

СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКА ТЕХНІКА ТА ОБЛАДНАННЯ: ПРОГНОЗУВАННЯ, КОНСТРУЮВАННЯ, ВИПРОБУВАННЯ

УДК 620.1.08

[https://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2024-1-34\(48\)-1](https://dx.doi.org/10.31473/2305-5987-2024-1-34(48)-1)

ТЯГОВІ ВИПРОБУВАННЯ МОБІЛЬНИХ МАШИН ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ПРИНЦИПІВ КІНЕМОДИНАМІКИ

Коробко А., д-р техн. наук, доц.,
e-mail: ak82andrey@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6618-7790>,
Харківська філія ДНУ «УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого»,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
Погорілий В.,
e-mail: pogoriliy@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-6867-8120>,
ДНУ «УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого»
Шейн В., канд. техн. наук, доцент,
e-mail: sheinvskhadi@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9282-0190>
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація

Метою дослідження є розробка методу тягових випробувань мобільних машин з використанням принципів кінемодинаміки. Для досягнення поставленої мети необхідно обґрунтувати метод тягових випробувань мобільних машин із використанням принципів кінемодинаміки; здійснити експериментальну валідацію запропонованого методу випробувань.

Методи та матеріали. Методологічною основою роботи є принципи кінемодинаміки, зокрема парціальних прискорень. Розробка методу випробувань полягає у визначенні можливості вимірювання встановлених показників та оцінюванні придатності методу. Для визначення силових й енергетичних показників мобільних машин пропонується застосувати вимірювальний комплекс, що складається з лінійного акселерометра й спеціального програмного забезпечення для обробки вимірюваних даних.

Результати. Розроблено метод тягових випробувань мобільних машин з використанням принципів кінемодинаміки; здійснено експериментальну валідацію запропонованого методу випробувань. Суть методу полягає у прямому вимірюванні подовжніх прискорень, що виникають під час розгону машини та подальшої обробки результатів цих вимірювань, застосовуючи енергетичний підхід, що базується на визначенні зміни (різниці) кінетичної енергії машини за визначений період часу. Це дало змогу визначити силу на колесах машини, що призводить до її розгону (або підтримання рівноприскореного руху) та частку потужності двигуна машини, що затрачається на це. Здійснено експериментальну валідацію розробленого методу, що полягав у визначенні коефіцієнту співпадіння результатів випробувань за варіації окремих визначених факторів.

Висновки. Застосування принципів кінемодинаміки дає змогу визначити частку сили, що призводить до виникнення прискорення під час розгону автомобіля та частку потужності двигуна, що при цьому затрачається. За результатами випробувань, отриманих запропонованим методом, можна зробити такий аналіз: визначати умови (передаточне число в коробці переміни передач), за яких можливий максимальний розгін із визначенням частки від максимально-можливої розрахункової сили на кожній із передач, що використовується на прискорення машини; визначити середньозважений запас потужності двигуна машини, що може бути використаний на подолання додаткових перешкод. Експериментальна валідація запропонованого методу за показником співпадіння показала задовільні результати.

Ключові слова: тягові випробування, метод, коефіцієнт співпадіння, потужність, сила тяги, прискорення.

Вступ. Вирішення проблеми визначення тягових властивостей тягово-транспортних машин прямо чи опосередковано відображено в ряді робіт закордонних видань [Hunt, 2001; Fluck, 2014; Leite et al., 2017; Md-Tahir et al., 2019; 2021; 2023], у яких відзначається перспективність досліджень у напрямку роботи машини в тяговому режимі. Пропонується оцінку енергетичних параметрів машини визначати за диференціації її маси.

Також проводяться дослідження у напрямку аналізу тягових властивостей і потужності коліс на різних сільськогосподарських ґрунтах [Czarnecki et al., 2019]. Такі дослідження охоплюють визначення ефективності зчеплення, ковзання, сили буксирування та втрату потужності на опір коченню й ковзанню коліс.

Дослідженню тягових властивостей мобільних машин і тракторів присвячено також ряд робіт українських науковців [Лебедев, Коробко, 2020; Ярошенко, 2020; Шевченко, 2021; Лебедев та ін., 2022]. У цих роботах проведено аналіз методів і засобів 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.

