

Ю.І. КОЛЕСНИК

ОСОБЛИВОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТРАКТОРНИХ ПОЇЗДІВ В ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМАХ РУХУ

При гальмуванні тракторних поїздів безпека їхнього руху забезпечується відповідною дією гальмівної системи трактора та причепів, при якому досягається зупинка тракторного поїзда на можливо короткому відрізку колії або необхідне зниження швидкості за збереження стійкого руху в будь-яких навантажувальних та дорожніх умовах.

Практика експлуатації тракторних поїздів показала, що в тому випадку, якщо гальмівна система не відповідає вимогам безпеки, при гальмуванні тракторного поїзда виникає наїзд причепів на трактор, «складання» та перекидання ланок поїзда, які нерідко призводять до людських жертв.

Незважаючи на те, що швидкості руху тракторних поїздів значно нижчі від автомобільних, тракторні поїзди мають велику схильність до занесення та перекидання при гальмуванні порівняно з автомобільними поїздами через ряд конструктивних та експлуатаційних особливостей. У зв'язку з цим технічні вимоги щодо безпеки руху до гальмівної системи тракторного та автомобільного поїздів відрізняються між собою.

Ключові слова: трактор, причеп, тракторний поїзда, гальмування, стійкість

I. KOLIESNIK

FEATURES OF OPERATION OF TRACTOR TRAINS IN TRANSIENT TRAFFIC MODES

When braking tractor trains, the safety of their movement is ensured by the appropriate action of the tractor and trailer braking system, which achieves a stop of the tractor train on the shortest possible section of the track or the necessary speed reduction while maintaining stable movement in any load and road conditions.

The practice of operating tractor trains has shown that if the braking system does not meet safety requirements, when braking a tractor train, trailers collide with the tractor, "folding" and overturning of train links occur, which often lead to human casualties.

Despite the fact that the speeds of tractor trains are significantly lower than those of automobile trains, tractor trains have a greater tendency to skid and overturn during braking compared to automobile trains due to a number of design and operational features. In this regard, the technical requirements for traffic safety for the braking system of tractor and automobile trains differ from each other.

Key words: tractor, trailer, tractor train, braking, stability

Вступ.

При гальмуванні тракторних поїздів безпека їхнього руху забезпечується відповідною дією гальмівної системи трактора та причепів, при якому досягається зупинка тракторного поїзда на можливо короткому відрізку колії або необхідне зниження швидкості за збереження стійкого руху в будь-яких навантажувальних та дорожніх умовах.

Збереження стійкості при гальмуванні тракторного поїзда при наявних співвідношеннях мас у трактора та причепа залежатиме від характеру зміни величин питомої гальмівної сили кожного з них у процесі гальмування. Сила впливу причепа при накаті на трактор визначається різницею питомих гальмівних сил між ланками тракторного поїзда.

Конструктивні параметри колісних тракторів (наприклад, висота центру тяжіння, колію, база тощо) мають такі співвідношення, при яких виникають переважно умови для перекидання при гальмуванні.

Особливості експлуатації тракторних поїздів характеризуються тим, що загальмовування поїздів проводиться у різних дорожніх та польових умовах, на крутих спусках та підйомах, в умовах слизьких та брудних доріг з різними радіусами повороту. У цих умовах занесення та перекидання ланок тракторного поїзда можливі на будь-яких, найнижчих швидкостях руху.

Аналіз останніх досягнень та публікацій.

Одним з основних факторів, що негативно впливають на безпеку руху тракторного поїзда при гальмуванні, є те, що власна маса трактора в два і більше разів менша за масу

завантаженого причепа (причепів). Крім того, трактор-тягач при роботі з причепами не є вантажонесучою машиною (при роботі з напівпричепами трактор навантажується незначно), тому зі зміною навантаження на причепах в процесі експлуатації необхідно коригувати співвідношення гальмівного зусилля трактора і причепів.

Автори [1] проводять порівняльний аналіз динаміки гальмування за різних конфігурацій гальмівних систем тракторних поїздів. Приділяється увага впливу блокування коліс та зчеплення з дорогою.

Стаття [2] описує математичну модель керування промисловим тракторним потягом з причепом, акцентуючи увагу на відстеженні траєкторії та стійкості при гальмуванні.

Автори [3] досліджують застосування нечіткої логіки другого типу контролю гальмування автономного трактора. Показано, що підхід покращує стійкість під час маневрів.

Стаття [4] націлена на практичні аспекти: як стан та конфігурація шин впливає на ефективність гальмування сільгосптехніки, особливо на схилах та вологому ґрунті.

Робота [5] присвячена аналізу стійкості тракторного поїзда при гальмуванні, включаючи розрахунок моменту перекидання та поперечних коливань.

В роботі [6] описується алгоритм оптимального розподілу гальмівних зусиль у складі тягача та причепа, спрямований на мінімізацію зношування гальмівної системи та підвищення безпеки.

