

МЕТОДОЛОГІЯ ОЦІНЮВАННЯ ТЯГОВИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТРАКТОРА ЗА НЕСТАБІЛЬНОЇ ЗЧІПНОЇ ВАГИ

Лебедєв А., д-р техн. наук, проф.,
<https://orcid.org/0000-0002-1975-3323>

e-mail: tiaxntusg@gmail.com,

Лебедєв С., канд. техн. наук,
<https://orcid.org/0000-0002-3067-5135>

e-mail: hfukrndipvt@gmail.com,

Коробко А., канд. техн. наук, доц.,
<https://orcid.org/0000-0002-6618-7790>

e-mail: ak82andrey@gmail.com,

Харківська філія УкрНДІПВТ імені Леоніда Погорілого

Анотація

Мета дослідження полягає у підвищенні ефективності використання зчіпної ваги трактора в тяговому режимі шляхом зниження нерівномірності розподілу вертикальних реакцій між колесами.

Методи дослідження. Методологічною основою роботи є узагальнення та аналіз відомих наукових результатів відносно теорії трактора в тяговому режимі. Для формування наукової проблеми, визначення мети і постановки завдань дослідження використовувалися аналітичний метод і порівняльний аналіз. Для створення емпіричних моделей трактора використано основні положення теорії ймовірностей.

Результати дослідження. Сформульовано основні положення методології оцінювання тягових властивостей трактора при нестабільності зчіпної ваги. Обґрунтовано метод оцінювання вертикальних реакцій на колеса трактора, який базується на вимірюванні вертикальної реакції на одному з чотирьох коліс. Доведено, що найбільшу ймовірність рівного розподілу вертикальних реакцій між колесами однієї осі мають трактори зі зміщенням до передньої або задньої осей центру мас, найменшу – трактори з центром мас посередині між осями. Теоретично обґрунтовано й експериментально підтверджено, що у ході виконання трактором орних робіт при нерівномірному розподілі навантажень на борті забезпечується його робота з максимальним тяговим ККД за заблокування ведучих передньому і задньому мосту.

Висновок. Обґрунтовано методологію оцінювання впливу положення центру мас трактора на його тягові властивості. Відкритим залишається питання оцінювання впливу центру мас трактора на його тягові властивості при агрегуванні з навісними, причіпними та комбінованими сільгосп-машинами.

Ключові слова: трактор, тягові властивості, зчіпна вага, центр мас, вертикальні реакції, ведучі мости, блокування.

Вступ. Класичний підхід до трактора як до об'єкта проектування і управління полягає в уявленні про нього як про тяглову машину, що володіє одним зв'язком із зовнішнім середовищем (ходова система) [Тракторы, 1991; Zoz & Grisso, 2003]. Таке уявлення зумовлює постановку завдань оптимізації властивостей трактора: тягове зусилля та коефіцієнт корисної дії (ККД), опір руху, навантаження на осях тощо. Ці параметри тракторів визначаються при їхніх випробуваннях у лабораторіях NTTL [Test ..., 2022] Сполучених Штатів Америки та Німеччини [DLG, 2023].

Дослідженню тягових властивостей тракторів присвячено ряд робіт [Лебедев, Коробко, 2020; Ярошенко, 2020; Шевченко, 2021; Лебедев та ін., 2022]. У цих роботах проаналізовано методи та засоби оцінки тягових властивостей трактора. Обґрунтовано, що найбільш перспективним методом оцінки тягово-швидкісних властивостей трактора є спосіб, заснований на вимірюванні його прискорень при русі на гоні. Також проведені дослідження впливу баластування на тягові властивості трактора та проводяться дослідження тягових властивостей трактора в складі сільськогосподарського агрегату змінної маси.

Під час роботи трактора в тяговому режимі його зв'язок із ґрунтом здійснюється за двома каналами (ходова система, робоче знаряддя), які призводять до нестабільності сили тяги трактора і опору сільгоспмашини, що агрегатується [Рєбров та ін., 2021; Лебедев та ін., 2022]. При цьому припускається, що реакції між колесами переднього і заднього мостів розподіляються рівномірно, хоча внаслідок різного опору коченню коліс, наприклад, під час виконання трактором одних робіт, реакції між колесами розподілені нерівномірно [Лебедев та ін., 2003]. Рух трактора під час виконання технологічного процесу зумовлює виникнення позовжніх, бічних і вертикальних коливань підресорених і невідресорених мас та коліс трактора. Поздовжні і бічні коливання трактора призводять до підвищення ди-

намічної напруженості ґрунту внаслідок буксування, юзу рушіїв, знижуючи його силу тяги, а вертикальні коливання є основною причиною динамічного ущільнення ґрунту [Лебедев та ін., 2018]. При цьому відзначається нерівномірний розподіл вертикальних реакцій між колесами трактора, що впливають на ефективність використання його зчіпної ваги у тяговому режимі [Александров та ін., 2001]. Суттєва особливість руху трактора у тяговому режимі не отримала належного висвітлення в технічній літературі під час оцінювання його опорно-зчіпних властивостей [Лебедев, 2014].

Вирішення проблеми дослідження динаміки трактора та впливу центру мас мобільної машини відображено в ряді робіт закордонних видань [Donnell, 2001; Fluck, 2014; Leite et al., 2017; Md-Tahir et al., 2019; 2021; 2023; Ovsyannikov et al., 2018], де відзначається перспективність досліджень у напрямку роботи машини в тяговому режимі. Пропонується визначати оцінку енергетичних параметрів машини на основі диференціації її маси.

Постановка завдань. Практика ставить перед наукою необхідність вирішення проблеми розробки методології оцінювання нерівномірності розподілу вертикальних реакцій між колесами трактора у тяговому режимі. Метою дослідження є підвищення ефективності використання зчіпної ваги трактора у тяговому режимі шляхом зниження нерівномірності розподілу вертикальних реакцій між колесами. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання дослідження:

- обґрунтувати залежність тягових властивостей трактора від використання зчіпної ваги ведучих мостів;
- оцінити розподіл вертикальних реакцій між колесами одного ведучого моста трактора;
- обґрунтувати зону найбільш ймовірного зниження використання зчіпної ваги повнопривідного трактора.

Методи і матеріали. Методологічною основою роботи є узагальнення та аналіз відомих наукових результатів відносно те-

орії трактора у тяговому режимі. Для формування наукової проблеми, визначення мети і постановки завдань дослідження використовувався аналітичний метод та порівняльний аналіз. Під час створення емпіричних моделей трактора використано основні положення теорії ймовірностей. Експериментальні дослідження виконано методом парціальних прискорень [Артемів, 2012; СОУ-П, 2015].

