

УДК 629.113.001

ОЦІНКА АДЕКВАТНОСТІ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ РУХУ УНІВЕРСАЛЬНИХ ТЯГОВО-ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Георгій Худавердян, аспірант, Олег Сукач, доцент

Львівський національний університет природокористування

вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Львівський р-н., Львівська обл., Україна,

¹e-mail: georgiu.kh@gmail.com, ²e-mail: 19oleg85@ukr.net

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2024.28.227>

Худавердян Г., Сукач О. Оцінка адекватності імітаційної моделі руху універсальних тягово-транспортних засобів

Представлено результати досліджень потенційного максимального тягового зусилля, що може розвинути колісна машина (КМ) по деформованій поверхні. Метою проведення експериментальних досліджень є перевірка імітаційної моделі руху КМ згідно з WES-методикою армії США в програмному середовищі MATLAB Simulink, а саме її програмного модуля для визначення максимального тягового зусилля на адекватність. Раніше оцінка цієї моделі на адекватність базувалась на зіставленні результатів уже наявних експериментальних даних щодо колісного трактора Т-150К та результатів відповідного імітаційного моделювання – розрахунку за допомогою опрацьованого вищезгаданого програмного модуля. Експериментальне визначення тягового зусилля відбувалося на базі легкого тактичного автомобіля «Мамай» та мінітрактора Mahindra Feng Shou FS244 з відомими техніко-експлуатаційними показниками. Експеримент проводився відповідно до принципів, закладених у методиці WES армії США – «іде/не», яка є однією з основ, на яких побудована імітаційна модель. Представлена структура даних, необхідна для порівняння результатів експерименту і моделювання, визначено основні показники та їхні джерела для подальшої оцінки адекватності моделі. Представлено вимірвальне обладнання, що було необхідне для проведення експерименту, а саме твердомір ґрунту ЛАН-М PRO для визначення конусного індексу опорної поверхні, що деформується, який був доопрацьований відповідно до методики, динамометра ДПУ-2-2-У2 для визначення тягового зусилля, лазерний безконтактний тахометр UNI-T UT373 для визначення реальної частоти обертання коліс. Підтвердження адекватності цієї моделі дозволить її використання при розробці універсальних тягово-транспортних засобів типу Унімог/Автотрак категорії N1/T1 ще на етапі проектування. Підібрано агрегати силового приводу та визначено її тяговий клас – підібрано технологічне обладнання та причеп. За результатами експерименту встановлено, що ця імітаційна комп'ютерна модель руху КМ адекватна.

Ключові слова: колісна машина, повний привід, імітаційна модель, технологічне обладнання, опорна поверхня, максимальне тягове зусилля, транспортна операція, технологічна операція.

Khudaverdian H., Sukach O. Assessment of the adequacy of the simulation model of universal towing vehicles

The article discusses the results of an experimental study aimed at determining the maximum tractive effort that a wheeled vehicle (WV) can exert on a deformable surface. The primary objective is to validate a previously developed simulation model for WV movement, based on the WES methodology of the US Army, using the MATLAB Simulink software environment. Specifically, this involves evaluating the software module designed to compute maximum tractive effort for its adequacy. Previously, the adequacy of this model was assessed by comparing experimental data from the T-150K wheeled tractor with results from the corresponding simulation modeling conducted with the aforementioned software module. The experimental assessment of tractive effort was performed using the light impact vehicle "Mamai" and the Mahindra Feng Shou FS244 minitractor having well-documented technical and operational specifications. The study adhered to the principles of the WES methodology, specifically its "goes/does not" criteria, which is fundamental to the construction of the simulation model. The article details the necessary data structure for comparing experimental and modeling results and specifies the types of data and their sources to facilitate further evaluation of the model's adequacy. It also outlines the measuring equipment used in the experiments, including the modified LAN-M PRO soil penetrometer for assessing the cone index (CI) of the deformable surface, the DPU-2-2-U2 dynamometer for measuring traction force, and the UNI-T UT373 laser non-contact tachometer for determining the actual wheel rotation frequency. Confirming the adequacy of this simulation model will enable its application in the development of universal traction vehicles in the Unimog/Avtotrak category (N1/T1 type) during the design phase. This will assist in selecting power drive units and determining traction class, as well as in choosing appropriate technological equipment and trailers. The results of the experiment indicate that the simulation computer model of the WV movement is, in fact, adequate.