Автори [7] оцінюють ефективність систем ABS на тракторах. Наведено лабораторні та польові випробування, що підтверджують підвищення керованості.

Фундаментальна робота з динаміки тракторних агрегатів. Розглядаються особливості управління та гальмування при різних швидкісних режимах та вантажах [8].

Викладено метод оптимального розподілу гальмівних зусиль для покращення стабільності руху та скорочення гальмівного шляху [9].

Класична робота, де розглядається поведінка позашляхової техніки при гальмуванні на м'яких та нерівних поверхнях. Наголошується на важливості контактної плями колеса [10].

Вивчається поведінка тракторних поїздів під час гальмування на схилах. Моделюються різні умови нахилу, зчеплення та розподілу маси [11].

Дослідження [12] зосереджено поведінці напівпричепа при екстремому гальмуванні. Використовуються методи CFD для аналізу аеродинаміки та сил опору.

Автори [13] оцінюють характеристики гальмівних систем для шарнірно-зчленованих тракторів, включаючи вплив маси причепа та асиметричних навантажень.

Автор описує інтелектуальні гальмівні системи великих сільгоспмашин. Розглядаються варіанти електронного управління та взаємодії з іншими бортовими системами [14].

Робота [15] спрямована на вивчення аспектів безпеки під час експлуатації тракторів. Аналізуються причини втрати стійкості та гальмівних збоїв у реальних умовах.

Мета та постановка задачі дослідження.

Основним показником, що характеризує динаміку тракторно-транспортного поїзда, є нерівномірність опору його пересування, на яку істотно впливають власна маса, конструктивні особливості, величина зовнішніх сил, що впливають, і характер їх зміни.

Для досягнення поставленої мети вирішувались завдання покращення тягово-зчіпних властивостей, керованості, стійкості та розгінно-гальмівних властивостей у процесі виробництва сільськогосподарської продукції.

Основний матеріал та результати дослідження.

Теоретично для забезпечення безпеки руху тракторного поїзда при гальмуванні без наїзду причепа (причепів) на трактор необхідно, щоб ефективність гальмування кожної ланки поїзда була однаковою в кожному момент часу гальмування [16].

Аналітично ця умова виражається так

$$q_T = q_{m1} = \dots q_{mi} = \frac{P_T}{G_T} = \frac{P_{m1}}{G_{m1}} = \dots \frac{P_{mi}}{G_{mi}} \quad (1)$$

де $q_T, q_{\Pi 1}, q_{\Pi i}$ – коефіцієнти ефективності гальмування трактора та причепів (питомі гальмівні сили); $P_T, P_{\Pi 1}, P_{\Pi i}$ – гальмівні сили відповідно трактора та причепів; $G_T, G_{\Pi 1}, G_{\Pi i}$ – сили тяжіння трактора та причепів.

Щоб забезпечити виконання зазначеної умови, необхідно проводити автоматичне регулювання гальмівних сил ланок тракторного поїзда в залежності від зміни навантаження на причепа в процесі експлуатації та в залежності від інтенсивності гальмування. Причому вказане регулювання гальмівних сил має забезпечуватись у часі за рахунок швидкодії системи керування гальмами. Дане технічне завдання досі не вирішено [17].

Для практичного забезпечення безпеки при гальмуванні тракторних поїздів з метою виключення наїзду причепа (причепів) на трактор, тобто для забезпечення зусиль, що розтягують, в зчіпках тракторного поїзда при всіляких навантажувальних і дорожніх умовах експлуатації, як показує аналіз процесу динаміки гальмування і дані випробувань, необхідно виконання певних умов.

Ефективність гальмування (питома гальмівна сила) кожної наступної ланки поїзда повинна бути вищою за ефективність гальмування попередньої ланки в кожний момент часу гальмування.

Щоб цю умову виконати за будь-якого можливого випадку гальмування поїзда експлуатації (у тому числі, при завантаженні причепів вище норми, при частковій втраті ефективності дії гальм тощо), необхідно:

- обладнати причепа більш ефективною, ніж у трактора-тягача гальмівною системою;
- гальмування тракторного поїзда здійснювати за рахунок увімкнення тільки гальм причепа (причепів) з підключенням гальм трактора при екстремому гальмуванні (після повного увімкнення гальм причепа).

Таким чином, проектування безпечної гальмівної системи тракторного поїзда зводиться до вибору сили гальмівних механізмів ланок поїзда та системи приводів гальм, що забезпечує послідовне включення гальм причепа і трактора.

На прикладі тракторного поїзда у складі трактора Deutz-Fahr Agrolux 55 та причепа Metal-Fach T711/2 можна знайти необхідну ефективність дії гальм причепа, а також визначити, які осі причепа мають бути обладнані гальмами.

Величина уповільнення m/s^2 , яка є визначальним параметром ефективності гальмування кожної ланки поїзда і стану стійкості поїзда в цілому, змінюється в залежності від коефіцієнта зчеплення дороги при повному використанні зчіпної ваги осей в процесі гальмування [18].

