

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНІЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

Мусаєв Заур Разилович 

УДК 621.86.032

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ КОРОТКОБАЗОВИХ
КОЛІСНИХ НАВАНТАЖУВАЧІВ У ТРАНСПОРТНОМУ РЕЖИМІ**

05.05.05 – Піднімально-транспортні машини

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі будівельних і дорожніх машин ім. А.М. Холодова Харківського національного автомобільно-дорожнього університета Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент

Єфименко Олександр Володимирович

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, доцент кафедри будівельних та дорожніх машин ім. А. М. Холодова, м. Харків

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор

Суглобов Володимир Васильович

Приазовський державний технічний університет, декан факультету машинобудування та зварювання, м. Маріуполь

кандидат технічних наук, доцент

Козар Леонід Михайлович

Український державний університет залізничного транспорту, доцент кафедри будівельних, колійних та вантажно-розвантажувальних машин, м. Харків

Захист відбудеться 06 лютого 2020 року в 11⁰⁰ на засіданні спеціалізованої вченої ради К 64.059.05 у Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті за адресою: 61002, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Харківського національного автомобільно-дорожнього університету за адресою: 61002, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

Автореферат розісланий 23 грудня 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Кандидат технічних наук, доцент



О. І. Іваненко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Обсяги робіт у будівництві, що постійно зростають, визначають необхідність поряд з машинами середнього й важкого класу випуск малогабаритних машин багатопільового призначення, що дозволяють істотно знизити частку ручної праці. Короткобазові навантажувачі (КБН) з бортовим поворотом і гід्रोоб'ємною трансмісією є найбільш представницькими за числом моделей, що випускаються (більше 140), і мають широку номенклатуру змінних робочих органів (більше 70 найменувань). Завдяки універсальності, економічності, високій мобільності та маневреності, а також простоті керування в сполученні зі швидкою зміною робочих органів, КБН служать високоефективним засобом механізації ручної праці. Понад 25 фірм США, Великобританії, Німеччини, Японії, Канади, Італії, Словаччини та Китаю виробляють КБН як для внутрішнього, так і для зовнішнього ринку. Їхній річний випуск становить близько 100 тис. машин (80 % припадає на частку США, де в будівництві використовується приблизно 30 % КБН). В Україні виробництвом КБН займаються такі підприємства, як ТОВ «Цепелін Україна», Бердянський завод сільськогосподарської техніки КБ «Альфа», ООО «ХЗСДКМ» та інші.

Вітчизняний і закордонний досвід використання малогабаритних машин свідчить про їх недостатню стійкість, особливо якщо мова йде про транспортні операції. Так, на ГПУ «Полтавагазовидобування» внаслідок часткової втрати стійкості у процесі виконання транспортних операцій машини не відпрацьовували свій заявлений строк експлуатації. Внаслідок цього експлуатаційна продуктивність даного класу машин значно нижче заявленої, отже виникає проблема підвищення ефективності КБН за рахунок використання систем автоматизації керування машин у транспортному режимі. Використання автоматизованих систем дозволить підвищити керованість КБН під час виконання транспортних операцій з вантажем та без нього. З іншого боку, подібні рішення вимагають розгляду процесу взаємодії рушіїв КБН з опорною поверхнею, математичного моделювання машини та її алгоритмізації під час виконання транспортних операцій, оскільки ці параметри є необхідними для розробки систем керування. Таким чином, створення адаптивних систем автоматичного керування КБН являє собою актуальну науково-технічну проблему, рішення якої має важливе господарське значення для будівельної галузі.

Мета й завдання дослідження.

Мета роботи – підвищення ефективності експлуатації КБН за рахунок забезпечення стійкості їх руху з урахуванням взаємодії машини з опорною поверхнею для подолання перешкод на робочих ділянках шляхом автоматизації.