Keywords: wheeled vehicle, four-wheel drive, simulation model, technological equipment, support surface, maximum tractive effort, transport operation, technological operation.

Постановка проблеми. Універсальні тягово-транспортні колісні машини (КМ) типу Автотрак/Унімог [6] розроблені для виконання як транспортних завдань (перевезення з приче-

пом), так і технологічних операцій (оранка, культивування, косіння тощо). Для забезпечення їх багатфункціональності необхідно передбачити можливість додаткового оснащення відповід-

ним технологічним обладнанням і причепами ще на етапі проєктування.

Ефективне використання таких машин у сільськогосподарських роботах, підвищення продуктивності та зниження експлуатаційних витрат залежать від правильного підбору та агрегуванням додатковим обладнанням. Визначальним параметром для такого вибору є максимальне тягове зусилля, яке здатне реалізувати КМ на певному типі опорної поверхні, тобто її відповідність класу тяги [12].

Розроблена раніше [9; 10] імітаційна комп'ютерна модель руху УКТТЗ, а саме її підсистема для визначення максимального зусилля, що може бути реалізоване на відповідній опорній поверхні [11], дає змогу:

- визначити вільне тягове зусилля, яке може бути реалізоване за умов залишкової потужності двигуна на відповідній опорній поверхні;
- оцінити ефективність методів покращення тягово-зчіпних характеристик;
- визначити клас тяги КМ для оптимального вибору обладнання та причепів.

Для подальшого коректного використання запропонованої моделі під час проєктування та виготовлення КМ необхідно перевірити вказану модель на адекватність для обґрунтування параметрів різних типів і класів машин. Також необхідно визначити ступінь відповідності результатів моделювання та експериментального визначення тягового зусилля та їх розбіжності за умови зміни вхідних параметрів моделювання, таких як компоновальна схема, навантаження на вісь, кінематика приводу, механічні параметри опорної поверхні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Експериментальне дослідження тягових показників КМ у своїх роботах [7; 8] висвітлив Погорілий С. П. Зокрема у статті [7] подано методику проведення експериментальних досліджень, представлено вимірювально-ресруюче обладнання для виконання тягових випробувань, результати тягових випробувань у польових умовах на базі дослідного зразка автомобільного шасі виробництва ПАТ «АвтоКрАЗ», моделі КрАЗ-255Б1. У статті [8] автор навів результати експериментальних досліджень МЕЗ 330 «Автотрактор» з плугом ПНН-5-40.

Оцінку адекватності моделей руху КМ, розроблених у програмному середовищі MATLAB Simulink, висвітлили у своїх роботах Грубель М. Г., Фтемов Ю. О., Хома В. В., Крайник Л. В. [3; 4]. Крім цього, здійснено експериментальну оцінку фізико-механічних характеристик різних ділянок опорної поверхні за

WES-методикою визначення конусного індексу та визначено модуль деформації ґрунту.

