

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-298-12-56-60>

УДК 629.017

ВПЛИВ ПРИЧІПНИХ ЛАНОК НА СТІЙКІСТЬ РУХУ КОЛІСНОГО ТРАКТОРА З ШАРНІРНО-ЗЧЛЕНОВАНОЮ РАМОЮ

Подригало М.А., Краснокутський В.М.

THE INFLUENCE OF TRAILER COUPLINGS ON THE STABILITY OF WHEELED TRACTORS WITH ARTICULATED FRAMES

Podrigalo M.A., Krasnokutskyi V.M.

У статті наведено результати дослідження впливу причіпних ланок на стійкість руху колісного трактора з шарнірно-зчленованою рамою при роботі у складі тракторного потягу з двовісним причепом. Показано, що агрегування трактора з причіпною ланкою призводить до перерозподілу нормальних реакцій дороги між передніми та задніми колесами, що суттєво впливає на керованість і стійкість потягу проти складання. Встановлено, що поширені традиційні методи розрахунку, у яких тягова сила вважається прикладеною у плямі контакту колеса з опорною поверхнею, не завжди коректно відображають реальні силові взаємодії в системі «трактор–причіп», особливо для машин із шарнірно-зчленованою рамою та зміщеним уперед центром мас.

Проведено аналіз впливу геометричних параметрів причіпного пристрою, зокрема вертикальної координати осі зчеплення ланок, на зміну сумарної нормальної реакції дороги на задніх колесах трактора. Запропоновано уточнену розрахункову схему тракторного потягу з двовісним причепом, в якій тягова сила та сили опору коченню прикладаються безпосередньо на осях ведучих коліс. Такий підхід дозволив отримати аналітичні залежності, що більш точно описують перерозподіл навантажень між осями при різних варіантах розташування осі зчеплення причіпної ланки та режимах руху агрегату.

На основі рівнянь рівноваги моментів доведено, що при агрегуванні з двовісним причепом вертикальне навантаження на задні колеса трактора може як збільшуватися, так і зменшуватися. Визначено умови, за яких забезпечується зростання сумарної нормальної реакції дороги на задніх колесах, а саме розміщення осі зчеплення ланок вище осі задніх коліс трактора. У протилежному випадку

спостерігається зменшення навантаження, що призводить до погіршення стійкості тракторного потягу проти складання та зниження безпеки експлуатації.

Отримані результати мають важливе практичне значення для конструювання, вибору та модернізації причіпних пристроїв колісних тракторів із шарнірно-зчленованою рамою, а також для підвищення безпеки та ефективності їх експлуатації в реальних умовах роботи.

Ключові слова: колісний трактор, шарнірно-зчленована рама, причіпна ланка, стійкість руху, центр мас, тягова сила

Вступ. Використання причіпних ланок викликає перерозподіл нормальних реакцій дороги між передніми та задніми колесами колісних тракторів. При наявності зусилля, яке розтягує ланки тракторного потягу, у відповідності до існуючих підходів до розрахунку, це повинно збільшувати нормальні реакції дороги на задніх колесах і зменшувати на передніх колесах. Для колісних тракторів, прикладом яких є трактори з шарнірно-зчленованою рамою, зі зміщеним до передньої вісі центром мас, це призводить до підвищення стійкості потягу проти складання [1]. Але це виконується не завжди. Результати дослідження, яке проведено, виявило, що, в залежності від вертикальної координати осі зчеплення ланок вертикальне навантаження задніх коліс може збільшуватися, а може зменшуватися. Для забезпечення підвищення нормальних реакцій дороги на задніх колесах ось зчеплення ланок повинна знаходитися вище осі задніх коліс.

Аналіз останніх досягнень у публікаціях.

В дослідженні [2] проведено аналіз методів розрахунку розподілу нормальних реакцій дороги між осями тракторного агрегату. Показано, що відомі розрахунки, які базуються на тому положенні, що тяглова сила прикладена у плямі контакту колеса з дорогою, не відповідають справжньому явищу. Дослідження, які представлено в роботі [2], показали, що більш коректне складання розрахункової схеми тракторного агрегату з прикладанням тягової сили та сили опору кочення на осях коліс [3, 4] показує збільшення сумарної нормальної реакції на передніх колесах при розташуванні вертикальної координати осі зчеплення ланок вище ніж ось заднього ведучого колеса. Збільшення нормальної реакції дороги на передніх колесах дозволяє підвищити керованість колісного трактора [5, 6]. Для колісних тракторів з шарнірно-зчленованою рамою при агрегуванні з причіпними ланками важливе забезпечення стійкості тракторного потягу проти складання, що забезпечується нормальними реакціями дороги на задніх колесах трактора [7–16]. Розглянемо розрахункову схему тракторного потягу у складі колісного трактора з шарнірно-зчленованою рамою та двовісного причепа при традиційному підході (рис. 1).