У роботі [Мармут та ін., 2024] запропонована уточнена методика побудови зовнішньої швидкісної характеристики на прикладі автомобіля «SKODA FABIA» за допомогою додаткових рівнянь, які уточнюють значення емпіричних коефіцієнтів А, В, С. Також у зазначеній роботі запропонована методика реєстрації діагностичних параметрів двигуна на стенді.

За результатами аналізу вищезазначених робіт можна зробити висновок, що переважно пропонується оцінювати тягові властивості мобільних машин за їхніми опорно-зчіпними властивостями без урахування умов експлуатації та режимів робочого ходу. Національні нормативні документи [ДСТУ, 2013] і методика випробування сільськогосподарських тракторів за Кодексом 2 OECD [OECD, 2012]

регламентують необхідність врахування опору коченню та частки ваги трактора, що припадає на ведучі колеса під час виконання технологічної операції. Тобто, під час визначення тягово-швидкісних властивостей необхідно враховувати реальні умови експлуатації.

Постановка завдань. Практика ставить перед наукою необхідність вирішення проблеми розробки методів випробувань мобільних (тягово-транспортних) машин із визначення їхніх поточних і потенційно-можливих тягових та швидкісних властивостей в умовах реальної експлуатації.

Метою дослідження є розробка методу тягових випробувань мобільних машин із використанням принципів кінемодинаміки. Для досягнення поставленої мети необхідно:

- обґрунтувати метод тягових випробувань мобільних машин із використанням принципів кінемодинаміки;

- здійснити експериментальну валідацію запропонованого методу випробувань.

Методи і матеріали. Методологічною основою роботи є парціальні прискорення (засновані на принципах кінемодинаміки), що використовуються при проведенні натурних випробувань автомобілів і тракторів [Коробко, 2023]. Цей метод засновано на переході від векторної суми сил у просторі до векторної суми прискорень у просторі. Це дає змогу зберегти фізичну суть отриманого векторного рівняння, що описує рух динамічної системи. Метод парціальних прискорень, на відміну від класичних методів, передбачає приведення рівнянь динаміки до рівнянь кінематики (принцип кінемодинаміки).

Розробка методу випробувань полягає у визначенні можливості вимірювання встановлених показників та оцінюванні придатності методу [Коробко, 2017]. Для визначення силових та енергетичних показників мобільних машин пропонується застосувати вимірювальний комплекс, що складається з лінійного акселерометра і спеціального програмного забезпечення для обробки вимірюваних даних [Подригало та ін., 2012].

У загальному виді метод тягових випробувань мобільних машин із використанням методу парціальних прискорень складається з чотирьох етапів:

– підготовчого: вибір факторів, складання плану натурних випробувань, підготовка машини й випробувального обладнання;

– основного: пряме вимірювання лінійних подовжніх прискорень машини під час розгону машини на визначених передачах до визначених швидкостей на відповідних дорожніх фонах і вибіг машини з максимальної швидкості до повної зупинки;

– розрахункового: непряме визначення силових та енергетичних показників машини;

– завершального: систематизація отриманих результатів вимірювань (прямих і непрямих), перевірка адекватності [Korobko, 2019; Korobko & Kotova, 2024] та формулювання висновків.

Прискорення, з яким рухається машина a , як уже було відмічено, вимірюються прямим методом. Вимірювальний комплекс [Подригало та ін., 2012] реєструє значення прискорень із частотою 50 разів за секунду. Враховуючи це, можна вважати, що у проміжку часу між вимірюваннями рух машини є рівноприскореним. Тому швидкість руху v_i в будь-який момент часу реєстрації даних визначається за класичною формулою механіки рівноприскореного руху [Бовтрук та ін., 2010]:

$$v_i = v_0 + a_0 \Delta t, \quad (1)$$

де v_0 – швидкість руху, досягнута у попередній (початковий) момент часу реєстрації даних), м/с;

a_0 – прискорення у попередній (початковий) момент часу реєстрації даних (вимірюється прямо), м/с²;

Δt – інтервал часу між вимірюваннями прискорення вимірювальним комплексом, с.