Вихідними даними вважатимемо такі: трактор знаходиться на рівній горизонтальній поверхні та рухається з постійною швидкістю з вимкненим валом відбору потужності (ВВП) (рис. 1). Тяговий ККД трактора може бути виражений рівнянням [Тракторы, 1991]:

$$\eta_T = \frac{N_T}{N_e} = \frac{P_{кр} \nu_d}{M_d n_d} \frac{716,2}{270} = 2,65 \frac{P_{кр} \nu_d}{M_d n_d}, \quad (1)$$

де N_T – тягова потужність трактора, кВт;

N_e – ефективна потужність двигуна, кВт;

$P_{кр}$ – сила тяги на гаку, кН;

ν_d – дійсна швидкість руху, км/год.;

M_d – крутний момент двигуна, кН·м;

n_d – частота обертання колінчастого валу двигуна, хв⁻¹.

Виразимо сили тяги на гаку і дійсну швидкість руху, що входять у вираз (1) для тягового ККД трактора, функціями безрозмірних коефіцієнтів використання зчипної ваги ведучих мостів:

$$\varphi_{1,2} = \frac{P_{к1,2}}{Y_{1,2}}, \quad (2)$$

де $P_{к1,2}$ – дотична сила тяги ведучого мосту;

$Y_{1,2}$ – реакція ґрунту, що чисельно дорівнює зчипній вазі трактора, що припадає на ведучий міст ($Y_{1,2} = G_{1,2}$).

У виразі (2) і далі індекс «1» відноситься до переднього, а індекс «2» – до заднього мостів.

Для отримання залежності $P_{кр} = f(\varphi_1, \varphi_2)$ виразимо

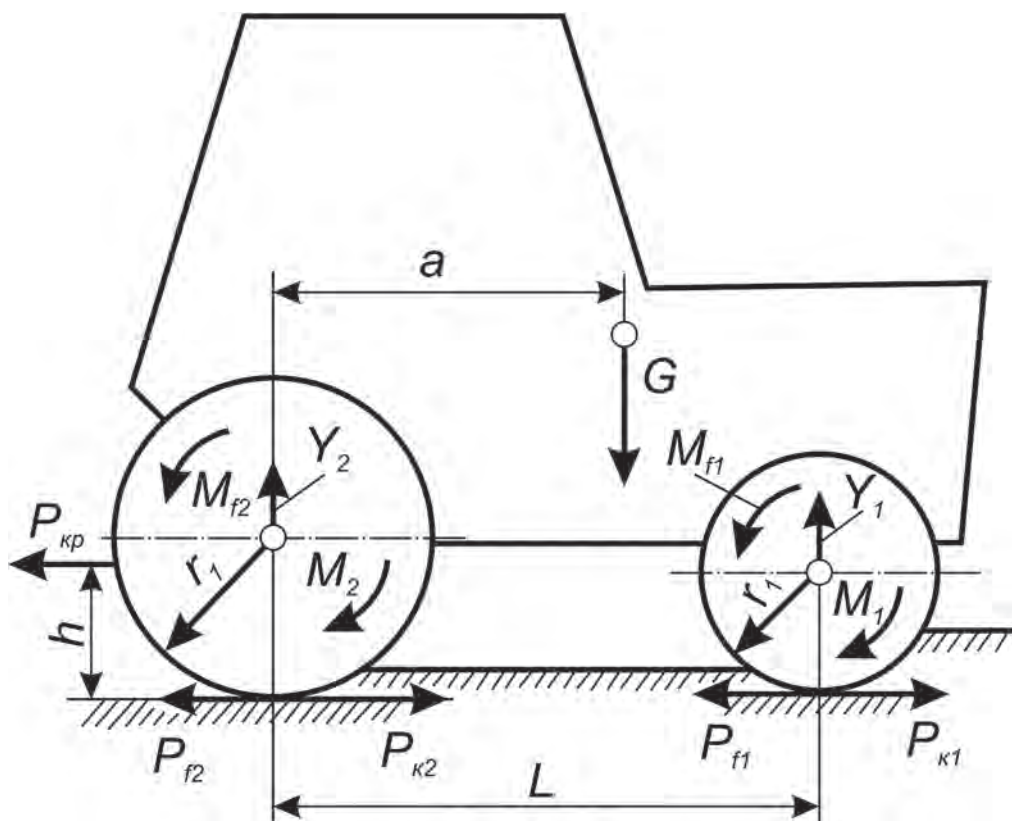


Рисунок 1 – Схема сил, що діють на трактор

$$P_{кр} = P_{кр1} + P_{кр2} - P_{f1} - P_{f2};$$

$$P_{кр1} = G_{1,2} \varphi_{1,2};$$

$$P_{f1,2} = G_{1,2} f_{1,2},$$

де $P_{f1,2}$ – сила опору перекочуванню ведучих мостів;

$f_{1,2}$ – коефіцієнт опору перекочуванню ведучих мостів.

З урахуванням перерозподілу зчіпної ваги залежно від сили тяги отримаємо:

$$P_{кр} = \frac{G[A_1(\varphi_1 - f_1) + A_2(\varphi_2 - f_2)]}{A_3 + h(\varphi_1 - \varphi_2)}, \quad (3)$$

де $A_1 = a - f_2 r_2$; $A_2 = L - a - f_1 r_1$;

$A_3 = L - h(\varphi_1 - f_2) + f_1 r_1 - f_2 r_2$;

G – вага трактора, Н;

L – поздовжня база трактора, мм;

h – висота точки причепа, мм;

r_1, r_2 – радіуси кочення коліс.

Результати. Опорно-зчіпні властивості трактора залежать, в основному, від його експлуатаційної ваги G_e , перетворення якої у тягове зусилля $P_{кр}$ оцінюється коефіцієнтом використання зчіпної ваги $\varphi_{кр} = P_{кр} / G_e$. Під час руху колісного трактора рівним агрофоном за коефіцієн-

ту зчеплення ведучих коліс із ґрунтом $\varphi_{зч}$, опору коченню f і частки ваги, що доводиться на ведучі колеса λ_k , опорно-зчіпні властивості трактора з одним ведучим мостом оцінюється за залежністю $\varphi_{кр} = \varphi_{зч} \lambda_k - f$, для повнопривідних тракторів – $\varphi_{кр} = \varphi_{зч} - f$. Аналіз $\varphi_{кр}$ тракторів з одним ведучим мостом і повнопривідного засвідчує, що чим більший коефіцієнт зчеплення порівняно з коефіцієнтом опору коченню, тим більшим запасом тягового зусилля володіє трактор.

В умовах експлуатації тягове зусилля трактора змінюється від нуля до максимального значення $P_{кр} = P_{кр \max}$, що визначається зчіпними властивостями за $G_e = \text{const}$.

Отже, і коефіцієнт $\varphi_{кр}$ змінюється від нуля до $\varphi_{кр \max}$. Номінальному тяговому зусиллю відповідає певне значення $\varphi_{кр \text{ н}}$. Це твердження підтверджене під час руху у тяговому режимі трактора «John Deere 8335 R», що є затребуваним на ринку України [Лебедев, 2014].

