

Леонтьєв Дмитро Миколайович, д.т.н., професор, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, leontiev@khadi.kharkov.ua

Лиходій Олександр Сергійович, к.т.н., доцент, Український державний університет науки і технологій, ННІ Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, lykhodii.oleksandr@pdaba.edu.ua

Малий Віктор Миколайович, здобувач кафедри автомобілів, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, v.m.malyi@ust.edu.ua

## **ОСОБЛИВОСТІ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ ПОВОРОТУ КЕРОВАНИХ КОЛІС ВАНТАЖНИХ АВТОМОБІЛІВ**

Проблема забезпечення правильної кінематики повороту коліс у вантажних автомобілях є критичною для їх маневреності, стійкості руху та довговічності шин. При повороті всі колеса мають рухатися по різних траєкторіях з єдиним центром повороту (принцип Акермана), щоб уникнути зайвих сил у точках контакту шин з дорогою та деталях рульового керування (РК). Елементи приводу РК забезпечують цю геометричну умову наближено. Звичайні конструкції рульових трапецій лише приблизно реалізують умову Акермана. Підвищення точності зазвичай вимагає оптимізації параметрів конструкції [1-7]. Для вантажних автомобілів проблема ускладнюється тим, що для них застосовується нерозрізна трапеція [6-14]. Особливість приводу керованих коліс в таких автомобілях полягає у тому, що передаточне число самого приводу є несиметричним з кутом повороту внутрішнього колеса. Це виникає з тієї причини, що привод здійснюється на ліве колесо через поздовжню рульову тягу, а потім – на праве колесо поперечною рульовою тягою. Тому, якщо повертати вал сошки на однакові кути при поворотах праворуч та ліворуч, то колеса будуть повертати на різні кути. Це призводить до певної незручності як у кінематичному, так і силовому плані дії на кермо. Таким чином, асиметрія кінематики повороту у вантажних автомобілях є серйозною проблемою, яку слід вирішувати шляхом раціоналізації (оптимізації) параметрів рульового приводу.

У науковій літературі приділено увагу оптимізації рульових трапецій вантажних транспортних засобів. Зокрема, ряд робіт зосереджено на алгоритмах оптимального підбору геометричних параметрів. Так, у дослідженні [4] застосовано метод Монте-Карло для оптимізації рульової трапеції вантажного автомобіля. Порівняння детерміністичної та стохастичної оптимізації показало, що метод Монте-Карло дозволяє отримати більш надійні результати та забезпечує високу точність повороту навіть при невеликих відхиленнях параметрів конструкції. Інша робота [5] продемонструвала необхідність врахування кількох критеріїв одразу. Автори дослідили вплив положення тяг трапеції на такі аспекти як похибку Акермана, відхилення траєкторії коліс при роботі підвіски, сили у шарнірах тяг тощо. Виявлено, що різні параметри по-різному впливають на ці показники. Більше того, оптимізація за одним критерієм може погіршувати інший. Тому виконано

оптимізацію з варіюванням координат кріплення тяг. Отримані результати значно знижують похибку Акермана при збалансованому рівні інших характеристик.

Необхідно оптимізувати конструкцію рульового приводу вантажного автомобіля таким чином, щоб забезпечити максимально точну і симетричну кінематику повороту керованих коліс. Симетричність означає, що при поворотах вправо та вліво відгук рульового приводу, тобто кут повороту керованих коліс відносно повороту керма є однаково точним і збалансованим. Потрібно знайти такий набір геометричних параметрів рульового приводу, який забезпечить компроміс між ідеальною кінематикою повороту і реальними можливостями механізму приводу коліс.

Рульовий привід моделюється як просторовий шарнірно-важільний механізм. Для однозначного задання конструкції визначено набір параметрів, зведених до міжшворневої відстані, відносної довжини рульової сошки, відносної довжини поздовжньої тяги, початкових кутів встановлення сошки і тяги, а також відносних координат розміщення деталей рульового приводу відносно балки моста. Додатково враховано кути нахилу шворня (поперечний та поздовжній), оскільки вони також впливають на кінематику повороту. Такий комплекс параметрів повністю характеризує геометрію приводу.

Для кількісної оцінки симетричності роботи РК введено дві функціональні залежності

$$\begin{aligned}\theta_{IL} &= f_L(\mathbf{p}, \theta_{BL}) = f_L(m_1, \theta_1, \phi_1, m_3, \theta_3, \phi_3, \theta_{BL}), \\ \theta_{IR} &= f_R(\mathbf{p}, \theta_{BR}) = f_R(m_1, \theta_1, \phi_1, m_3, \theta_3, \phi_3, \theta_{BR}),\end{aligned}$$

де:  $\theta_{IL} = f_L(\mathbf{p}, \theta_{BL})$  - поворот сошки при повороті лівого колеса ліворуч;

$\theta_{IR} = f_R(\mathbf{p}, \theta_{BR})$  - поворот сошки при повороті правого колеса праворуч;

$\mathbf{p} = \{m_1 \ \theta_1 \ \phi_1 \ m_3 \ \theta_3 \ \phi_3\}$  - вектор параметрів рульової трапеції.