Пройдений шлях s_i у будь-який момент часу реєстрації даних визначається аналогічно за класичною формулою

[Бовтрук та ін., 2010]:

$$s_i = s_0 + v_0 \Delta t + \frac{1}{2} a_0 \Delta t^2, \quad (2)$$

де s_0 – пройдений шлях за попередній проміжок часу, м;

Енергія двигуна машини, що виконує роботу з її переміщення, перетворюється в кінетичну енергію машини [Бовтрук та ін., 2010]

$$W_i = \frac{m_a v_i^2}{2}, \quad (3)$$

де W_i – кінетична енергія машини в i -тий момент часу вимірювання прискорення, Дж;

m_a – маса машини, кг;

Розрахунок сили на колесах, що створює прискорення машини, виконується через визначення приросту кінетичної енергії визначеної за (3), якого набуває машина під час руху з прискоренням у кожен момент часу і розраховується як відношення приросту кінетичної енергії до шляху, за який цей приріст енергії відбувся.

$$P_{ai} = \frac{W_i - W_{i-1}}{s_i - s_{i-1}}, \quad (4)$$

де W_i , W_{i-1} – кінетична енергія машини в i -тий і попередній моменти часу вимірювання, відповідно, Дж;

s_i , s_{i-1} – шлях, що проходить машина в i -тий і попередній моменти часу вимірювання, відповідно, м.

Потужність, що витрачається на розгін машини в кожен момент часу визначається також розрахунковим шляхом, використовуючи в якості вхідних даних показник сили, що створює прискорення (4) та з урахуванням фактичного значення швидкості у поточний момент часу. У цьому випадку отримуємо значення потужності, що затрачається на розгін машини

$$N_{ai} = P_{ai} \cdot v_i. \quad (5)$$

Значення сил опору (опору дорожнього покриття й аеродинамічного опору) та потужності, що затрачається на подолан-

ня цих сил можна визначити за методикою описаною в [Подригало та ін., 2010].

Узагальнюючою оцінкою дорожньо-експлуатаційних характеристик машини можна здійснити за середньозваженим запасом (надлишком) потужності двигуна, що може бути використаний для прискорення (розгону) машини або подолання додаткових перешкод за рівномірного руху різними типами доріг.

$$N_z = \frac{N_j \cdot K_j}{\sum K_j} \quad (6)$$

де N_j – запас потужності двигуна машини, що випробовується на j -му типі дороги, визначається експериментально-розрахунковим методом за результатами випробувань (5);

K_j – частка типу дороги, прийнята з урахування розподілу пробігу машин визначеного типу при приймальних випробуваннях.

Результати. Експериментальна валідація розробленого методу випробувань заключається у порівнянні результатів визначення тягових та енергетичних показ-

ників машини отриманих розробленим методом із заздалегідь відомими значеннями показників.

Експеримент проводився на повнопривідних автомобілях із кодовими позначеннями «Vehicle 1», «Vehicle 2», «Vehicle 3». Заявлена ефективна потужність двигунів машин – 200 кВт. Вибрано чотири типи дорожнього покриття: асфальтобетонне, ґрунтова дорога, сухе бездоріжжя, мокре бездоріжжя. Варіювався також фактор «оператор машини». Усереднення за цим показником є необхідним задля узагальнення персональних особливостей операторів: час реакції, швидкість перемикавання передач тощо.

На рис. 1 показано фрагмент результатів прямих вимірювань прискорень а) й результатів розрахунку швидкості руху б), сили тяги на колесах, що призводить до виникнення прискорення в) та необхідної на це потужності г) автомобіля «Vehicle 2» під час руху дорогою з ґрунтовим покриттям.

Результати експериментальної валідації оцінені за показником співпадіння [Korobko & Kotova, 2024] визначення сили