Постановка завдання. Завдання нашого дослідження – перевірка розробленої імітаційної моделі на адекватність порівнянням отриманих результатів моделювання та експериментального визначення тягового зусилля, що може розвинути КМ на заданій опорній поверхні. Відповідно до структури імітаційної моделі механічна характеристика опорної поверхні є одним із найбільш мінливих її вхідних параметрів. Широкий діапазон значень фізико-механічних характеристик опорної поверхні, що відповідає умовам експлуатації КМ (асфальтована, ґрунтова, піщана, гравійна дороги, а також зміна їхньої вологості чи ступеня ущільнення) може значною мірою впливати на результати моделювання [12]. Визначення тягового зусилля у заданих дорожніх умовах вимагає постійного уточнення фізико-механічних характеристик опорної поверхні. Найбільш оптимальним за швидкістю і вартістю є емпіричний метод комплексної оцінки несучої здатності опорної поверхні, що базується на визначенні конусного індексу СІ [2]. Він передбачає використання портативного пенетрометра, який забезпечує належну точність і швидкість збору даних на значних площах, тому активно використовується інженерним корпусом армії США (WES US Army) [16; 17] безпосередньо в польових умовах чи умовах бездоріжжя.

Формальне підтвердження коректності структури моделі передбачає натурне визначення тягового зусилля, що може реалізувати КМ та порівняння його з результатами, отриманими в процесі моделювання. Іншим завданням дослідження є перевірка стійкості розробленої моделі за умови зміни початкових умов моделювання (параметри силового приводу, зміна кінематичних параметрів, механічні параметри опорної поверхні).

Виклад основного матеріалу. Робота КМ у сільськогосподарському виробництві характерна значною різноманітністю експлуатаційних умов. Раціональність і обґрунтованість використання мобільних енергетичних засобів на тих чи інших роботах визначається тяговим зусиллям і тяговим навантаженням. Через неоднорідність фізико-механічних властивостей ґрунту та мікрорельєфу опорної поверхні тягове зусилля та опір руху безупинно варіює й має змінний, часто коливальний характер. За таких умов тягове зусилля є нестационарною випадковою величиною.

Для оцінки тягово-динамічних і економічних властивостей КМ найчастіше застосовують класичні лабораторні методи випробувань із застосуванням гідромеханічних та механічних

тягово- гальмівних стендів. Стендові випробування дозволяють визначити тяговий потенціал машини, однак не враховують змінний характер взаємодії рушіїв з опорною поверхнею, мінливості опору руху додаткового обладнання тощо.

Крім цього, польові випробування дозволяють повніше оцінити тягово-динамічні характеристики машин у визначених виробничих умовах та обґрунтованість застосування результатів моделювання під час подальших проектно-конструкторських робіт. Стандартизовані тягові випробування [3] передбачають визначення тягового зусилля, прикладеного до тягово-зчіпного пристрою. Згідно з процедурою випробувань машину агрегують із динамометричним гальмівним візком, за допомогою якого створюють перемінний опір в усьому можливому діапазоні тягових зусиль. Як гальмівний пристрій часто застосовують трактори,

завдяки чому досягається зміна величини опору, а регулюється вона подачею кількості палива, вибором певної передачі, або ж застосуванням гальмівної системи. Випробування здійснюють до моменту появи нестійкої роботи двигуна чи значного буксування рушіїв.

Відповідно до поставленого завдання досліджень передбачалось отримання експериментальних даних із визначення тягового зусилля та порівняння їх із результатами моделювання. Попередньо, оцінка імітаційної моделі на адекватність базувалася на зіставленні результатів уже наявних експериментальних даних щодо колісного трактора Т-150К [1], отриманих при моделюванні [3].

Імітаційне комп'ютерне моделювання відбувалося за допомогою підсистеми для визначення максимального тягового зусилля, описаної у статті [10], а відповідна структура даних відображена у табл. 1.

Таблиця 1. Структура даних для оцінки адекватності експерименту
Table 1. Data structure for assessing the adequacy of the experiment

Параметр	Джерело	Одиниці вимірювання
Конусний індекс (CI) опорної поверхні	Експериментальне визначення, довідкові дані	кПа
Споряджена маса КМ	Дані виробника	кг
Повна маса КМ	Дані виробника	кг
Потужність двигуна КМ	Дані виробника	кВт
Передатні числа трансмісії КМ	Дані виробника	-
Шини, розмірність КМ	Дані виробника	-
Колісна формула	Дані виробника	
Максимальне тягове зусилля що може реалізувати на відповідній ОП	Експериментальне визначення, імітаційне моделювання	кН