Залежність зміни величини уповільнення тракторного причепа від величини коефіцієнта зчеплення при гальмуванні гальмами тільки передніх або задніх коліс визначається за наступними позначеннями:

- G_{Π} – сила тяжіння завантаженого причепа;
- $G_{\Pi}^1; G_{\Pi}^2$ – нормальні реакції, що діють відповідно на передню та задню осі причепа;
- $P_{\Pi}^1; P_{\Pi}^2$ – тангенційні гальмівні сили, що діють відповідно на колеса передньої та задньої вісей;
- l – основа причепа;
- c, d – координати центру тяжіння відповідно до передньої та задньої осей;
- h_{Π} – висота центру тяжкості;
- j_{Π} – уповільнення причепа;
- g – прискорення сили тяжіння;
- φ – коефіцієнт зчеплення.

При загальмовуванні тракторного причепа лише гальмами передніх коліс величина уповільнення визначається силою

$$P'_n = j_n \frac{G_n}{g} = G'_n \varphi \quad (2)$$

Враховуючи перерозподіл нормальних реакцій між осями при гальмуванні, маємо

$$G'_n = G_n \frac{d}{l} \left(1 + \frac{j_n h_n}{gd} \right) \quad (3)$$

$$P'_n = G_n \frac{d}{l} \left(1 + \frac{j_n h_n}{gd} \right) \varphi \quad (4)$$

Уповільнення причепа при загальмовуванні лише гальмами передніх коліс

$$j_n = \frac{\varphi gd}{l - h_n} \quad (5)$$

Аналогічно уповільнення причепа при загальмовуванні лише гальмами задніх коліс

$$j_n = \frac{\varphi gc}{l + h_n \varphi} \quad (6)$$

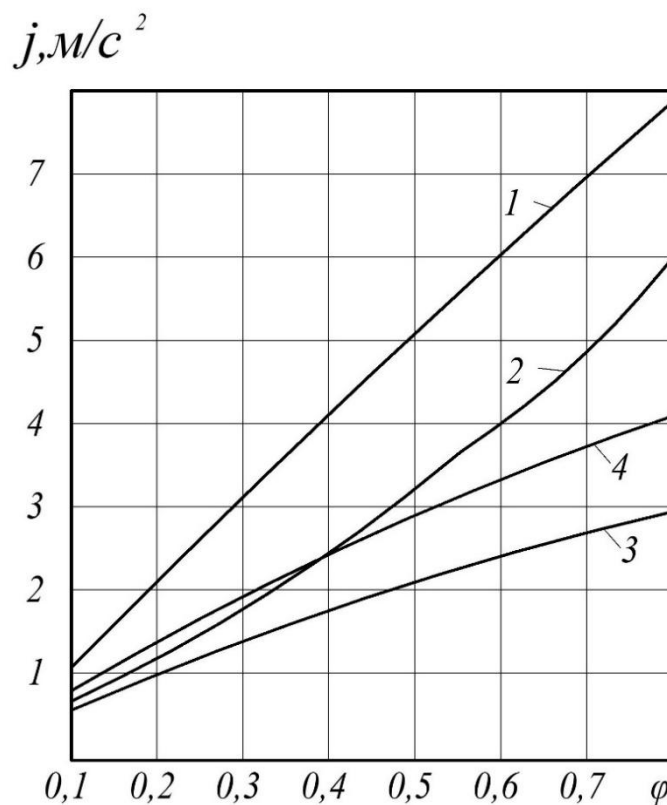


Рис. 1 – Графік $j = f(\varphi)$ трактора Deutz-Fahr Agrolut 55 та причепа Metal-Fach T711/2 з гальмами на колесах причепа:
1 – па всіх колесах; 2 – на передніх; 3 – на задніх; 4 – гальмування трактора.

Результати розрахунку уповільнень причепа Metal-Fach T711/2 та трактора Deutz-Fahr Agrolux 55 представлені на рис. 1.

Колісні трактори з гальмами на задніх колесах мають максимальне уповільнення $4,0 \text{ м/с}^2$ при гальмуванні на сухій бетонній дорозі ($\varphi = 0,8$) із повним використанням зчіпної ваги на задній осі, що підтверджено випробуваннями. Колісні трактори з гальмами на всіх колесах (John Deere 6110B) мають максимальне уповільнення $4,5\text{--}5,0 \text{ м/с}^2$.

З рис. 1 слід, що причіп Metal-Fach T711/2 з гальмами на задніх колесах має максимальне уповільнення на дорозі з $\varphi = 0,8$ близько $3,0 \text{ м/с}^2$, а на дорозі з $\varphi = 0,5$ тільки $2,0 \text{ м/с}^2$, тобто на всьому діапазоні значення коефіцієнта зчеплення уповільнення причепа з гальмами на задніх колесах менше уповільнення одиночного трактора. Отже, при встановленні гальм лише на задні колеса причепа не буде забезпечена стійкість тракторного поїзда при гальмуванні [19, 24].