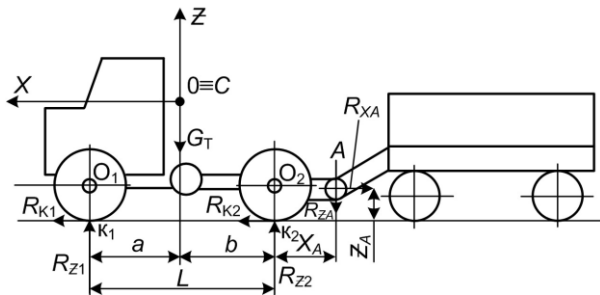


Рис. 1. Схема сил, що діють на тракторний потяг при традиційному підході до прикладанні тягової сили

Для визначення сумарної нормальної реакції дороги R_{z2} на задніх колесах трактора запишемо рівняння

$$\sum M_{K1} = -G_T a + R_{z2} L - R_{zA} (x_A + L) - R_{xA} z_A, \quad (1)$$

де G_T – вага трактора,

$$G_T = m_T g, \quad (2)$$

m_T – маса трактора;

g – прискорення вільного падіння, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$;

a – відстань між передньою віссю та проекцією центру мас трактора на горизонтальну площину;

L – база трактора;

R_{zA} ; R_{xA} – вертикальна горизонтальна складові реакції в шарнірі А;

x_A ; z_A – горизонтальна та вертикальна координати розташування осі зчеплення ланок тракторного потягу.

З рівняння (1) знаходимо сумарну нормальну реакцію дороги на задніх колесах

$$\begin{aligned} R_{z2} &= G_T \frac{a}{L} + R_{zA} \left(1 + \frac{x_A}{L}\right) + R_{xA} \frac{z_A}{L} = \\ &= G_T \frac{a}{L} \left[1 + \frac{R_{zA}}{G_T} \left(\frac{L}{a} + \frac{x_A}{a}\right) + \frac{R_{xA}}{G_T} \frac{z_A}{a}\right], \end{aligned} \quad (3)$$

Сумарну нормальну реакцію дороги на задніх колесах трактора можна уявити у вигляді

$$R_{z2} = R_{z20} + \Delta R_{z2}, \quad (4)$$

де R_{z20} – сумарна нормальна реакція дороги на задніх колесах трактора при відсутності причіпної ланки;

ΔR_{z2} – збільшення сумарної нормальної реакції на задніх колесах трактора за рахунок причіпної ланки

$$R_{z20} = G_T \frac{a}{L}, \quad (5)$$

З рівняння (4), із урахуванням виразів (3) і (5), отримаємо

$$\begin{aligned} \Delta R_{z0} &= R_{z2} - R_{z20} = G_T \frac{a}{L} \times \\ &\times \left[1 + \frac{R_{zA}}{G_T} \left(\frac{L}{a} + \frac{x_A}{a}\right) + \frac{R_{xA}}{G_T} \frac{z_A}{a}\right] - G_T \frac{a}{L} = \\ &= R_{zA} \left(1 + \frac{x_A}{L}\right) + R_{xA} \frac{z_A}{L}. \end{aligned} \quad (6)$$

При двовісній причіпній ланці можна прийняти $\Delta R_A \approx 0$. В цьому випадку

$$R_{z2} = R_{xA} \frac{z_A}{L} > 0, \quad (7)$$

Таким чином, при традиційному підході, наявність причіпної ланки збільшує сумарну нормальну реакцію дороги на задніх колесах трактора, що повинно покращити стійкість тракторного потягу проти складання. Однак, як раніше показали дослідження [2, 3], традиційний підхід не відповідає істинному явищу.

Мета і постановка завдань дослідження.

Метою дослідження є збільшення точності знаходження сумарної нормальної реакції дороги на задніх колесах трактора із шарнірно-зчленованою рамою при агрегуванні з двовісним причепом.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити завдання визначення сумарної нормальної реакції дороги на задніх колесах колісного трактора із шарнірно-зчленованою рамою і двовісним причепом у випадку прикладання тягових сил на осях коліс.