Для перевірки моделі на адекватність проведено експериментальне дослідження за принципами, закладеними в імітаційну модель, визначено вхідні й вихідні дані моделювання, а саме підсистеми для визначення максимального тягового зусилля, що може реалізувати КМ на відповідній деформованій поверхні. Експериментальне визначення максимального тягового зусилля проводили із застосуванням трактора Mahindra Feng Shou FS244 [14] із відомими параметрами силового приводу та експлуатаційними характеристиками (заявленими виробником) для подальшої оцінки достовірності даних експерименту. В іншому випадку, виходячи з точки зору розширення вхідних даних для імітаційного моделювання й подальшої оцінки моделі на адекватність, проводили експериментальне та імітаційне (методом комп'ютерного моделювання) визначення максимального тягового зусилля легкого ударного автомобіля «Мамай», який за своїми параметрами найбільш наближений до проекту ВАТ «Укравтобуспром» ВТ-041. Характеристики

відповідних КМ, які, згідно з табл. 1, – вхідні дані для моделювання й подані в табл. 2.

Іншим показником, що має визначальний вплив на реалізацію тягового потенціалу машини, є механічна характеристика опорної поверхні. Подальша перевірка розробленої моделі передбачала уточнення даних щодо деформованості та міцності опорної поверхні внаслідок внутрішніх і зовнішніх силових впливів. Таку оцінку проводили за допомогою потративного пенетрометра шляхом визначення конусного індексу (CI). Вказаний індекс є стандартизованим показником оцінки твердості ґрунту (ASAE S313.3) й визначається як сила на одиницю площі, необхідна для проштовхування стандартного конуса через шар досліджуваного ґрунту. Для визначення конусного індексу (CI) використано електронний твердомір ґрунту Лан-М PRO [13] з круглим конусом 30° з площею основи 3,23 см² (0,5 дюймів²) та модифікованим програмним забезпеченням, що дозволяє виміряти зусилля згідно з методикою WES.

Дослідження проводили на рівній горизонтальній грантовій ділянці (необроблений край поля) розміром 10×50 метрів, кількість точок вимірювання – 100. Згідно з процедурою, визначеною стандартом, цифровий твердомір автоматично розраховує усереднене значення

твердості на фіксованих значеннях глибини ґрунту (1, 2,5; 5, 7,5 10...45 см) та зберігає їх на карту пам'яті microSD. Конус рівномірно вдавлювали у ґрунт зі швидкістю не більше ніж 2 см/с (рис. 1).

Таблиця 2. Характеристики КМ

Table 2. WV characteristics

Параметр	Mahindra Feng Shou FS244	Автомобіль «Мамай»
Споряджена маса, кг	1420	680
Потужність двигуна, кВт	17,64	110
Передатні числа трансмісії	-	1-а передача: 3,78 2-а передача: 2,12 3-я передача: 1,36 4-а передача: 0,97 5-а передача: 0,76 Задня передача: 3,61
Шини, розмірність	Передні 6,00-16 Задні 9,50-24	205/75 R15
Колісна формула	4x4	4x2
Максимальне тягове зусилля що може реалізувати на відповідній ОП, кН	5	-



Рис. 1. Твердомір ґрунту ЛАН-М PRO

Fig. 1. LAN-M PRO soil penetrometer

Згідно з отриманими даними, середній конусний індекс СІ на вказаній ділянці становив 750 кПа, тоді як на утвореній колії після проходження автомобіля «Мамай» – 816 кПа, а трактора Mahindra Feng Shou FS244 – 843 кПа.

Експериментальне визначення максимального тягового зусилля проводили за допомогою динамометра ДПУ-2-2-У2 [5] до моменту пробуксовування коліс більш ніж як 15 % або ж до появи нестабільної роботи двигуна (рис. 2).