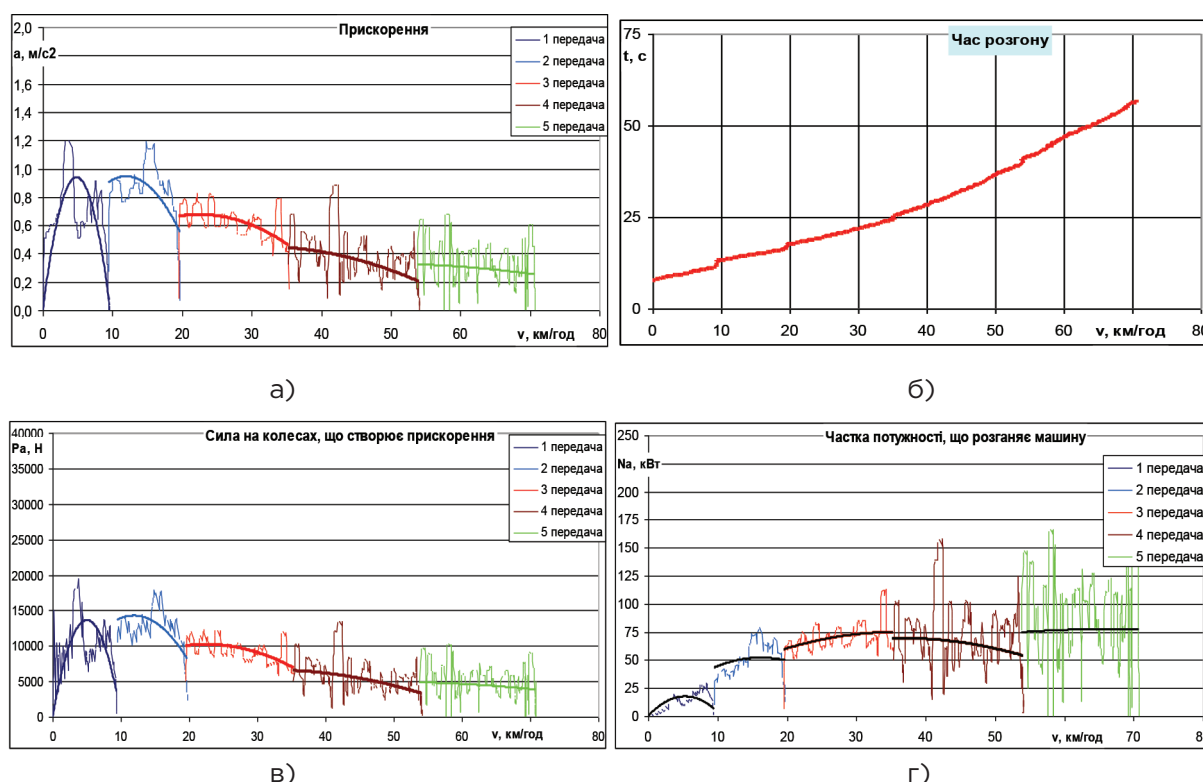
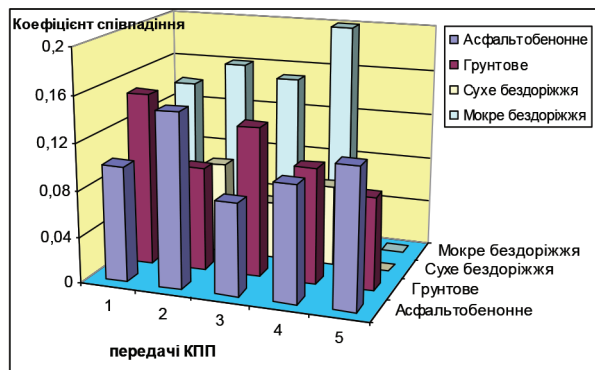
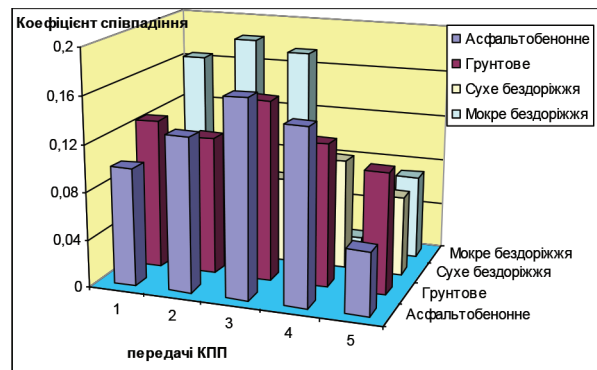


Рисунок 1 – Фрагмент результатів вимірювань і розрахунків, отриманих під час експериментальної валідації методу тягових випробувань



а)



б)

Рисунок 2 – Коефіцієнт співпадіння визначення сили на колесах, що створює прискорення а), частки потужності, що розганяє машину б)

на колесах, що створює прискорення, наведені на рис. 2 а), частки потужності, що розганяє машину — на рис. 2 б).