Ідеально симетрична трапеція повинна давати  $\theta_{IL} = \theta_{IR}$ . Тому розглядається різниця цих функцій  $f(\mathbf{p}, \theta_{BL}, \theta_{BR}) = |\theta_{IL}| - |\theta_{IR}|$ . Приймаємо  $f_i(\mathbf{p}, \theta_{BL_i}, \theta_{BR_i}) = f_i(\mathbf{p})$ . На практиці оцінюється модуль різниці, але для зручності оптимізації вводиться інтегральний критерій – квадратична норма цієї різниці. Мінімізуючи цю сумарну квадратичну похибку, намагаємося досягти максимальної симетрії роботи приводу. Формально цільова функція може бути записана як

$$F(\mathbf{p}) = \begin{bmatrix} f_1(\mathbf{p})^2 \\ f_2(\mathbf{p})^2 \\ \text{M} \\ f_n(\mathbf{p})^2 \end{bmatrix}$$

Оптимальні параметри забезпечують мінімальну норму вектор-функції

$$\min_p \|f(\mathbf{p})\|_2^2 = \min_p (f_1(\mathbf{p})^2 + f_2(\mathbf{p})^2 + K + f_n(\mathbf{p})^2)$$

Таким чином, досягнення нуля означало б повну симетрію кінематики, тобто відсутність різниці між реакцією приводу при поворотах коліс.

Задача оптимізації вирішується чисельно у середовищі MATLAB. На кожній ітерації оптимізаційного алгоритму для заданого набору параметрів проводиться кінематичний розрахунок механізму: визначаються кути повороту коліс і відповідний поворот рульової сошки. Алгоритм оптимізації ґрунтується на методі спуску, зокрема метод спряжених градієнтів, а також модифікований метод Ньютона. Обчислюються часткові похідні цільової функції по кожному параметру і формуються умови оптимальності.

Рішення цієї системи дає оптимальні значення параметрів приводу РК. Для початкового наближення параметрів використовуються конструктивні розміри, типові для аналогічних мостів, щоб прискорити збіжність. Чисельні методи поступово зменшують значення цільової функції, коригуючи параметри, поки не буде досягнуто мінімум.

У результаті вирішення описаної задачі розроблена методика визначення оптимальних геометричних параметрів рульового приводу вантажних автомобілів. Вона забезпечує високу симетричність роботи РК для поворотів вправо та вліво – різниця незначна на всьому діапазоні кутів повороту коліс. Як наслідок, підвищується безпека руху та експлуатаційна ефективність вантажних автомобілів. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на врахування додаткових факторів (наприклад, пружних деформацій тяг, люфтів тощо) та застосування мультикритеріальної оптимізації для комплексного покращення всієї системи рульового керування вантажних автомобілів.

### Перелік посилань

1. Zouelm A, Nasiri S, Zohoor H. (2022). Design of two steering mechanisms for exact satisfaction of Ackermann equation. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. 237(6), 1454-1464. DOI:10.1177/09544070221085964
2. Diachuk M., Lykhodii O., Leontiev D., Ryzhykh L. & Aleksandrov Yu. (2022). Dynamic modeling of semitrailer trucks equipped by steered wheels. Journal of Mechanical Engineering and Sciences, 16(1), 8691-8705. <https://doi.org/10.15282/jmes.16.1.2022.04.0687>
3. Леонтьев Д. М. (2015). Про розрахунковий спосіб визначення висоти координати центру ваги типових автомобілів. Автомобильный транспорт. 37, 101–107.
4. Dong, E., Zhang, L., & Xing, Y. (2011). Steering trapezoid mechanism design based on Monte Carlo method. Proceedings of the 2011 International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT), 1, 997–1000. DOI:10.1109/EMEIT.2011.6023578

5. Gao, J., & Qi, X. (2023). Optimal design of steering trapezoid considering multiple performances of the whole vehicle. *Proceedings of the IMechE, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*, 237(2), 338–348. DOI: 10.1177/14644193231160841.