При гальмуванні причепа одними передніми гальмами (див. рис. 1) величина уповільнення причепа на дорогах з $\varphi > 0,4$ вище, ніж у трактора, а на дорогах з $\varphi < 0,4$ – уповільнення нижче причепа, ніж у трактора. Звідси випливає, що на слизьких дорогах причіп при гальмуванні накатуватиметься на трактор і за певних дорожніх умов (гальмування на повороті або спуску) можлива втрата стійкості трактора.

Враховуючи, що колісний трактор John Deere 6110B має гальма на всіх колесах і що в перспективі всі типи колісних тракторів повинні бути обладнані гальмами на всіх колесах, тракторні причепа з одними передніми гальмами не можуть забезпечити більш ефективного загальмовування на дорогах з $\varphi > 0,4$ порівняно з тракторами.

Отже, для виконання умов стійкості тракторного поїзда при гальмуванні на дорогах із будь-яким покриттям тракторні причепа мають бути обладнані гальмами на всіх колесах [20].

Крім вимоги до стійкості тракторного поїзда для забезпечення безпеки руху, існують вимоги до ефективності дії гальмівної системи тракторних поїздів. Оскільки тракторні поїзди експлуатуються на дорогах загального користування з твердим покриттям зі швидкістю вище 25 км/год (тобто знаходяться в одному потоці з автомобільним транспортом), то їх гальмівна система повинна відповідати вимогам «Правил дорожнього руху» та вимогам до гальм автотранспортних засобів (Правилом ЄЕК ООН № гальмування» [26]).

У чинних вимогах зазначено, що максимальне уповільнення тракторного поїзда має бути не менше $4,4 \text{ м/с}^2$ при гальмуванні на рівній ділянці дороги із сухим твердим покриттям.

Слід визначити умови для тракторного поїзда, за яких ця величина уповільнення може бути досягнута. На підставі формули загального уповільнення поїзда

$$j = \frac{j_T \frac{G_T}{g} + j_{II} \frac{G_{II}}{g}}{\frac{G_T}{g} + \frac{G_{II}}{g}} \quad (7)$$

де j_T, j_{II} – уповільнення відповідно трактора та причепа; G_T, G_{II} – сили тяжіння трактора та причепа, виходить залежність (рис. 2) зміни загального уповільнення поїзда від коефіцієнта зчеплення.

Звідси, за наявності гальм лише на задніх колесах причепа, уповільнення тракторного поїзда, що дорівнює $4,4 \text{ м/с}^2$, отримати неможливо. При гальмах тільки на передніх колесах причепа вказане уповільнення може бути отримане на дорозі з коефіцієнтом зчеплення $\varphi \approx 0,7$ за умови, якщо задні колеса трактора та передні колеса причепа будуть заблоковані.

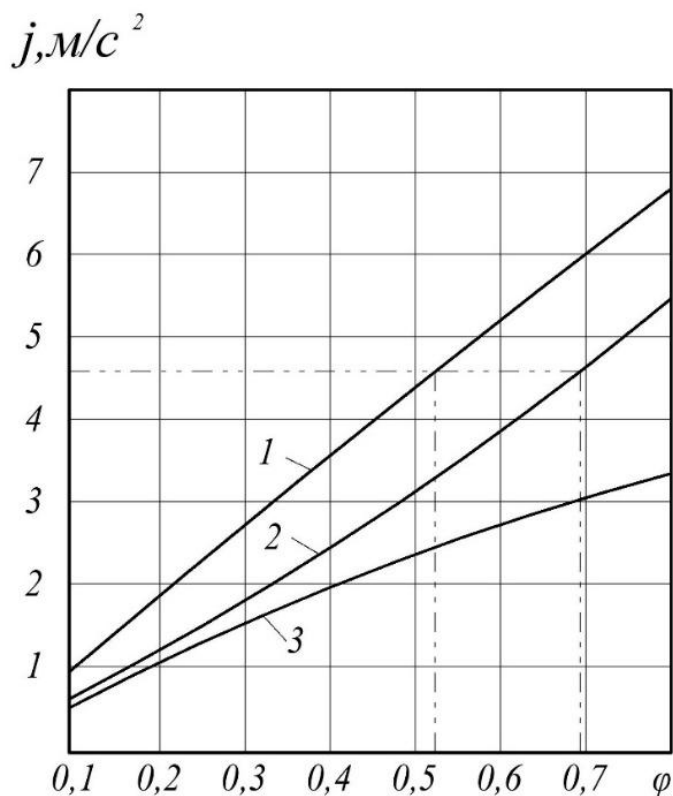


Рис. 2 – Графік $j = f(\varphi)$ тракторного поїзда з гальмами на колесах:
1 – на всіх колесах; 2 – на передніх.