Аналіз даних, наведених на рис. 2, свідчить про задовільне співпадіння результатів випробувань, здійснених запропонованим методом визначення тягових характеристик машин при варіації різних факторів.

Обговорення. Результати проведеного дослідження спрямовані на розробку методу випробувань, що може бути реалізований за відносно невеликих часових і матеріальних затрат із забезпеченням достатніх показників правильності й достовірності.

У дисертаційній роботі Теслі В. О. детально проаналізовані методи визначення потужності двигуна (як стендові, так і дорожні) [Тесля, 2015]. Причому до дорожніх відноситься гальмівний метод, який заснований на застосуванні зовнішніх навантажувальних пристроїв — гальмівних установок, за допомогою яких до колінчастого валу прикладається необхідний момент опору, що перешкоджає його обертанню. Акцентується увага на недоліках цього методу.

Безгальмівні методи, в основному, засновані на почерговому вимиканні циліндрів і визначенні при цьому втрат потужності. Однак ці методи також мають недоліки: підвищена похибка під час визначення потужності за рахунок значної деформації робочого процесу, інерційності подачі палива, а також трудоміст-

кість і похибка підрахунку циліндрових показників.

Також у дисертаційній роботі Теслі В. О. запропоновано два способи визначення потужності двигуна автомобіля під час його руху [Тесля, 2015]. Ці методи базуються на методі парціальних прискорень і різняться необхідністю й відсутністю необхідності проведення вибігу автомобіля.

Ці методи є простими з точки зору їхньої реалізації, однак мають, на наш погляд, суттєві недоліки. Наприклад, у рівняння вимірювання ефективної потужності двигуна входять емпіричні коефіцієнти, що визначаються через величини, точність визначення яких досить низька. Це такі величини, як коефіцієнт обліку обертових мас трансмісії при вибігу автомобіля, приведений до ведучих коліс момент інерції трансмісії тощо.

Метод випробувань, запропонований у цій статті, позбавлений таких недоліків. Вхідними даними для розрахунків є подовжні прискорення, маса машини й оберти двигуна. Рівняння вимірювання відносно прості, відповідно похибка вимірювань не набуває великих значень.

Висновки. Застосування принципів кінемодинаміки дає змогу визначити частку сили, що призводить до виникнення прискорення під час розгону машини та частку потужності двигуна, що при цьому затрачається.

За результатами випробувань, отриманих запропонованим методом, можна зробити такий аналіз:

— визначати умови (передаточне число в коробці переміни передач), за яких можливий максимальний розгін із визначенням частки від максимально-можливої розрахункової сили на кожній із передач, що використовується на прискорення машини;

— визначити середньозважений запас потужності двигуна машини, що може бути використаний на подолання додаткових перешкод.

Експериментальна валідація запропонованого методу за показником співпадіння показала задовільні результати.

