer (1983). Vehicle Braking, Stability and Control. *SAE Transactions*, vol. 92, no. 2, pp. 670–705.
  20. Koiter W.T. and Pacejka H.B. (1968) Skidding of Vehicles Due to Locked Wheels, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Conference Proceedings*, vol. 183, iss. 8, pp 3–18, [https://doi.org/10.1243/PIME\\_CONF\\_1968\\_183\\_135\\_02](https://doi.org/10.1243/PIME_CONF_1968_183_135_02)
  21. Klets D.M. (2015). Kontseptsiya zabezpechennya stabil'nosti pokaznykiv stiykosti ta kerovanosti avtomobiliv. Dys. ... doktora tekhn. nauk: 05.22.20. Kharkiv. Kharkivs'kyy Natsional'nyy avtomobil'no-dorozhniy universytet, 528 p.
  22. Mazin O.S. (2020). Pidvyshchennya enerhoefektyvnosti avtomobiliv pry manevruванні znyzhennam neproduktyvnykh vtrat enerhiyi dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.22.20. Kharkiv. Kharkivs'kyy Natsional'nyy avtomobil'no-dorozhniy universytet. 186 p.

Надійшло (received) 31.01.2023

#### Відомості про авторів / About the Authors

**Подригало Михайло Абович / Podrygalo Mikhail** – доктор технічних наук, професор, Харківський Національний автомобільно-дорожній університет, завідувач кафедри технології машинобудування та ремонту машин; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1624-5219>; e-mail: pmikhab@gmail.com.

**Гармаш В'ячеслав Петрович / Garmash Vyacheslav** – Національна академія Національної гвардії України, старший науковий співробітник науково-дослідного центру, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5681-0980>; e-mail: 2708garmash@gmail.com

**Горєлишев Станіслав Анатолійович / Horielyshev Stanislav** – кандидат технічних наук, доцент, Національна академія Національної гвардії України, провідний науковий співробітник науково-дослідного центру, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1689-0901>; e-mail: port\_6633@ukr.net.

**Балуїн Дмитро Станіславович / Baulin Dmitro** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Національна академія Національної гвардії України, провідний науковий співробітник науково-дослідного центру, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7082-6954>; e-mail: baulinds1966@ukr.net.

**Яровой Геннадій Геннадійович / Yaroyvi Hennadii** – Національна академія Національної гвардії України, ад'юнкт, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6347-353X>; e-mail: kardan57775777@gmail.com

**Сидоренко Ірина Ігорівна / Sydorenko Iryna** – кандидат педагогічних наук, доцент, Національна академія Національної гвардії України, доцент кафедри фундаментальних дисциплін, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7434-682X>; e-mail: sept22@ukr.net