Блокування задніх коліс трактора та коліс причепа проводити неприпустимо з метою збереження стійкості поїзда проти занесення. Крім того, за наявності тільки передніх гальм причепа не можна отримати мінімальний гальмівний шлях тракторного поїзда на дорогах з $\varphi < 0,7$.

Усе це свідчить про те, що тракторний причіп має бути обладнаний гальмами всіх колес; при цьому гальма причепа повинні розвивати уповільнення, що дорівнює не менше $5,5 \text{ м/с}^2$.

При гальмуванні поїзда з причепом, що має гальма на всіх колесах, уповільнення $4,4 \text{ м/с}^2$ досягається на дорозі з $\varphi = 0,5$; у цьому уповільненні причепа дорівнює $5,0 \text{ м/с}^2$, а уповільнення трактора – $3,0 \text{ м/с}^2$ при блокуванні задніх колес. При такому співвідношенні гальмівних сил ланок поїзда забезпечується більш ефективно загальмовування причепа по відношенню до трактора та зберігається стійкий рух поїзда на дорогах з φ від 0,1 до 0,8.

Враховуючи, що при зміні навантаження на причіп гальмівні сили, що відповідають зчіпним терезам, змінюються в кілька разів, бажано регулювати величину тиску в робочих апаратах гальм або режимним краном, або регулятором тиску, що працює в залежності від зміни навантаження на осях причепа [21-25].

Слід зупинитися на значеннях мінімальних гальмівних шляхів тракторного поїзда (які також регламентовані в документах галузі) за різних варіантів обладнання гальмами осей причепа і залежно від коефіцієнта зчеплення.

Мінімальний гальмівний шлях тракторного поїзда визначається за формулою

$$S = v_0 t_1 - \frac{j_{\max}}{6} t_1^2 + \frac{v_1^2}{2 j_{\max}} \quad (8)$$

де v_0 – початкова швидкість гальмування; v_1 – швидкість на початку гальмування, що встановилося; t_1 – час спрацювання приводу гальм; $j_{\max}$ – уповільнення при гальмуванні, що встановилося.

Як було показано, необхідне уповільнення тракторного поїзда ($4,4 \text{ м/с}^2$) досягається тоді, коли гальма причепа розвивають уповільнення близько $5,5 \text{ м/с}^2$, тобто. е. коли всі колеса причепа будуть заблоковані на дорозі з $\varphi \approx 0,55$. Гальмівний шлях при цьому (зі швидкості 30 км/год) дорівнює $S = 10,0 \text{ м}$, що відповідає вимогам.

При обладнанні причепа гальмами тільки на передніх колесах гальмівний шлях тракторного поїзда зі швидкості 30 км/год становитиме $S=13,3 \text{ м}$, а з гальмами тільки на задніх колесах гальмівний шлях становитиме $S=16,8 \text{ м}$ при повному використанні зчіпної ваги колесами гальмівних осей поїзда на дорозі з $\varphi \approx 0,55$.

При обладнанні причепа тільки передніми або задніми гальмами не забезпечується необхідний мінімальний гальмівний шлях тракторного поїзда, який повинен дорівнювати 10 м .

Наведені розрахункові дані гальмівних колій підтверджують результати випробувань тракторного поїзда у складі трактора Deutz-Fahr Agrolux 55 та причепа Metal-Fach T711/2 (з повним навантаженням) під час гальмування на бетонній дорозі.

Таблиця 1 - Результати вимірів гальмівних шляхів та уповільнення

Гальмування тракторів								
Всіма вісями причепа			Передньою віссю причепа			Задньою віссю причепа		
v_0 , км/год	S , м	j , м/с^2	v_0 , км/год	S , м	j , м/с^2	v_0 , км/год	S , м	j , м/с^2
29,0	8,5	6	30	9,8	4,1	30,5	14,5	2,7
30	9	5,7	31,5	11	4,1	30	14	2,8
30,5	9,5	5,1	30	10,5	4	31	15	2,6
30	9,2	5,4	31	11	3,9	30	14,5	2,5
29,5	8,3	5,5	30,5	11,5	4	30	14,5	2,6
20	5	5,4	20,5	5,5	3,4	19	6,5	2,5
21	5,5	5,2	21	6	3,8	20,5	7	2,5
20,5	4,8	5,6	21	5,6	4	20,5	7	2,5

Найменші порівняно з розрахунковими значення мінімальних гальмівних шляхів, отримані при випробуваннях, досягнуті за рахунок малого часу спрацьовування пневматичного приводу гальм ($0,4 \text{ с}$) та кращого використання зчіпної ваги гальмівних осей на бетонній дорозі.

Загальмовування тракторного поїзда спочатку гальмами причепа, а потім гальмами трактора дозволяє виключити наїзд причепа на трактор, занесення та складання ланок поїзда, уникнути впливу на стійкість поїзда таких факторів, як блокування задніх коліс трактора, нерівномірність дії гальм по сторонах, особливо передніх гальм [19, 27].