Перелік літератури

- Бовтрук, А., Герасименко, Ю., Лахін, Б., Меньяйлов, С., & Поліщук, А. (2010). Фізика. Модуль 1. Механіка. Вид. 4-те. К.: НАУ-друк. 256 с.
- ДСТУ 7463:2013 Сільськогосподарська техніка. Трактори сільськогосподарські. Класифікація показників [Чинний від 2014-01-01]. К.:2013. 11 с. (Національний стандарт України).
- Коробко, А. (2023). Науково-методологічні основи забезпечення якості тракторів на стадіях постановки на виробництво та експлуатації з використанням методу парціальних прискорень. Реф. дис. ... д-р техн. наук. Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків. 43 с.
- Коробко, А. І. (2017). Методологія розроблення нових методів випробувань. Журнал інженерних наук. Науковий журнал. 4 (1). Н7 - Н13.
- 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, 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.
- Мармут, І. А., Кашканов, В. А., & Зуєв, В. О. (2024). Удосконалення методики визначення нормативів тягових властивостей автомобіля Skoda Fabia при стендовому діагностуванні. Вісник машинобудування та транспорту. 18. 101-109. 10.31649/2413-4503-2023-18-2-101-109.
- Подригало, М. А., Коробко, А. І., Клец, Д. М., & Файст, В. Л. (2012). Система для визначення параметрів руху автотранспортних засобів при динамічних (кваліметричних) випробуваннях: пат. 51031 Україна : МПК G 01 P 3/00. G 01 P 15/00. № u 2010 01136 ; заявл. 04.02.10 ; опубл. 25.06.10, Бюл. № 12.
- Подригало, М. А., Коробко, А. І., Клец, Д. М., Назарько, О. О., & Мостова, А. М. (2010). Метод визначення сумарної сили опору руху автомобіля за допомогою датчиків лінійних прискорень. Наукові нотатки Луцького національного технічного університету. Міжвузівський збірник (за галузями знань «Машинобудування та металообробка», «Інженерна механіка», «Металургія та матеріалознавство»). 28 (травень). 432-434.
- Тесля, В. О. (2015). Підвищення безпеки використання автомобілів шляхом удосконалення методів оцінювання динамічних і енергетичних характеристик: дис. ...наук. ступеня канд. техн. наук. Х. : ХНАДУ, 170 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 національного аграрного університету Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів». (42). 22–25. doi: <https://doi.org/10.32845/msnau.2020.4.5>.
- Czarnecki, J., Brennenstul, M., Bińczyk, W., Ptak, W., Gil, Ł. (2019). Analysis of traction properties and power of wheels used on various agricultural soils. Agricultural

Engineering. 23 (1). 13–23. doi: 10.1515/agriceng-2019-0002.

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

Hunt D. (2001). *Farm Power and Machinery Management*, Wiley-Blackwell. 368 p.

Korobko, A. (2019). Measurement Uncertainty as a Test Model Assessment Tool. *Advanced Optoelectronics and Lasers CAOL*2019: 2019 IEEE 8th International Conference with XVI Scientific Workshop “Measurement Uncertainty: Scientific, Normative, Applied and Methodical Aspects” UM*2019 : Conference Proceedings*. Sozopol, Bulgaria 06–08 September 2019. P. 707–710. DOI: 10.1109/CAOL46282.2019.9019418

Korobko, A., & Kotova, Yu. (2024). An alternative method for assessing the agreement between test results. *Український метрологічний журнал*. 1. 4–10. <https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2024.300868>.

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.; & Mamon, 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.; Husain, Z.; & Xia, J. (2023). Engineering Design, Kinematic and Dynamic Analysis of High Lugs Rigid Driving Wheel, a Traction Device for Conventional Agricultural Wheeled Trac-

tors. *Agriculture* 2023, 13, 493. <https://doi.org/10.3390/agriculture13020493>.

OECD (2012). *Standard Code For The Official Testing Of Agricultural And Forestry Tractor Performance*. Code 2. 107 c.

References

Bovtruk, A., Gerasimenko, Y., Lakhin, B., Menyailov, S., & Polishchuk, A. (2010). *Physics. Module 1. Mechanics*. Kind. the 4th K.: NAU-print. 256 p.

Czarnecki, J., Brennenstul, M., Bi-
ańczyk, W., Ptak, W., Gil, Ł. (2019). Analysis of traction properties and power of wheels used on various agricultural soils. *Agricultural Engineering*. 23 (1). 13–23. doi: 10.1515/agriceng-2019-0002.

DSTU 7463:2013 *Agricultural machinery. Agricultural tractors. Classification of indicators [Effective from 2014-01-01]*. K.: 2013. 11 p. (National Standard of Ukraine).

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

Hunt, D. (2001). *Farm Power and Machinery Management*, Wiley-Blackwell. 368 p.

Korobko A. (2017). Methodology for developing new test methods. *Journal of Engineering Sciences. Scientific journal*. 4 (1). H7 – H13.