Рис. 2. Динамометр ДПУ-2-2

Fig. 2. Dynamometer DPU-2-2

Визначення пробуксовування коліс відбувалося шляхом порівняння величин швидкості руху КМ теоретичної і дійсної частоти обертання ведучих коліс (рис. 3) за допомогою безконтактного лазерного цифрового тахометра UNI-T UT373 [15].



Рис. 3. Тягові випробування на базі автомобіля «Мамай» та трактора Mahindra Feng Shou FS244

Fig. 3. Traction tests based on the Mamai car and the Mahindra Feng Shou FS244 tractor

Дані результатів експерименту та імітаційного комп'ютерного моделювання в середовищі MATLAB Simulink подані у вигляді графіка (рис. 4).

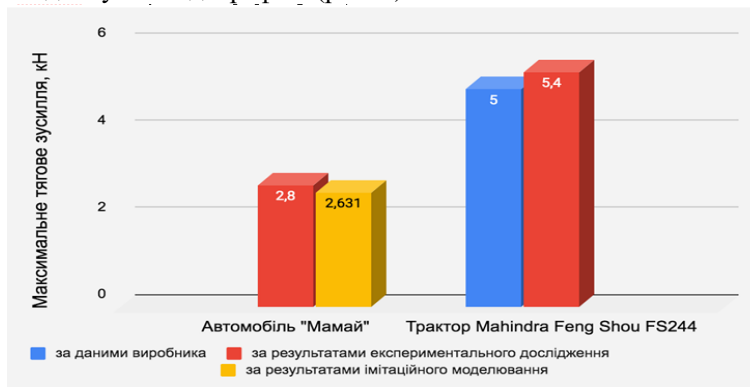


Рис. 4. Графік порівняння отриманих результатів
Fig 4. Chart of obtained results comparison

У ході проведених експериментальних досліджень підтверджено коректність структури та стійкість розробленої імітаційної моделі за умови зміни початкових умов моделювання, таких як параметри силового приводу, зміна кінематичних показників, механічні характеристики опорної поверхні.

Висновки. Дані, отримані в ході досліджень, формують вихідні умови для подальшого обґрунтування параметрів та виготовлення колісних машин. Під час досліджень встановлено:

1) найбільш оптимальним за швидкістю і вартістю є емпіричний метод комплексної оцінки несучої здатності опорної поверхні, що базується на визначенні конусного індексу (CI) за допомогою портативного електронного пенетрометра, який забезпечує належну точність і швидкість збору даних на значних площах.

2) достовірність теоретичних припущень підтверджують результати експериментальних досліджень на прикладі трактора Mahindra Feng Shou FS244, оскільки тягове зусилля відповідає заявленому виробником значенням;

3) пропонується імітаційна комп'ютерна модель руху КМ адекватна, про що свідчать: збіжність результатів експериментальних досліджень та імітаційного моделювання руху в середовищі MATLAB Simulink на прикладі автомобіля «Мамай»; збіжність результатів імітаційного моделювання та вже наявних експериментальних даних на прикладі колісного трактора Т-150К.

Бібліографічний список

1. Бугара В. А., Ватуля Н. Н., Вайнштейн Л. А., Коваль І. А., Левітанус А. Д., Огий Г. Є. Довідник по тракторах Т-150 і Т-150К; за ред. професора Б.П. Кашуби. Вид. друге, перероблене і доповнене. Харків: Прапор, 1975. 401 с.

2. Грубель М.Г., Крайник Л. В., Купріненко О. М. Методологія оцінки опорної прохідності колісної військової автомобільної техніки. *Озброєння та військова техніка*. 2019. № 4. С. 22–31.

3. Грубель М. Г., Крайник Л. В., Хома В. В. Імітаційне моделювання руху колісної військової автомобільної техніки бездоріжжям та оцінка його адекватності. *Науково-виробничий журнал «Автошляховик України»*. Київ, 2020. № 2. С. 21–28.