Порівняння значень навантажень, що діють на передні $u_п$ і задні $u_з$ колеса трактора показують, що вони не залишаються постійними (рис. 2).

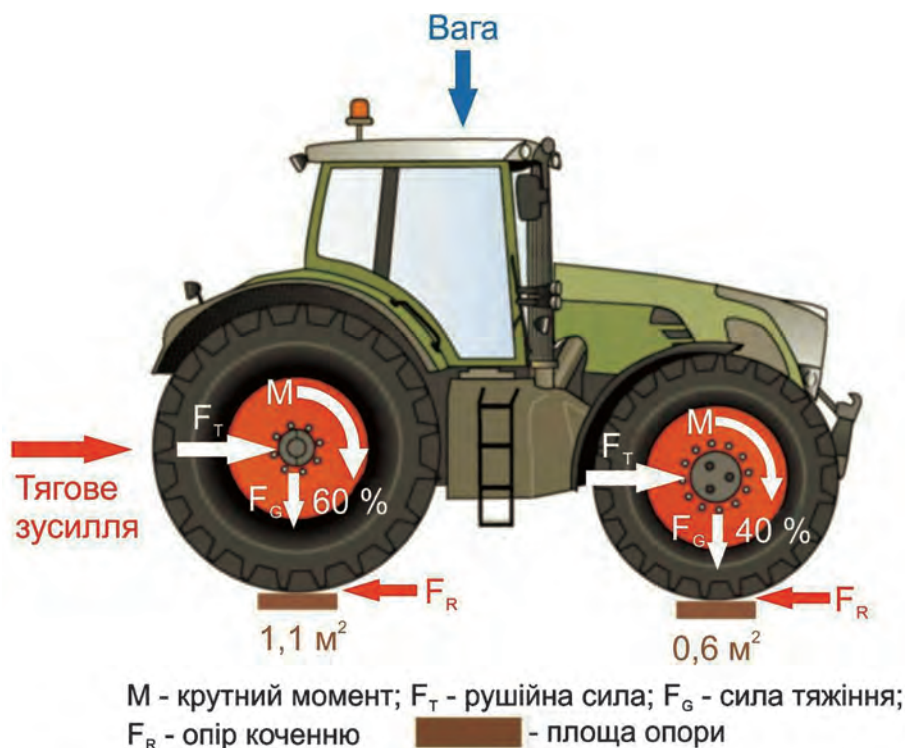


Рисунок 2 – Схема розподілу навантажень за осями, що діють на трактор «John Deere 8335 R» у тяговому режимі

Якщо лінія тягового опору паралельна поверхні шляху, то зміна навантажень y_{Π} і y_3 відбувається в результаті перерозподілу ваги трактора між передніми та задніми колесами. Зниження навантаження на передні колеса викликають таке ж збільшення навантаження на задні колеса та навпаки. Сума $y_{\Pi} + y_3$ дорівнює вазі трактора G_T . Нестабільність y_{Π} і y_3 призводить до нерівномірного розподілу вертикальних реакцій між колесами трактора, зниження ефективності використання його зчіпної ваги у тяговому режимі. При цьому, навіть за умови знаходження центру мас трактора строго у поздовжній площині симетрії, можлива нерівність вертикальних реакцій на лівому і правому колесах однієї вісі. Це обумовлено статичною невизначеністю чотириколісного трактора як просторової конструкції, що має чотири опори (зв'язки) і, відповідно, чотири вертикальних реакції зв'язку. Методологія рішення цього завдання базується на взаємозв'язку безрозмірних (питомих) сил на колесах трактора:

$$\begin{aligned} \gamma_{zi} &= R_{z1} / G \\ \gamma_{z2} &= b / L - \gamma_{zi} \\ \gamma_{z3} &= 0,5 - \gamma_{zi} \\ \gamma_{z4} &= \frac{a}{L} - 0,5 + \gamma_{zi} \end{aligned} \quad , \quad (4)$$

де R_{z1} – вертикальна реакція на передньому колесі;

G – вага трактора;

a, b, L – відстані від проекції центру мас на горизонтальну площину до передньої і задньої осей відповідно, поздовжня колісна база трактора.

Вимірявши вертикальну реакцію на одному з чотирьох коліс трактора, можна точно визначити вертикальні реакції на останніх трьох. На етапі проектування трактора доцільно задати вертикальну реакцію на одному із коліс як випадкову величину, розподіл якої підпорядковується нормальному закону. Припустимо, що такою незалежною випадковою величиною буде γ_{z2} , зміни якої теоретично можливі у

межах $[0, b/L]$. Зі зменшенням γ_{zi} відбувається зменшення і γ_{z4} , яке не може набути від'ємних значень, оскільки це призводить до порушення рівноваги системи.

Таким чином, за $\gamma_{zi} = 0$ має виконуватися умова:

$$\gamma_{z4 \min} = \frac{a}{L - 0,5} \geq 0 \quad \text{або} \quad b/L \leq 0,5, \quad (5)$$

Отже, за $b/L \leq 0$ величина γ_{zi} може змінюватися у межах:

$$\frac{b}{L} - 0,5 \leq \gamma_{zi} \leq 0,5, \quad (6)$$

За нормального закону розподілу вертикальних реакцій на колесах трактора щільність розподілу питомого навантаження на одне переднє колесо оцінюється за рівнянням (7):

$$f(\gamma_{zi}) = \begin{cases} \frac{2,394}{b/L} \mu_{\sigma} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{6}{b/L} \gamma_{zi} - 3 \right)^2 \right] & \text{при } \frac{b}{L} \leq 0,5; \\ \frac{2,394}{1-b/L} \mu_{\sigma} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{6}{1-b/L} \gamma_{zi} - \frac{3b/L}{1-b/L} \right)^2 \right] & \text{при } \frac{b}{L} > 0,5 \end{cases}$$

де μ_{σ} – вибраний масштаб середньоквадратичного відхилення, тобто значення умовно прийняте за одиницю при проведенні аналізу.

На рис. 3 наведені графіки функцій (7) за різних положення центру мас трактора (параметр b/L) з урахуванням можливого діапазону зміни γ_{zi} .

Аналіз результатів розрахунку показує, що найбільшу ймовірність рівного розподілу вертикальних реакцій між колесами однієї вісі мають трактори зі зміщенням до передньої або задньої осей центру мас. Найменшу ймовірність рівного розподілу вертикальних реакцій мають трактори з центром мас, що розташований посередині між осями $b/L=0,5$, а найбільшу – за $b/L=0,9$ та $b/L=0,1$.

Якщо за $b/L=0,1$ дана ймовірність складає 0,4, то за $b/L=0,5$ вона дорівнює 0,1.