Korobko, A. (2019). Measurement Uncertainty as a Test Model Assessment Tool. *Advanced Optoelectronics and Lasers CAOL*2019: 2019 IEEE 8th International Conference with XVI Scientific Workshop “Measurement Uncertainty: Scientific, Normative, Applied and Methodical Aspects” UM*2019 : Conference Proceedings*. Sozopol, Bulgaria 06–08 September 2019. P. 707–710. DOI: 10.1109/CAOL46282.2019.9019418

Korobko, A. (2023). *Scientific and Methodological Principles of Ensuring the Quality of Tractors at the Stages of Production and Operation Using the Partial Acceleration Method*. Doctoral thesis in Engineering Science in specialty 05.22.02 – cars and tractors. – Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv,

- Korobko, A., & Kotova, Yu. (2024). An alternative method for assessing the agreement between test results. *Ukrainian Metrological Journal*. 1. 4–10. <https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2024.300868>.
- 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.; & Mamon, 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>.
- OECD (2012). Standard Code For The Official Testing Of Agricultural And Forestry Tractor Performance. Code 2. 107 c.
- Podrigalo, M., Korobko, A., Kletz, D., & Faist, V. (2012). A system for determining the parameters of the movement of motor vehicles during dynamic (qualimetric) tests: pat. 51031 Ukraine: IPC G 01 P 3/00. G 01 P 15/00. No. u 2010 01136; statement 04.02.10; published 25.06.10, Bul. No. 12.
- Podrigalo, M., Korobko, A., Kletz, D., Nazarko, O., & Mostova, A. (2010). The method definition of total force resistance to movement of the car by means of the accelerometers. *Scientific notes of the Lutsk National Technical University. Interuniversity collection (by fields of knowledge «Mechanical engineering and metalworking», «Engineering mechanics», «Metallurgy and materials science»)*. 28 (May). 432–434.
- 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.
- Teslia, V. O. (2015). Improving the safety of using cars by improving the methods of evaluating dynamic and energy characteristics: dissertation. ... sciences. candidate's degree technical of science. Kh.: KhNAHU, 170 p.
- Marmut, I. & Kashkanov, V. & Zuiev, V. (2024). Improvement of the method for determining the traction properties of the SKODA FABIA vehicle during bench diagnostics. *Journal of Mechanical Engineering and Transport*. 18. 101–109. 10.31649/2413-4503-2023-18-2-101-109.

UDC 620.1.08

USING THE PRINCIPLES OF KINEMODYNAMICS FOR TRACTION TESTS OF MOBILE MACHINES

Korobko A., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher,
e-mail: ak82andrey@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6618-7790>

Kharkiv branch of L. Pogorilyy UkrNDIPVT;

Kharkiv National Automobile and Highway University

Pogorilyy V., The Head of the Equipment Testing Center,

<https://orcid.org/0000-0002-6867-8120>

L. Pogorilyy UkrNDIPVT

Shein V., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor,

e-mail: sheinvskhadi@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9282-0190>,

Kharkiv National Automobile and Highway University

Summary

The study aims to develop a method for traction testing of mobile machines using the principles of kinemodynamics. To achieve these goals, it is necessary to: justify the method of traction testing of mobile machines using the principles of kinemodynamics; and carry out experimental validation of the proposed test method.

Methods and materials. The methodological basis of the work is the principles of kinemodynamics, namely partial accelerations. The development of a test method consists of determining the possibility of measuring the established indicators and assessing the method's suitability. To determine the power and energy characteristics of mobile machines, it is proposed to use a measuring complex consisting of a linear accelerometer and special software for processing the measured data.

Results. A method for traction testing of mobile machines using the principles of kinemodynamics has been developed; experimental validation of the proposed test method was carried out. The essence of the method is the direct measurement of longitudinal accelerations that occur during the acceleration of a car and the subsequent processing of the results of these measurements, using an energy approach based on determining the change (difference) in the kinetic energy of the car over a certain period. This made it possible to determine the force on the wheels of the car, which leads to its acceleration (or maintaining uniformly accelerated motion) and the share of engine power spent on this car. An experimental validation of the developed method was carried out, which consisted of determining the coefficient of agreement of test results with variations in certain specific factors.

Conclusions. The use of the principles of kinemodynamics allows us to determine the fraction of force that leads to acceleration during the acceleration of the car and the fraction of engine power expended. Based on the test results obtained by the proposed method, the following analysis can be made: determine the conditions (gear ratio in the gearbox) under which maximum acceleration is possible, determining the share of the maximum possible design force in each gear used to accelerate the machine; determine the weighted average power reserve of the machine engine, which can be used to overcome additional interference. Experimental validation of the proposed method in terms of agreement showed satisfactory results.

Keywords: traction tests, method, coincidence coefficient, power, traction force, acceleration.