Виклад основного матеріалу. На рис.2 наведено розрахункову схему тракторного потягу при прикладанні тягових сил на осях ведучих коліс

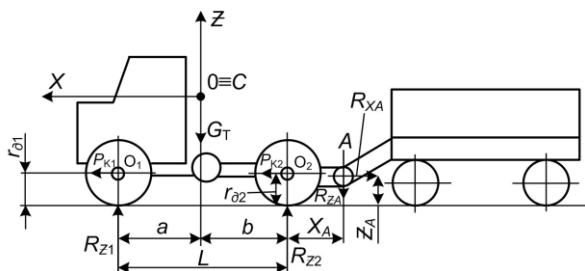


Рис. 2. Схема сил, що діють на тракторний потяг при прикладанні тягових сил на осях ведучих коліс

Для визначення сумарної нормальної реакції дороги на задніх колесах трактора визначимо рівняння суми моментів відповідно точки O_1

$$\sum M_{O_1} = R_{z2}L - G_T a - R_{zA}(L + x_A) - R_{xA}(z_A - r_{\partial 2}) = 0 \quad (8)$$

де $r_{\partial 2}$ – динамічний радіус заднього ведучого колеса (можна прийняти $r_{\partial 2} = r_{\partial 1} = r_{\partial}$)

$r_{\partial 1}$ – динамічний радіус переднього ведучого колеса

r_{∂} – динамічний радіус ведучих коліс

P_{K1} – тягова сила на осі переднього ведучого колеса

P_{K2} – тягова сила на осі заднього ведучого колеса

З рівняння (8) отримаємо

$$R_{z2} = G_T \frac{a}{L} + R_{zA} \left(1 + \frac{x_A}{L}\right) + R_{xA} \frac{z_A - r_{\partial 2}}{L} = G_T \frac{a}{L} \left[1 + \frac{R_{zA}}{G_T} \left(\frac{L}{a} + \frac{x_A}{a}\right) + \frac{R_{xA}}{G_T} \frac{z_A - r_{\partial 2}}{a}\right] \quad (9)$$

Збільшення сумарної нормальної реакції дороги на задніх колесах трактора після агрегування з причіпною ланкою

$$\Delta R_{z2} = R_{z2} - R_{z20} = R_{zA} \left(1 + \frac{x_A}{L}\right) + R_{xA} \frac{z_A - r_{\partial 2}}{L} \quad (10)$$

При агрегуванні трактора з двовісним причепом можна прийняти $R_{zA} \approx 0$. В цьому випадку рівняння (10) прийме вигляд

$$\Delta R_{z2} = R_{xA} \frac{z_A - r_{\partial 2}}{L} \quad (11)$$

Сумарна нормальна реакція дороги на задніх колесах трактора буде збільшуватися при агрегуванні з причіпною ланкою у випадку $\Delta R_z > 0$. Останнє можливо при $z_A > r_{\partial 2}$, що реалізується за рахунок найбільш високої точки встановленої осі зчеплення ланок. При $z_A < r_{\partial 2}$ величина $\Delta R_{z2} < 0$, що означає зменшення сумарної нормальної реакції дороги на задніх колесах трактора після з'єднання з причіпною ланкою. Останнє викликає погіршення стійкості тракторного потягу проти складання.

Висновки.

1. Існуючі методи розрахунку сумарних реакцій дороги на осях колісних тракторів, особливо при врахуванні взаємодії з причіпними ланками, дають помилковий результат про збільшення стійкості тракторного потягу проти складання.

2. Більш коректне використання розрахункової схеми тракторного потягу, який складається із колісного трактора з шарнірно-зчленованою рамою та двовісного причепа, дозволило визначити, що при встановленні осі кріплення ланок вище осі задніх коліс ($z_A > r_{\partial 2}$) стійкість потягу проти складання підвищується, оскільки збільшується сумарна нормальна реакція дороги на задніх колесах трактора.