Під час роботи трактора у тяговому режимі нерівномірність розподілу вертикальних реакцій призводить до погіршення його тягово-швидкісних характерис-

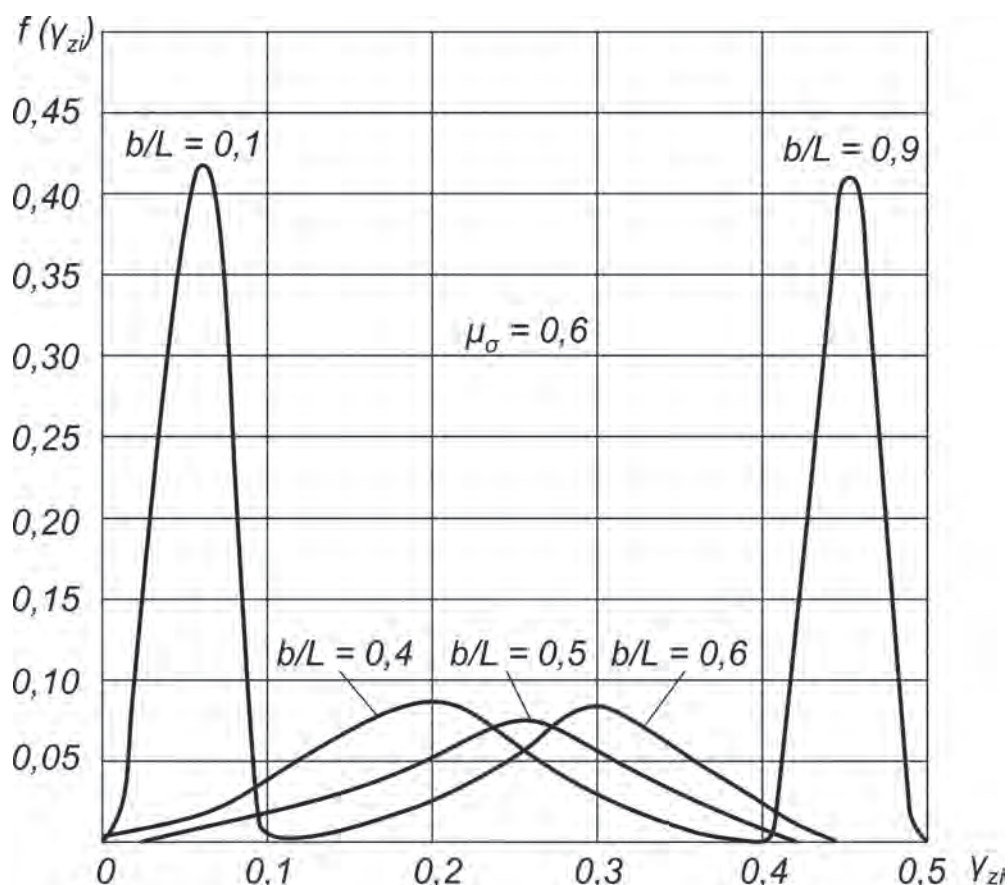


Рисунок 3 – Щільність розподілу питомого навантаження на одне переднє колесо прирізному положенні центру мас трактора

тик, оскільки сумарна дотична сила тяги визначається колесом, що знаходиться у гірших умовах зчеплення. Якщо розглядати питомі вертикальні реакції на колесах (відношення відповідної реакції на j -ому колесі до загальної ваги трактора) з урахуванням їх можливих змін у межах середньоквадратичного відхилення, то залежності для їх розрахунку записуються у вигляді (8):

$$\gamma_{z1} = m_{\gamma1} + \sigma_{\gamma1}; \gamma_{z2} = m_{\gamma2} + \sigma_{\gamma2};$$

$$\gamma_{z3} = m_{\gamma3} + \sigma_{\gamma3}; \gamma_{z4} = m_{\gamma4} + \sigma_{\gamma4};$$

де $m_{\gamma1}$, $m_{\gamma2}$, $m_{\gamma3}$, $m_{\gamma4}$ – математичне очікування питомих вертикальних реакцій на відповідних колесах (1, 2 – передні колеса; 3, 4 – задні колеса; 1, 3 – колеса лівого борту; 2, 4 – колеса правого борту);

$\sigma_{\gamma1}$, $\sigma_{\gamma2}$, $\sigma_{\gamma3}$, $\sigma_{\gamma4}$ – середньоквадратичні відхилення питомих вертикальних реакцій на вказаних колесах.

Вочевидь, що

$$m_{\gamma1} = m_{\gamma2} = \frac{1}{2} \frac{b}{L}; m_{\gamma3} = m_{\gamma4} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{b}{L} \right). \quad (9)$$

За $b/L \leq 0,5$ маємо

$$\sigma_{\gamma} = \sigma_{\gamma1} = \sigma_{\gamma2} = \sigma_{\gamma3} = \sigma_{\gamma4} = \frac{1b}{6L}. \quad (10)$$

За $b/L > 0,5$ визначено

$$\sigma_{\gamma} = \sigma_{\gamma1} = \sigma_{\gamma2} = \sigma_{\gamma3} = \sigma_{\gamma4} = \frac{1}{6} \left(1 - \frac{b}{L} \right). \quad (11)$$

Прискорення, що виникають під час розгону трактора за відсутності буксування коліс, визначається колесом, що знаходиться у гірших умовах зчеплення, тобто тим, що має менше вертикальне навантаження

$$a = g\varphi\varphi_{кр}. \quad (12)$$

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

– коефіцієнт зчеплення коліс з дорогою;

– коефіцієнт використання зчіпної ваги у тяговому режимі для повнопривідного трактора (13)

$$\varphi_{кр} = 2(\gamma_{z2} + \gamma_{z3}) = 2(m_{\gamma 2} + m_{\gamma 3} - 2\sigma_{\gamma}) = \begin{cases} 1 - \frac{2b}{3L} n_{пу} \frac{b}{L} \leq 0,5 \\ \frac{1}{3} - \frac{2b}{3L} n_{пу} \frac{b}{L} > 0,5 \end{cases}$$

На рис. 4 показано графік, що ілюструє залежність $\varphi_{кр}$ від параметру b/L .

Аналіз графіка на рис. 4 показує, що найбільше зниження коефіцієнта зчпної ваги двовісного повнопривідного трактора у тяговому режимі відбувається за $\frac{b}{L} > 0,5$.

Це зниження може досягати 33 %.

За асиметричного прикладення сили тяги на гаку трактора, наприклад сили опору плуга, що характеризується відстанню a від осі трактора до точки прикладання $P_{пл}$ і різному опору коченню P_{fi} коліс, обумовлених різними їх умовами кочення, сила тяги, що необхідна для по-

долання P_{fi} , буде різна для кожного колеса P_{ki} (рис. 5).

Для забезпечення рівномірного прямолінійного руху трактора необхідно виконати умову $P_{ki} = P_{fi} + P_{ki}^n$, де P_{ki}^n – сила тяги, що необхідна для подолання сили опору плуга.