6. Александров Є., Клименко В., Леонтьев Д., Терновий М. (2021). Математичне моделювання електронної системи курсової стійкості автомобіля. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Автомобіле-та тракторобудування, (1), 3-11. Aleksandrov Ye., Klymenko V., Leontiev D., Ternovyi M. (2021). Matematychnе modeliu-vannia elektronnoi systemy kursovoi stiiikosti avtomobilia. [Mathematical modeling of the vehicle stability control of the vehicle] *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Seria: Avtomobile-ta tra-ktorobuduvannia. (1), 3-11. <https://doi.org/10.20998/2078-6840.2021.1.01>

7. Смірнова Н. В., Леонтьев Д. М. (2014). Аналіз режимів руху в задачах проектування та експлуатації автомобільних доріг. *Автомобільні дороги*. 5 (241). 23 – 25.

8. Богомолов В.А., Гурко А.Г., Клименко В.И., Леонтьев Д.Н., Красюк А.Н. (2018). Моделирование систем управления в Simulink.

9. Klymenko V. I., Voronkov O. I., Leontiev D. M., Mykhalievych M. H., Yaryta O. O., Ponikarovska S. V., Borzenko O. P., Fandieieva A. Ye. (2023). Construction and layout of automobiles and internal-combustion engines.

10. Shuklinov S. M., Klymenko V. I., Leontiev D. M., Alokxa M. M. (2023) *Automobile. Theory and operational properties*.

11. Пат. 153590 Україна, МПК В60W 10/20 (2006.01). Спосіб керування рухом чотиригусеничної машини / Богомолов Віктор Олександрович, Байцур Максим Вячеславович, Єременко Антон Васильович, Кирчатий Володимир Іванович, Клименко Валерій Іванович, Леонтьев Дмитро Миколайович, Михалевич Микола Григорович, Мормило Яков Михайлович, Подригало Михайло Абович, Третяк Віктор Михайлович; власники: Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т. – № у 2022 03203 ; заявл. 05.09.2022; опубл. 26.07.2023, Бюл. № 30. – 8 с.

12. Пат. 114177 Україна, МКИ G08G 1/00. Система контролю за траєкторією руху транспортного засобу / Леонтьев Дмитро Миколайович, Клименко Валерій Іванович, Рижих Леонід Олександрович, Ломака Степан Йосифович; власники: Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т, Леонтьев Дмитро Миколайович, Клименко Валерій Іванович, Рижих Леонід Олександрович, Ломака Степан Йосифович. - N у 2016 10369; заявл. 11.10.2016; опубл. 27.02.2017, Бюл. N 4. - 2 с.

13. Пат. 114176 Україна, МКИ G06F 13/00, G01C 23/00, H04N 21/00. Система контролю вихідних параметрів руху транспортного засобу / Леонтьев Дмитро Миколайович, Клименко Валерій Іванович, Рижих Леонід Олександрович, Ломака Степан Йосифович; власники: Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т, Леонтьев Дмитро Миколайович, Клименко Валерій Іванович, Рижих

Леонід Олександрович, Ломака Степан Йосифович. - N u 2016 10368; заявл. 11.10.2016; опубл. 27.02.2017, Бюл. N 4. - 2 с.

14. Леонт'єв Д. М., Дячук М. В., Лиходій О. С., Малий В. М., Мережко С. В. (2016). Методика визначення максимальних значень теоретично необхідних кутів повороту коліс напівпричепів. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. 3. 84-88.

Абрамов Дмитрій Володимирович, д-р техн. наук, професор, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, varan\_mail@ukr.net

Солдатенко Ігор Олегович, аспірант, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, iso1770@ukr.net

Хижняк Карина Станіславівна, студентка, Харківський національний автомобільно-дорожній університет

## **МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕЗПІЛОТНОГО КОЛІСНОГО ВІЗКА, ОБЛАДНАНОГО СНІГОВІДВАЛОМ**

Мета дослідження: визначення динамічних характеристик безпілотного колісного візка, обладнаного сніговідвалом, в процесі здійснення технологічної операції прибирання снігу з асфальтобетонного покриття.

Об'єкт дослідження. У якості об'єкта дослідження під час проведення експерименту був використаний безпілотний колісний візок (рис. 1), який було обладнано сніговідвалом. Візок керується дистанційно. В процесі експериментального дослідження здійснювалась зміна маси колісного візка (рис. 2).

Технічні характеристики безпілотного колісного візка, обладнаного сніговідвалом, експериментальні дослідження якого проводились, наведено у таблиці 1.

Таблиця 1 – Безпілотний колісний візок, технічні характеристики

Параметр	Величина параметра
Споряджена маса, кг	135
Повна маса, кг	300
Довжина/Ширина/Висота, мм (без сніговідвалу)	1300/1270/620
Довжина/Ширина/Висота, мм (з встановленим сніговідвалом)	1560/1270/620
Колісна база, мм	800
Колія, мм	110
Тип приводу	повний
Мотор-колеса	VEOLA ZWG36 XF19R
Діаметр коліс, мм	300
Сумарна потужність електродвигунів, кВт	2,0