Стан стійкого руху при різкому гальмуванні, коли гальма трактора і причепа включаються практично одночасно (темп натискання на педаль $0,2 \text{ с}$) забезпечується малим часом спрацьовування пневматичного приводу гальм причепа ($0,4 \text{ с}$) і більшою ефективністю дії гальм причепа.

Висновки.

Виходячи з викладеного слідує, що забезпечення безпеки руху тракторного поїзда при гальмуванні повністю залежить від ефективної та функціональної дії гальмівної системи трактора та причепів.

Гальмівна система тракторного поїзда повинна відповідати таким вимогам:

- гальмівними механізмами мають бути обладнані всі осі причепів;
- ефективність гальмування причепа повинна відповідати повному використанню зчіпної ваги навантаженого причепа на дорозі з $\varphi \geq 0,55$;
- керування робочою гальмівною системою поїзда повинно проводитись єдиним органом управління;

- увімкнення гальм трактора повинно здійснюватися після увімкнення гальм причепів;
- при включенні гальма стоянки трактора повинно бути забезпечене також включення робочих гальм причепів;
- привід гальм причепів повинен мати менший час спрацьовування порівняно з приводом гальм трактора;
- найбільш працездатним та надійним приводом гальм для тракторних поїздів є пневматичний привід.

Список літератури:

1. Nastasoiu, M., & Ispas, N. (2014). Comparative analysis into the tractor-trailer braking dynamics. Open Engineering. De Gruyter. pp. 142–147.
2. Zhao, H. et al. (2019). Modelling and Dynamic Tracking Control of Industrial Vehicles with Tractor-trailer Structure. arXiv preprint. Cornell University.
3. Kayacan, E. et al. (2021). Trajectory Control of an Autonomous Tractor Using Type-2 Fuzzy Logic Controllers. arXiv preprint. Cornell University.
4. Bridgestone Europe (2021). Your tractor tyres play a key role for braking safely. Bridgestone Agriculture Blog. Bridgestone.
5. Tarigan, E. et al. (2016). Tractor-trailer stability during braking. International Journal of Automotive and Mechanical Engineering. UTHM. pp. 2345–2352.
6. Wang, J. et al. (2013). Brake Force Distribution in Tractor-Trailer Vehicles. SAE Technical Paper. SAE International.
7. Scholz, M. et al. (2009). Anti-lock Braking Systems for Agricultural Tractors. Biosystems Engineering. Elsevier. pp. 65–74.
8. Crolla, D. (2001). Vehicle Dynamics and Control for Tractor Units. Vehicle System Dynamics. Taylor & Francis. pp. 225–239.
9. Wang, P., & Li, M. (2017). Optimal Braking Force Distribution for Tractor Units. International Journal of Heavy Vehicle Systems. Inderscience. pp. 111–121.
10. Bekker, M. G. (1969). The braking behavior of off-road vehicles. Journal of Terramechanics. Elsevier. pp. 101–113.
11. Luo, Y. et al. (2022). Simulated braking performance for agricultural combinations on slopes. Computers and Electronics in Agriculture. Elsevier. pp. 210–218.
12. Chen, C., & Huang, H. (2020). The dynamic behavior of tractor semi-trailers during emergency braking. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. Taylor & Francis. pp. 97–109.
13. Liu, X. et al. (2012). Brake system performance for articulated tractors. International Agricultural Engineering Journal. CIGR. pp. 33–40.
14. Sakai, M. (2008). Brake control systems for large agricultural machines. Journal of Field Robotics. Wiley. pp. 300–312.
15. Singh, K. et al. (2010). Safety and control in off-road tractor operations. Journal of Safety Research. Elsevier. pp. 84–91.
16. І.В. Колеснік, І.О. Шевченко, Ю.І. Колеснік Аналіз впливу факторів на ефективність гальмування тракторно-транспортного поїзду. Вісник НТУ «ХПІ». Серія Автомобіле- та тракторобудування. 2023, №1, С. 91-97. <https://doi.org/10.20998/2078-6840.2023.1.10>.
17. І.В. Колеснік, Є.І. Калінін, Ю.І. Колеснік, І.О. Шевченко Теоретичні основи ефективності використання транспортного агрегату. Вісник НТУ «ХПІ». Серія Автомобіле- та тракторобудування. 2023, №2, С. 70-79. <https://doi.org/10.20998/2078-6840.2023.2.08>.
18. І.В. Колеснік, Є.І. Калінін, Ю.І. Колеснік, О.В. Панкова Енергетичний баланс тракторно-транспортного поїзда. Вісник НТУ «ХПІ». Серія Автомобіле- та тракторобудування. 2024, №2, С. 125-130. <https://doi.org/10.20998/2078-6840.2024.2.13>.
19. Koliesnik I., Kalinin, E., Koliesnik, J. (2024). Influence of the type of tractional coupling device on the redistribution of braking torques when the operational and design factors of the trailer change // Науковий журнал. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2024. Issue №:3 (126), P. 65-74. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2024-3-7>.
20. Оцінка стійкості руху колісного напівначіпного агрегату / Є. І. Калінін, С. А. Лебедев, А. П. Кожушко, І. В. Колеснік // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Автомобіле- та тракторобудування / Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser. : Automobile and Tractor Construction : зб. наук. пр. – Харків: НТУ "ХПІ", 2022. № 2. С. 3-12. <https://doi.org/10.20998/2078-6840.2022.2.01>.
21. Kalinin E. Optimization of machinery operation modes from the point of view of their dynamics / Evgeniy Kalinin, Mykhailo Shuliak, Ivan Koliesnik // Proceedings of ICCPT 2019, May 28-29, 2019. — Tern. : TNTU, Scientific Publishing House “SciView”, 2019. — P. 211–222.
22. Шуляк М. Л. Оцінка функціонування сільськогосподарського агрегату за динамічними критеріями / М. Л. Шуляк, А. Т. Лебедев, М. П. Артьомов, Є. І. Калінін // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. - 2016. - № 4. - С. 218-226.