Для даного випадку, дотична сили тяги коліс записуються у виді (14):

$$\left. \begin{aligned} P_{к1} &= P_{пл} \frac{(b/2 - a)}{b} + P_{к3} + \sum (P_{f1,3} + P_{к1,3}^n) \\ P_{к2} &= P_{пл} \frac{(b/2 - a)}{b} + P_{к4} + \sum (P_{f2,4} + P_{к2,4}^n) \\ P_{к3} &= P_{пл} \frac{(b/2 - a)}{b} + P_{к1} + \sum (P_{f1,3} + P_{к1,3}^n) \\ P_{к4} &= P_{пл} \frac{(b/2 - a)}{b} + P_{к2} + \sum (P_{f2,4} + P_{к2,4}^n) \end{aligned} \right\}$$

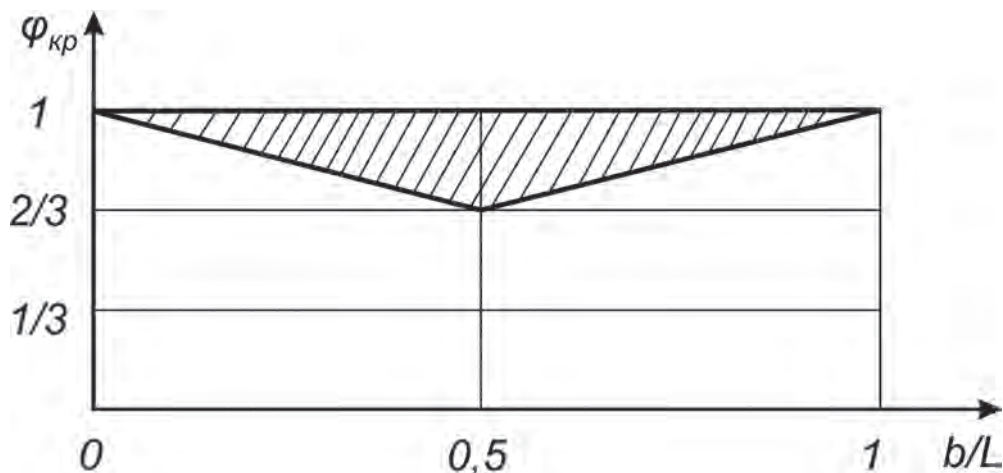


Рисунок 4 – Зона найбільш ймовірних значень зниження коефіцієнта використання зчпної ваги двовісного повнопривідного трактора у тяговому режимі (заштрихована)

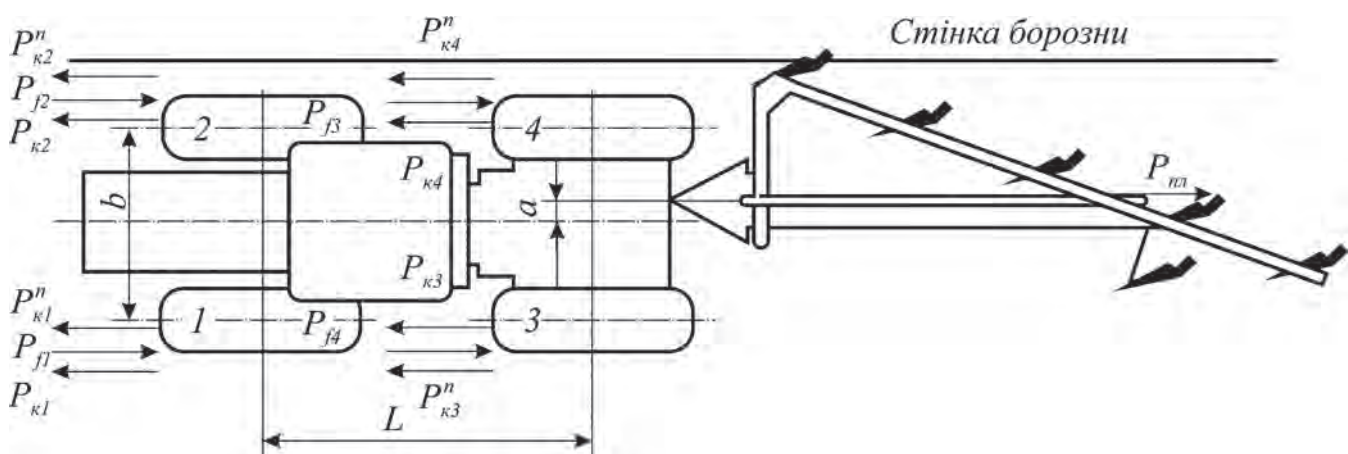


Рисунок 5 – Схема дії сил на колесах трактора на орних роботах

Аналіз даної системи рівнянь показує, що за $P_{f1,3} \neq P_{f2,4}$ обумовлених різними умовами кочення коліс під час виконання трактором орних робіт ($P_{f2} > P_{f4}$, $P_{f1} > P_{f3}$, $P_{f2} > P_{f1}$, $P_{f4} > P_{f3}$) має $P_{k2} > P_{k4}$, $P_{k1} > P_{k3}$, $P_{k2} > P_{k1}$, $P_{k4} > P_{k3}$.

У Харківській філії УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого з метою оцінювання залежності сили тяги трактора від зчіпної ваги за нерівномірного розподілу реакцій між мостами були проведені експериментальні дослідження трактора ХТЗ-17021 агрегатованого плугом ПЛН-5.35. Результати експериментальних досліджень наведені у таблиці 1.

випадку навантаження коліс правого P_{Π}^n і лівого P_{Π}^n бортів трактора яке необхідно для подолання опору плуга, із системи рівнянь (14) записується у виді:

$$\left. \begin{aligned} P_{\Pi}^n &= P_{\Pi} \left(\frac{1}{2} + \frac{a}{b} \right), \\ P_{\Pi}^n &= P_{\Pi} \left(\frac{1}{2} - \frac{a}{b} \right) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Асиметричність приєднання плуга, що характеризується параметром a призводить до більшої навантаженості правого борту трактора порівняно з лівим.

Таблиця 1 – Крутні моменти ($M_{кр}$) на сонячних шестернях колісних редукторів трактора ХТЗ-17021 з плугом ПЛН-5-35 (оранка стерні озимої пшениці на глибину 25-27 см)

у, м	а, м	$M_{кр}$, Нм			
		$M_{кр1}$	$M_{кр2}$	$M_{кр3}$	$M_{кр4}$
0,150	0,36	947	2222	875	2150

у – відстань від краю борозни до зовнішнього краю колеса;
а – асиметричність прикладання тягового навантаження;
 $M_{кр1}$, $M_{кр2}$, $M_{кр3}$, $M_{кр4}$ – крутні моменти на сонячних шестернях колісних редукторів переднього лівого і правого, заднього лівого і правого коліс, відповідно

Аналіз даної таблиці показує, що під час орних робіт у трактора ХТЗ найбільш навантаженим є переднє праве колесо, якнайменше – заднє ліве. За бортами трактора передні колеса на 3 - 5 % навантажено більше задніх. Прийнемо для спрощення $P_{k1}^n = P_{k3}^n$ і $P_{k2}^n = P_{k4}^n$. У цьому

Для трактора типу ХТЗ на орних роботах з плугом ПЛН-5-35 дане перевищення складає 50-60 %. У цьому випадку для забезпечення стійкого прямолінійного руху орного агрегату необхідно виконати умову $M_2 \approx 1,5 M_1$, $\omega_1 \approx 1,5 \omega_2$.