Література

1. Галич І. В., Антощенко Р. В., Антощенко В. М. До дослідження динаміки трактора з шарнірно-з'єднаною рамою і урахуванням нерівності опорної поверхні // Інженерія природокористування. 2019. №2(12). С. 28–37.
2. Подригало М.А., Краснокутський В.М. Вплив причіпних ланок на керованість тракторних самохідних шасі // Вісник машинобудування та транспорту. 2024. №1(19). С. 109–114. DOI: <https://doi.org/1031649/2413-4503-2024-19-1-109-114>.
3. Подригало М.А., Шелудченко В.В. Нове в теорії експлуатаційних властивостей автомобілів та тракторів. Навчальний посібник. – Суми: Сумський національний аграрний університет, – 2015. – 213 с.
4. Динаміка колеса автомобіля. Монографія [текст] / А.У. Абдулгасіс, Д.В. Абрамов, М.П. Артёмов, В.І. Гацько, З.Е. Забелишенський, Д.М. Клец, О.О. Назарько, М.А. Подригало, О.С. Полянський, М.М. Потапов, В.Л. Файст; під ред. М.А. Подригало та О.С. Полянського. – Х.: ХНАДУ, 2019. – 199 с.
5. Є. І. Калінін, М. А. Кусков, О. М. Бельорін-Еррера. Особливості повороту шарнірно-зчленованого трактора // Системи управління, навігації та зв'язку. 2022. Випуск 1(67). С. 30–33.
6. Клец Д. М. Определение взаимосвязи между критериями маневренности колесных машин // Вісник НТУ «ХПІ». 2013. № 31 (1004). С. 35–43.
7. Волонцевич Д. О. К вопросу моделирования подсистемы эластичное колесо-дорога для шарнирно-сочленённых колёсных машин / Д. О. Волонцевич, В. А. Карпенко, В. М. Качур // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер. Автомобіле- та тракторобудування. 2004. № 16. С. 149–156.
8. Динаміка руху колісних тракторів: монографія / Б. І. Кальченко, О. Ю. Ребров, А. Г. Мамонтов, А. П. Кожушко, М. Є. Якунін. – Харків. Видавець: О. А. Мірошніченко, 2021. – 320 с.
9. Мамонтов А. Г. Формування математичної моделі динамічної навантаженості ходової системи колісного трактора з напівпричіпним агрегатом / А. Г. Мамонтов, А. П. Кожушко, О. Ю. Ребров // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». 2019. № 1. С. 29–41.
10. Кальченко Б. І. Дослідження динамічної стійкості та плавності руху колісних тракторів / Б. І. Кальченко, А. П. Кожушко // Вісник НТУ «ХПІ». 2017. № 44 (1266). С. 110–115.
11. Кальченко Б. І. Плавність руху як складова динаміки трактора: монографія / Б. І. Кальченко, О. Ю. Ребров, А. П. Кожушко, А. Г. Мамонтов. – Х.: ФОП Панов А.М., 2018. – 164 с.
12. Ребров О. Ю. Теоретичне обґрунтування основних параметрів колісних сільськогосподарських тракторів / Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів, ХНТУСГ. 2017. №8. С. 243–254.
13. Кожушко А. П. Дослідження плавності руху машинотракторного агрегату з перемінною масою при виконанні транспортної роботи / А. П. Кожушко // Автомобіль і електроніка. Сучасні технології. 2019. № 15. С. 50–57.
14. Надикто В., Кюрчев В. Нові елементи теорії тягової динаміки та експлуатації колісних тракторів // Техніка і технології АПК. 2021. №4 (117). С. 21–26.
15. Кальченко Б. І. Вплив плавності ходу колісних тракторів на навантаженість трансмісії / Б. І. Кальченко, О. Ю. Ребров, А. П. Кожушко // Автомобільний транспорт. 2017. № 41. С. 30–37.
16. Надикто В. Визначення номінального тягового зусилля трактора // Bulletin of Agricultural Science. 2024. №12. С. 51–56.

References

1. Galych I.V., Antoshchenkov R.V., Antoshchenkov V.M. To study the dynamics of the tractor with articulated frame and taking into account the inequality of the supporting surface // Engineering of nature management. 2019. №2 (12). P. 28–37.
2. Podrigalo M. A., Krasnokutskiy V. M. The influence of towing links on the handling of tractor self-propelled chassis // Bulletin of Mechanical Engineering and Transport. 2024. No. 1(19). P. 109–114. DOI: <https://doi.org/1031649/2413-4503-2024-19-1-109-114>.
3. Podrigalo M.A., Sheludchenko V.V. New developments in the theory of operational properties of cars and tractors: textbook. – Sumy: Sumy National Agrarian University, 2015. – P. 213.
4. Dynamics of a car wheel. Monograph [text] / A.U. Abdulhazis, D.V. Abramov, M.P. Artomov, V.I. Hatsko, Z.E. Zabelyshenskyi, D.M. Klets, O.O. Nazarko, M.A. Podrigalo, O.S. Polianskyi, M.M. Potapov, V.L. Faist; edited by M.A. Podrigalo and O.S. Polianskyi – Kharkiv: KNAHU, 2019. – 199 p.
5. Ye. Kalinin, M. Kuskov, O. Bellorin-Herrera. Features of rotation of the articulated tractor // Control, navigation and communication systems. 2022. Issue 1(67). P. 30–33.
6. Klets D. M. Determination of the relationship between the maneuverability criteria of wheeled vehicles / D. M. Klets // Bulletin of NTU “KhPI.” 2013. No. 31 (1004). P. 35–43.
7. Volontsevych D. O. On the modeling of the elastic wheel-road subsystem for ball-jointed wheeled vehicles / D. O. Volontsevich, V. A. Karpenko, V. M. Kachur // Bulletin of the National Technical University “KhPI.” Series: Automobile and Tractor Engineering. 2004. No. 16. P. 149–156.
8. Dynamics of wheeled tractors: monograph / B. I. Kalchenko, O. Yu. Rebrov, A. G. Mamontov, A. P. Kozhushko, M. Ye. Yakunin. – Kharkiv. Publisher: O. A. Miroshnychenko, 2021. – 320 p.