23. Shulyak M.L. Експериментальне дослідження алгоритму керування режимами роботи транспортного агрегату / M.L. Shulyak, Lebedev A.T., Artyomov N.P., Maltsev V.P. // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2017. – Т. 3 (43). – С. 38-42.
24. Koliesnik I., Kalinin, E., Koliesnik, J., Pankova O., Shutko V. (2024). Dynamics of braking of the transport and technological train. International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics (IJOMAM) - 2024, Issue 18, P. 148-156. <https://doi.org/10.17683/ijomam/issue18.17>.
25. Koliesnik, E. Kalinin, I. Shevchenko, Ju. Koliesnik, O. Stepanov Conceptual Energy Model of the Dynamics of a Transport-Technological Unit for the Appearance of Two Drive Axles. Lecture Notes in Networks and Systems. 4th International Conference on Reliable Systems Engineering, ICoRSE 2024. Volume 1129 LNNS, 2024, Pages 314 – 327, https://doi.org/10.1007/978-3-031-70670-7_27.
26. ДСТУ UN/ECE R 13-09:2002 Єдині технічні приписи щодо офіційного затвердження дорожніх транспортних засобів категорій M, N, і O стосовно гальмування (Правила ЕЭК ООН № 13-09:2000, IDT).
27. Felez J., Lopez-Mendez A. Advanced steering stability controls for articulated vehicles by using bond graphs and model predictive control. Simulation Series 53, №3, 2021. International Conference on Bond Graph Modeling and Simulation, ICBGM 2021. San Diego, 10 November 2021. P. 98 – 110.

References (transliterated):