Для прикладу на рис. 6 наведена уні-

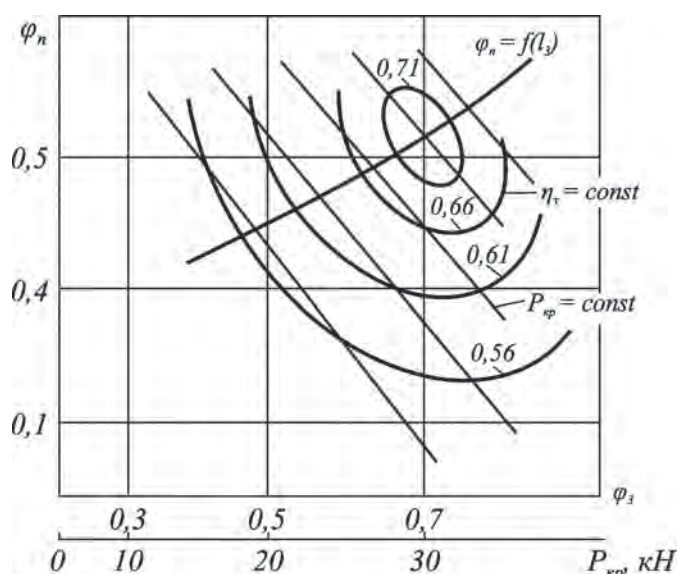


Рисунок 6 – Універсальна характеристика тягового ККД трактора ХТЗ-170 на оранці

версальна характеристика тягового ККД трактора ХТЗ-170 під час виконання орних робіт плугом ПЛН-5-35 стерні озимої пшениці на глибину 25-27 см (експлуатаційна маса трактора 8,0 т, потужність двигуна 121,1 кВт, швидкість руху 2,37 м/с).

На універсальній характеристиці зображено у вигляді серії прямих $P_{кр} = \text{const}$ тяговий діапазон трактора, на які нанесено графік функції $\varphi n = f(\varphi z)$ за η_{Tmax} , тобто оптимальне поєднання коефіцієнтів використання зчірної ваги ведучих мостів, що призводять до роботи трактора з максимальним тяговим ККД.

Аналіз універсальної характеристики показує, що $\eta_{Tmax} = 0,71$ трактора ХТЗ-17021 на оранці буде за заблокованих ведучих передньому і задньому мостах. За вимкнення переднього ведучого мосту усі точки η_T розташовуються на вісі абсцис (оскільки $\varphi_{II} = 0$). При цьому, η_T на універсальній характеристиці розташовуватиметься нижче η_{Tmax} .

За даною характеристикою є можливість оцінити η_T за розблокування диференціалів, одночасному увімкненні переднього і заднього мостів.

Обговорення. Результати досліджень направлені в основному на розв'язання наукової проблеми підвищення ефективності використання зчірної ваги трактора у тяговому режимі шляхом зниження нерівномірності розподілу вертикальних реакцій між колесами. Запропоновані нові залежності тягових властивостей трактора від використання його зчірної ваги і метод оцінювання вертикальних реакцій на колесах трактора від його зчірної ваги. Доведено, що найбільша ефективність використання зчірної ваги повнопривідного трактора у тяговому режимі досягається за розташування його центру мас між осями ведучих мостів. При цьому, на орних роботах (найбільш енергоємним технологічним процесом) забезпечується його робота з максимальним тяговим ККД за заблокованих ведучих мостами.

Вітчизняні та закордонні вчені звертають увагу на те, що ефективність тракто-

рів суттєво залежить від положення його центру мас і розподілу вертикальних реакцій між колесами. Проте і вітчизняними нормативними документами, і методиками випробувань тракторів за процедурою Кодексу 2 ОЕСР в лабораторіях NTTL в Сполучених Штатах Америки та в Німеччині не передбачено оцінювання ефективності роботи тракторів від положення центру його мас під час виконання технологічного процесу. Це є в основному наслідком відсутності методик та приладового забезпечення оцінювання тягових властивостей трактора за несталого його руху.

Розв'язання даної проблеми можливе з використанням методу парціальних прискорень [Артемов, 2012], що реалізований у СОУ УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого і вимірювально-реєстраційному комплексі, розроблених у Харківській філії УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого, не маючого світових аналогів.

Висновки. За результатами проведених досліджень обґрунтована методологія оцінювання впливу положення центру мас трактора на його тягові властивості. Результати досліджень дозволили сформулювати основні теоретичні та науково-практичні висновки.

1. Сформульована методологія оцінювання тягових властивостей трактора за нестабільності вертикальних реакцій на його колесах. Доведено, що за знаходження центру мас трактора у поздовжній площині симетрії можливе нерівномірне розподілення вертикальних реакцій на колеса однієї вісі трактора.

2. Обґрунтовано метод оцінювання вертикальних реакцій на колесах трактора, що базується на вимірюванні вертикальної реакції на одному із чотирьох коліс.

3. Доведено, що найбільшу ймовірність рівного розподілення вертикальних реакцій між колесами однієї вісі мають трактори зі зміщеним центром мас до передньої або задньої осей, найменшу – мають трактори з центром мас посередині між осями.

4. Теоретично обґрунтовано і експериментально підтверджено, що за виконання трактором орних робіт при нерівномірному розподілі навантаження за бортами забезпечується його робота з максимальним тяговим ККД за умови заблокованого ведучого переднього і заднього мосту.

5. Відкритим залишається питання оцінювання впливу центру мас трактора на його тягові властивості за агрегування з навісними, причіпними і комбінованими сільгоспмашинами. Необхідне виконання теоретичних і експериментальних досліджень у даному напрямку.