4. Грубель М. Г., Фтемов Ю. О., Хома В. В. Експериментальні дослідження параметрів опорної прохідності зразків колісної військової автомобільної техніки. *Науково-технічний журнал «Системи озброєння та військова техніка»*. Харків: Харківський НУПС, 2019. № 4 (60). С. 7–15.

5. ДПУ-2-2-В1 2 т (20 кН) динамометр URL: <https://zapadpribor.com/ua/dpu-2-2-v1-2-t-20-кн/> (дата звернення: 06.09.2024).

6. Крайник Л. В., Худавердян Г. А. Концепція та формування вітчизняного універсального автомобіля типу автотрак/унімог для фермерських та комунальних господарств. *Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту: тези доповідей X-ї Міжнар. науково-технічної інтернет-конференції* (м. Вінниця, 14-15 квітня 2022 р.). Вінниця: ВНТУ, 2022. С. 178–180.

7. Погорілий С. П. Результати експериментальних досліджень тягових показників мобільного сільськогосподарського агрегату, сформованого на базі автомобільного шасі. *Механізація та електрифікація сільського господарства : загальнодержавний збірник* 2017. Вип. 5 (104). С. 263–268.

8. Погорілий С. П. Результати експериментальних досліджень МЕЗ-330 «Автотрактор» з плугом ПНН-5-40. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарського*

рських машин : загальнодержавний міжвідомчий тематичний збірник. 2017. Вип. 47, Част. II. С. 227–231.

9. Худавердян Г. А., Хома В. В. Технологічні процеси обробітку ґрунту: комп'ютерне моделювання. *Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем*: матеріали III Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції (м. Рівне, 19–20 жовтня 2022 р.). Рівне: НУВГП, 2022. 301 с. Електронне видання. С. 299–301.

10. Худавердян Г. Формування технологічного обладнання тягово-транспортної машини категорії T1/N1 в АПК. *Вісник Львівського національного університету природокористування. Серія «Агроінженерні дослідження»*. 2023. № 27. С. 18–21. <https://doi.org/10.31734/agroengineering2023.27.018>.

11. Худавердян Г., Хома В., Крайник Л. Імітаційне моделювання руху полем повнопривідної колісної техніки у програмному середовищі MATLAB Simulink. *Вісник Львівського національного університету природокористування. Серія «Агроінженерні дослідження»*. 2023. № 26. С. 164–170. <https://doi.org/10.31734/agroengineering2022.26.164>.

12. Шевчук Р. С., Сукач О. М., Миронюк О. С., Шевчук В. В. Обґрунтування та апробація методики визначення тягово-зчіпних показників автомобілів. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. 2024. Том 29. С. 179–190.

13. Щільномір для ґрунту ЛАН-М PRO з функцією GPS. URL: <https://spectrolab.com.ua/ua/p1201734994-plotnomer-dlya-pochvy.html> (дата звернення: 06.09.2024).

14. Mahindra Feng Shou FS244 URL: <https://am.ua/uk/traktor-mahindra-feng-shou-fs244-new/?srsltid=AfmBOooMMfNLU NQAWOCTKn gYr2Jy2Vu65IZUBPZN5Z8jPDI0n4BJc5G> (дата звернення: 07.09.2024).

15. UT373 Mini Tachometer – UNI-T Meters Test & Measurement Tools and Solutions URL: <https://meters.uni-trend.com/product/ut373/> (дата звернення: 08.09.2024).

16. Wong Y. C. D., Lim H. H. S, Chan W. Q. W. An assessment of land vehicles trafficability. *DSTA HORIZONS*. 2016. P. 54-63. URL: <https://www.dsta.gov.sg/docs/default-source/dstaabout/an-assessment-of-land-vehicles-trafficability.pdf?sfvrsn=2/> (дата звернення: 07.09. 2024).

17. Wong Y. J. *Terramechanics and off-road vehicle engineering*. Second ed. London: Butterworth–Hannemann, 2010. 482 p.

Стаття надійшла 18.09.2024