1. Nastasoiu, M., & Ispas, N. (2014). Comparative analysis into the tractor-trailer braking dynamics. Open Engineering. De Gruyter. pp. 142–147.
2. Zhao, H. et al. (2019). Modelling and Dynamic Tracking Control of Industrial Vehicles with Tractor-trailer Structure. arXiv preprint. Cornell University.
3. Kayacan, E. et al. (2021). Trajectory Control of an Autonomous Tractor Using Type-2 Fuzzy Logic Controllers. arXiv preprint. Cornell University.
4. Bridgestone Europe (2021). Your tractor tyres play a key role for braking safely. Bridgestone Agriculture Blog. Bridgestone.
5. Tarigan, E. et al. (2016). Tractor-trailer stability during braking. International Journal of Automotive and Mechanical Engineering. UTHM. pp. 2345–2352.
6. Wang, J. et al. (2013). Brake Force Distribution in Tractor-Trailer Vehicles. SAE Technical Paper. SAE International.
7. Scholz, M. et al. (2009). Anti-lock Braking Systems for Agricultural Tractors. Biosystems Engineering. Elsevier. pp. 65–74.
8. Crolla, D. (2001). Vehicle Dynamics and Control for Tractor Units. Vehicle System Dynamics. Taylor & Francis. pp. 225–239.
9. Wang, P., & Li, M. (2017). Optimal Braking Force Distribution for Tractor Units. International Journal of Heavy Vehicle Systems. Inderscience. pp. 111–121.
10. Bekker, M. G. (1969). The braking behavior of off-road vehicles. Journal of Terramechanics. Elsevier. pp. 101–113.
11. Luo, Y. et al. (2022). Simulated braking performance for agricultural combinations on slopes. Computers and Electronics in Agriculture. Elsevier. pp. 210–218.
12. Chen, C., & Huang, H. (2020). The dynamic behavior of tractor semi-trailers during emergency braking. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. Taylor & Francis. pp. 97–109.
13. Liu, X. et al. (2012). Brake system performance for articulated tractors. International Agricultural Engineering Journal. CIGR. pp. 33–40.
14. Sakai, M. (2008). Brake control systems for large agricultural machines. Journal of Field Robotics. Wiley. pp. 300–312.
15. Singh, K. et al. (2010). Safety and control in off-road tractor operations. Journal of Safety Research. Elsevier. pp. 84–91.
16. I.V. Koliesnik, I.O. Shevchenko, Yu.I. Koliesnik Analiz vplyvu faktoriv na efektyvnist halmuvannia traktorno-transportnoho poizdu. Visnyk NTU «KhPI». Seriiia Avtomobile- ta traktorobuduvannia. 2023, №1, S. 91-97. <https://doi.org/10.20998/2078-6840.2023.1.10>.
17. I.V. Koliesnik, Ye.I. Kalinin, Yu.I. Koliesnik, I.O. Shevchenko Teoretychni osnovy efektyvnosti vykorystannia transportnoho ahrehatu. Visnyk NTU «KhPI». Seriiia Avtomobile- ta traktorobuduvannia. 2023, №2, S. 70-79. <https://doi.org/10.20998/2078-6840.2023.2.08>.
18. I.V. Koliesnik, Ye.I. Kalinin, Yu.I. Koliesnik, O.V. Pankova Enerhetychnyi balans traktorno-transportnoho poizda. Visnyk NTU «KhPI». Seriiia Avtomobile- ta traktorobuduvannia. 2024, №2, S. 125-130. <https://doi.org/10.20998/2078-6840.2024.2.13>.
19. Koliesnik I., Kalinin, E., Koliesnik, J. (2024). Influence of the type of tractional coupling device on the redistribution of braking torques when the operational and design factors of the trailer change // Naukovyi zhurnal. Tekhnika, enerhetyka, transport APK. 2024. Issue №:3 (126), R. 65-74. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2024-3-7>.
20. Otsinka stiiokosti rukhu kolisnoho napivnachipnoho ahrehatu / Ye. I. Kalinin, S. A. Lebediev, A. P. Kozhushko, I. V. Koliesnik // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Ser. : Avtomobile- ta traktorobuduvannia / Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser. : Automobile and Tractor Construction : zb. nauk. pr. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2022. № 2. S. 3-12. <https://doi.org/10.20998/2078-6840.2022.2.01>.

21. Kalinin E. Optimization of machinery operation modes from the point of view of their dynamics / Evgeniy Kalinin, Mykhailo Shuliak, Ivan Koliesnik // Proceedings of ICCPT 2019, May 28-29, 2019. — Tern. : TNTU, Scientific Publishing House “SciView”, 2019. — P. 211–222.
22. Shuliak M. L. Otsinka funktsionuvannya silskohospodarskoho ahrehatu za dynamichnymy kryteriiamy / M. L. Shuliak, A. T. Lebediev, M. P. Artomov, Ye. I. Kalinin // Tekhnichniy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv. - 2016. - № 4. - S. 218-226.
23. Shulyak M.L. Eksperymentalne doslidzhennia alhorytmu keruvannya rezhymamy roboty transportnoho ahrehatu / M.L. Shulyak, Lebedev A.T., Artyomov N.R., Maltsev V.R. // Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku. Zbirnyk naukovykh prats. – Poltava: PNTU, 2017. – T. 3 (43). – S. 38-42.
24. Koliesnik I., Kalinin, E., Koliesnik, J., Pankova O., Shutko V. (2024). Dynamics of braking of the transport and technological train. International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics (IJOMAM) - 2024, Issue 18, P. 148-156. <https://doi.org/10.17683/ijomam/issue18.17>.
25. Koliesnik, E. Kalinin, I. Shevchenko, Ju. Koliesnik, O. Stepanov Conceptual Energy Model of the Dynamics of a Transport-Technological Unit for the Appearance of Two Drive Axles. Lecture Notes in Networks and Systems. 4th International Conference on Reliable Systems Engineering, ICoRSE 2024. Volume 1129 LNNS, 2024, Pages 314 – 327, https://doi.org/10.1007/978-3-031-70670-7_27.
26. DSTU UN/ECE R 13-09-2002 Yedyni tekhnichni prypysy shchodo ofitsiinoho zatverdzhennia dorozhnykh transportnykh zasobiv katehorii M, N, i O stosovno halmuvannia (Pravyla EЭК OON № 13-09:2000, IDT).
27. Felez J., Lopez-Mendez A. Advanced steering stability controls for articulated vehicles by using bond graphs and model predictive control. Simulation Series 53, №3, 2021. International Conference on Bond Graph Modeling and Simulation, ICBGM 2021. San Diego, 10 November 2021. R. 98 – 110.

Надійшла (received): 27.04.2025 р.

Відомості про авторів / About the Authors

Колеснік Юліана Ігорівна (Yuliana Koliesnik) – Державний біотехнологічний університет, аспірант кафедри тракторів і автомобілів, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9915-2455>; e-mail: julianakolesnik26@gmail.com