Перелік літератури

- Александров, Е. Е., Волонцевич, Д. О., Карпенко, В. А., Лебедев, А. Т., Перегон, В. А., Самородов, В. Б., & Туренко, А. Н. (2001). Динамика транспортно-тяговых колесных и гусеничных машин. Харьков: Издательство ХГАДТУ (ХАДИ), 642 с.
- Артемов, Н. П. (2012). Метод парциальных ускорений и его приложения в динамике мобильных машин / Артемов Н.П., Лебедев А.Т., Подригало М.А. и др. Под ред. Подригало М.А. Харьков : Міськдрук. 219 с.
- Лебедев, А. Т., Артемов, Н. П., & Грищенко, А. А. (2003). Тяговый КПД трактора при неравномерном распределении реакций между колесами. Тракторная энергетика в растениеводстве. Сборник научных трудов, ХГТУСХ. Вып. 6. 2003. С. 49–56.
- Лебедев, А. Т., Шуляк, М. Л. & Стельмах, А.М. (2022). Аналіз методів та засобів оцінки тягових властивостей трактора. Вісник НТУ «ХПІ». Серія Автомобіля та тракторобудування. 2. 108–117. doi: 10.20998/2078-6840.2022.2.12.
- Лебедев, А. Т., Лебедев, С. А., & Коробко, А. І. (2018). Кваліметрія та метрологічне забезпечення випробувань тракторів / Під ред. А.Т. Лебедева. Харків : Вид-во «Міськдрук». 394 с.
- Лебедев, А., Лебедев, С., Коробко, А., & Шевченко, І. (2022). Формування тягово-швидкісних властивостей трактора загального призначення. Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробувань нової техніки і технологій для сільського господарства України. Збірник наукових праць УкрНДІПВТ імені Леоніда Погорілого. 2022. Випуск 31 (45). С. 86–95. [http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2022-2-31\(45\)-7](http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2022-2-31(45)-7).
- Лебедев, С. (2014). Технічний рівень тракторів сільськогосподарського призначення на ринку України. Техніка і технології АПК. 11 (62). С. 8–12.
- Лебедев, С.А., & Коробко, А. І. (2020). Тягові властивості трактора при баластуванні. Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробувань нової техніки і технологій для сільського господарства України. Збірник наукових праць УкрНДІПВТ імені Леоніда Погорілого. 26 (40). 66–73.
- Ребров, О. Ю., Кальченко, Б. І., Якунін, М. Є., Реброва, О.М. & Артюшенко, О. В. (2021). Імітаційне моделювання тягово-динамічних показників тракторів на основі польових випробувальних циклів PowerMix. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер. : Автомобіля та тракторобудування. : зб. наук. пр. 2021. № 1. С. 80-94
- СОУ-П УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого 71.2-37-046043090-017:2015. Сільськогосподарська техніка. Визначення тягових показників тракторів. Метод парціальних прискорень. Дослідницьке : УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого, 2015. III, 9 с. (Стандарт організації України).
- Тракторы (1991). Проектирование, конструирование и расчет. Ксенович И.П., Гуськов В.В., Бочаров Н.Ф. и др.; под общ. ред. Ксеновича И.П. М.: Машиностроение. 544 с.
- Шевченко, І. О. (2021). Тягово-енергетична оцінка трактора в складі сільськогосподарського агрегату змінної маси. Інженерія природокористування. 2 (20). 94–99. doi: 10.37700/enm.2021.2(20).94-99.
- Ярошенко, П. М. (2020). Про вдосконалення методики розрахунку тягового зусилля МТА. Вісник Сумського націо-

нального аграрного університету Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів». (42). 22–25. doi: <https://doi.org/10.32845/msnau.2020.4.5>.

DLG – Qualitätsprüfungen Technik & Betriebsmittel. (2023). DLG – Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft : URL:<https://www.dlg.org/de/landwirtschaft/tests>

Donnell, H. (2001). Farm Power and Machinery Management, Wiley-Blackwell. 368 p.

Fluck, R. C. (2014). Energy analysis for agricultural systems. Energy in Farm Production. P. 45-51.

Leite, D. M., Fernandes, H. C., Teixeira, M. M., Cecon, P. R., & Furtado, M. R. (2017). Dynamic traction of a mechanized set based on technical and operational parameters. Engenharia Agrícola, 37, 484-492. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v37n3p484-492/2017>

Md-Tahir, H.; Zhang, J.; Xia, J.; Zhang, C.; Zhou, H.; & Zhu, Y. (2019). Rigid lugged wheel for conventional agricultural wheeled tractors— Optimising traction performance and wheel–soil interaction in field operations. Biosyst. Eng. 2019, 188, 14–23. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.10.001>

Md-Tahir, H.; Zhang, J.; Xia, J.; Zhou, Y.; Zhou, H.; Du, J.; Sultan, M.; & Mamona, H. (2021). Experimental Investigation of Traction Power Transfer Indices of Farm-Tractors for Efficient Energy Utilization in Soil Tillage and Cultivation Operations. Agronomy. 2021, 11, 168. <https://doi.org/10.3390/agronomy11010168>

Md-Tahir, H.; Zhang, J.; Zhou, Y.; Sultan, M.; Ahmad, F.; Du, J.; Ullah, A.; Hussain, Z.; & Xia, J. (2023). Engineering Design, Kinematic and Dynamic Analysis of High Lugs Rigid Driving Wheel, a Traction Device for Conventional Agricultural Wheeled Tractors. Agriculture 2023, 13, 493. <https://doi.org/10.3390/agriculture13020493>.

Ovsyannikov, S., Kalinin, E., & Koliesnik, I. (2018). Oscillation process of multi-support machines when driving over irregularities. Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport. 307-317.

Test report search. (2022). Nebraska Tractor Test Laboratory : веб-сайт. URL : <https://tractortestlab.unl.edu/test-page-nttl> . (дата звернення: 22.02.2023).

Zoz, F. M. & Grisso, R. D. (2003). Traction and Tractor Performance. For presentation at the 2003 Agricultural Equipment Technology Conference Louisville, Kentucky, USA 9-11 February 2003, 48 p. URL: http://www.leb.esalq.usp.br/disciplinas/Molin/leb5004/Material_para_leitura/Traction_Tractor_Performance.pdf

References

Aleksandrov, E. E., Volontsevich, D. O., Karpenko, V. A., Lebedev, A. T., Peregon, V. A., Samorodov, V. B., & Turenko, A. N. (2001). Dynamics of transport-traction wheeled and tracked machines. Kharkiv: Publishing House (KHADY), 2001. 642 p.

Artemov, N. P. (2012). The method of partial accelerations and its applications in the dynamics of mobile machines / Artemov N.P., Lebedev A.T., Podrigalo M.A. and others. Ed. Podrigalo M.A. Kharkov: Miskdruk. 219 p.

DLG – Qualitätsprüfungen Technik & Betriebsmittel. (2023). DLG – Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft : URL:<https://www.dlg.org/de/landwirtschaft/tests>

Donnell, H. (2001). Farm Power and Machinery Management, Wiley-Blackwell. 368 p.

Fluck, R. C. (2014). Energy analysis for agricultural systems. Energy in Farm Production. P. 45-51.

Lebedev, A. T., Artemov, N. P., & Grinenko, A. A. (2003). Traction efficiency of the tractor with uneven distribution of reactions between the wheels. Tractor energy in crop production. Collection of scientific works, KhGTUSH. issue 6. 2003. P. 49-56.

Lebedev, A. T., Lebedev, S. A., Korobko, A. I. (2018). Qualimetry and metrological safety of testing tractors / Ed. A.T. Lebedev. Kharkiv: View of «Miskdruk». 394 p.