9. Mamontov A. G. Formation of a mathematical model of the dynamic load of the running gear of a wheeled tractor with a semi-trailer unit / A. G. Mamontov, A. P. Kozhushko, O. Yu. Rebrov // Bulletin of the National Technical University "KhPI". 2019. No. 1. P. 29–41.
10. Kalchenko B. I. Research on the dynamic stability and smoothness of wheeled tractors / B. I. Kalchenko, A. P. Kozhushko // Bulletin of NTU "KhPI". 2017. No. 44 (1266). P. 110–115.
11. Kalchenko B. I. Smoothness of movement as a component of tractor dynamics: monograph / B. I. Kalchenko, O. Yu. Rebrov, A. P. Kozhushko, A. G. Mamontov. – Kharkiv: FOP Panov A.M., 2018. – 164 p.
12. Rebrov O. Yu. Theoretical justification of the basic parameters of wheeled agricultural tractors / Technical service of agro-industrial, forestry, and transport complexes, KhNTUA. 2017. No. 8. P. 243–254.
13. Kozhushko, A. P. Research on the smoothness of movement of a machine-tractor unit with variable mass when performing transport work / A. P. Kozhushko // Automobile and Electronics. Modern Technologies. 2019. No. 15. P. 50–57.
14. Nadykto V., Kiurchev V. New elements of the theory of traction dynamics and operation of wheeled tractors // Technology and Technologies of the Agro-Industrial Complex. 2021. No. 4 (117). P. 21–26.
15. Kalchenko B. I. Influence of the smoothness of wheeled tractors on transmission load / B. I. Kalchenko, O. Yu. Rebrov, A. P. Kozhushko // Automobile Transport. 2017. No. 41. P. 30–37.
16. Nadykto V. Determination of the nominal tractive effort of a tractor // Bulletin of Agricultural Science. 2024. No. 12. P. 51–56.

Podrigalo M.A., Krasnokutskyi V.M. The influence of trailer couplings on the stability of wheeled tractors with articulated frames

The article presents the results of a study of the influence of trailer links on the stability of a wheeled tractor with an articulated frame when working in a tractor train with a two-axle trailer. It is shown that coupling a tractor with a trailer link leads to a redistribution of normal road reactions between the front and rear wheels, which significantly affects the maneuverability and stability of the train against folding. It has been established that common traditional calculation methods, in which the tractive force is considered to be applied at the point of contact between

the wheel and the supporting surface, do not always correctly reflect the actual force interactions in the "tractor-trailer" system, especially for machines with an articulated frame and a forward-shifted center of mass.

An analysis of the influence of the geometric parameters of the towing device, in particular the vertical coordinate of the coupling axis of the links, on the change in the total normal reaction of the road on the rear wheels of the tractor was carried out. A refined calculation scheme for a tractor-trailer with a two-axle trailer is proposed, in which the tractive force and rolling resistance forces are applied directly to the drive wheel axles. This approach made it possible to obtain analytical dependencies that more accurately describe the redistribution of loads between the axles for different variants of the coupling axis location of the trailer link and the unit's driving modes.

Based on the equations of equilibrium of moments, it has been proven that when aggregated with a two-axle trailer, the vertical load on the rear wheels of the tractor can either increase or decrease. The conditions under which an increase in the total normal reaction of the road on the rear wheels is ensured have been determined, namely, the placement of the coupling axis of the links above the axis of the rear wheels of the tractor. In the opposite case, a decrease in load is observed, which leads to a deterioration in the stability of the tractor pull against folding and a decrease in operational safety.

The results obtained are of great practical importance for the design, selection, and modernization of trailer devices for wheeled tractors with an articulated frame, as well as for improving the safety and efficiency of their operation in real working conditions.

Keywords: *wheeled tractor, articulated frame, trailer link, stability of movement, center of mass, traction force*

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

Краснокутський Володимир Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, докторант кафедри технології машинобудування і ремонту машин, Харківський національний автомобільно-дорожній університет; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9484-4113>; e-mail: hvukvn62@gmail.com.

Стаття подана 22.11.2025.