Lebedev, A., Lebedev, S., Korobko, A., & Shevchenko, I. (2022). Formation of traction-

speed properties for a general purpose tractor. *Agricultural machinery and equipment: forecasting, design, testing*. 2022. Is. 31 (45). P. 86-95. [http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2022-2-31\(45\)-7](http://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2022-2-31(45)-7).

Lebedev, S. (2014). Technical level of agricultural tractors on the market of Ukraine. *Agricultural machinery and technologies*. 11 (62). P. 8–12.

Lebedev, S., & Korobko, A. (2020). Traction properties of a tractor using ballasting. *Agricultural machinery and equipment: forecasting, design, testing*. 26 (40). 66-73.

Lebedev, A., Shuliak, M., & Stelmakh, A. (2022). Analysis of Methods and Devices for Evaluation of the Traction Properties Tractor. *Bulletin of NTU «KhPI». Series of automobile and tractor construction*. 2. 108-117. doi: 10.20998/2078-6840.2022.2.12.

Leite, D. M., Fernandes, H. C., Teixeira, M. M., Cecon, P. R., & Furtado, M. R. (2017). Dynamic traction of a mechanized set based on technical and operational parameters. *Engenharia Agrícola*, 37, 484-492. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v37n3p484-492/2017>

Md-Tahir, H.; Zhang, J.; Xia, J.; Zhang, C.; Zhou, H.; & Zhu, Y. (2019). Rigid lugged wheel for conventional agricultural wheeled tractors – Optimising traction performance and wheel-soil interaction in field operations. *Biosyst. Eng.* 2019, 188, 14–23. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.10.001>

Md-Tahir, H.; Zhang, J.; Xia, J.; Zhou, Y.; Zhou, H.; Du, J.; Sultan, M.; & Mamona, H. (2021). Experimental Investigation of Traction Power Transfer Indices of Farm-Tractors for Efficient Energy Utilization in Soil Tillage and Cultivation Operations. *Agronomy*. 2021, 11, 168. <https://doi.org/10.3390/agronomy11010168>

Md-Tahir, H.; Zhang, J.; Zhou, Y.; Sultan, M.; Ahmad, F.; Du, J.; Ullah, A.; Hussain, Z.; & Xia, J. (2023). Engineering Design, Kinematic and Dynamic Analysis of High Lugs Rigid Driving Wheel, a Traction Device for Conventional Agricultural Wheeled Tractors. *Agriculture* 2023, 13, 493. <https://doi.org/10.3390/agriculture13020493>.

Ovsyannikov, S., Kalinin, E., &

Koliesnik, I. (2018). Oscillation process of multi-support machines when driving over irregularities. *Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport*. 307–317.

Rebrov, O. Yu., Kalchenko, B. I., Yakunin, M. E., Rebrova, O. M., & Artyushenko, O. V. (2021). Simulation modeling of traction and dynamic indicators of tractors based on PowerMix field test cycles. *Bulletin of the National Technical University «KhPI». Ser. : Automobile and tractor construction. : Coll. of science Ave.* 2021. No. 1. P. 80-94.

Shevchenko, I. O. (2021). Traction-energy estimation of the tractor in the composition of agricultural unit of variable weight. *Engineering of nature management*. 2 (20). 94–99. doi: 10.37700/enm.2021.2(20).94-99.

SOU-P Leonid Pogorilyy UkrNDIPVT 71.2-37-046043090-017:2015. *Agricultural machinery. Determination of traction parameters of tractors. Method of partial accelerations. Doslidnytske : Leonid Pogorilyy UkrNDIPVT, 2015. III, 9p. (Standard of organization of Ukraine).*

Test report search. (2022). Nebraska Tractor Test Laboratory : веб-сайт. URL : <https://tractortestlab.unl.edu/test-page-nttl> . (дата звернення: 22.02.2023).

Tractors (1991). Design, construction and calculation. Ksenevich I.P., Guskov V.V., Bocharov N.F. and etc.; ed. Ksenevich I.P. M.: Mashinostroenie. 544 p.

Yaroshenko, P. N. (2020). Onimprovement of method of calculation of traction force of ait. *Bulletin of the Sumy National Agrarian University Series «Mechanization and automation of production processes»*. (42). 22–25. doi: <https://doi.org/10.32845/msnau.2020.4.5>.

Zoz, F. M. & Grisso, R. D. (2003). Traction and Tractor Performance. For presentation at the 2003 Agricultural Equipment Technology Conference Louisville, Kentucky, USA 9-11 February 2003, 48 p. URL: http://www.leb.esalq.usp.br/disciplinas/Molin/leb5004/Material_para_leitura/Traction_Tractor_Performance.pdf

UDC 631.37 – 076

METHODOLOGY FOR ASSESSING TRACTOR TRACTION PROPERTIES UNDER UNSTABLE COUPLING WEIGHT

Lebedev A.T., Dr. of Tech. Sc., Prof.,
<https://orcid.org/0000-0002-1975-3323>

e-mail: tiaxntusg@gmail.com,

Lebedev S., Ph. D. of Tech. Sc.,
<https://orcid.org/0000-0002-3067-5135>

e-mail: hfukrndipvt@gmail.com,

Korobko A., Ph. D. of Tech. Sc., Ass. Prof.,
<https://orcid.org/0000-0002-6618-7790>

e-mail: ak82andrey@gmail.com,

Kharkiv branch of L. Pogorilyy UkrNDIPVT

Summary

Purpose of the study. *The purpose of the study is to increase the efficiency of using the tractor hitch weight in traction mode by reducing the uneven distribution of vertical reactions between the wheels.*

Research methods. *The methodological basis of the work is the generalization and analysis of known scientific results regarding the theory of the tractor in traction mode. Analytical method and comparative analysis were used to form a scientific problem, determine the goal and set research objectives. When creating empirical models of the tractor, the main provisions of the theory of probabilities were used.*

The results of the study. *The main provisions of the methodology for evaluating the traction properties of the tractor with the instability of the coupling weight have been formulated. The method of evaluating the vertical reactions on the wheels of the tractor is substantiated, which is based on the measurement of the vertical reaction on one of the four wheels. It has been proven that tractors with lubrication to the front or rear axles of the center of mass have the greatest probability of equal distribution of vertical reactions between the wheels of the same axle, while tractors with the center of mass in the middle between the axles have the lowest probability. It is theoretically substantiated and experimentally confirmed that when the tractor performs plowing work with uneven distribution of loads on the sides, its operation with maximum traction efficiency is ensured by blocking the front and rear axle drivers.*

Conclusion. *A well-founded methodology for evaluating the influence of the position of the tractor's center of mass on its traction properties. The issue of evaluating the influence of the tractor's center of mass on its traction properties when aggregated with mounted, trailed and combined agricultural machines remains open.*

Key words: *tractor, traction properties, coupling weight, center of mass, vertical reactions, driving bridges, blocking.*