Для досягнення визначеної мети поставлені наступні задачі:

1. Провести аналітичний огляд сучасної літератури й досвіду експлуатації КБН щодо його стійкості;

2. Розробити математичні моделі КБН під час переїзду через перешкоду;

3. Провести імітаційне моделювання КБН за допомогою сучасних програмних засобів;

4. Провести експериментально-польові випробування КБН з метою оцінки адекватності математичного моделювання та встановити кореляцію результатів теоретичних розрахунків із результатами експериментальних досліджень;

5. На основі експериментальних, імітаційних та теоретичних досліджень розробити практичні рекомендації щодо встановлення раціональних параметрів КБН під час виконання ним транспортних операцій;

6. Запропонувати методологічний підхід до вирішення проблеми стійкості руху навантажувача у транспортному режимі за рахунок впровадження системи автоматизованого керування;

7. Провести техніко-економічне обґрунтування доцільності використання розробленої системи керування.

Об'єкт дослідження – процеси руху КБН під час переїзду через одиночну перешкоду.

Предмет дослідження – закономірності, що пов'язують показники стійкості КБН з геометричними параметрами навантажувача, змінною швидкістю машини та висотними координатами нерівності.

Методи дослідження – проведені теоретичні дослідження з використанням класичних методів скінченних елементів, комп'ютерного моделювання механічних систем з урахуванням законів взаємодії рушія з опорною поверхнею під час переїзду через перешкоду, статистичної обробки даних експерименту.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше за допомогою математичної моделі встановлено залежності між геометричними та вантажними параметрами навантажувача, висотою перешкоди і змінною швидкістю машини;

2. За допомогою проведених експериментальних досліджень встановлено закономірності зміни положення центру мас КБН в залежності від швидкісних та вантажних характеристик машини;

3. За допомогою комп'ютерної моделі встановлено адекватність імітаційного моделювання та доцільність його використання в наукових дослідженнях, пов'язаних із динамічними процесами будівельних та дорожніх машин;

4. Набув подальшого розвитку принцип автоматизованого керування режимами руху навантажувача за рахунок розповсюдження його на новий клас об'єктів.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Програмна реалізація імітаційних моделей транспортних процесів КБН дозволяє проводити обчислювальні експерименти для оцінки динамічних характеристик КБН, а також використовувати імітаційні моделі, як об'єкт керування на перших етапах проектування систем автоматизації

транспортних процесів і скоротити витрати на проведення високовартісних натурних експериментів.

2. Розроблено вимірювальний комплекс, який містить комплект датчиків, аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) та інш., ПЕОМ, що дозволяє автоматизувати процес збору експериментальних даних;

3. Здійснено програмну реалізацію алгоритмів функціонування систем керування транспортними процесами КБН.

4. Результати роботи впроваджені в ГПУ «Полтавагазовидобування», де вони одержали позитивну оцінку з можливістю використання отриманих рекомендацій щодо підвищення ефективності роботи даного класу машин. Результати використовуються у навчальному процесі при підготовці бакалаврів за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування» з дисципліни «Моделювання робочих процесів будівельних і дорожніх машин (БДМ) та оптимальне проектування» в Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті.

Особистий внесок здобувача. Теоретичні й експериментальні результати дослідження, що наводяться в самостійно опублікованих статтях [6;7] отримано особисто автором.

У наукових працях, опублікованих у співавторстві здобувачеві належать:

- розробка математичної моделі процесу переїзду малогабаритним навантажувачем через перешкоду [10];
- обґрунтування показника стійкості КБН у транспортному режимі [13];
- визначення нелінійних залежностей взаємодії пневматичного колеса з опорною поверхнею [9];
- кореляція результатів комп'ютерного моделювання з результатами експериментальних досліджень [7];
- оцінка навантаженості металоконструкції робочого обладнання, на ходових колесах і в гідроприводі [2].

Апробація дисертаційної роботи. Матеріали дисертації обговорено на 4 міжнародних конференціях: на 7-й, 8-й та 9-й міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми розвитку транспорту і логістики» (м. Одеса, 2017 – 2018 рр.), 13-му міжнародному симпозіумі українських інженерів механіків у Львові (м. Львів, 2017 р.). У повному обсязі матеріали дисертаційної роботи обговорювалися на засіданні Підйомно-транспортної академії наук України, та на розширеному засіданні кафедри будівельних та дорожніх машин ім. А. М. Холодова Харківського національного автомобільно-дорожнього університету (ХНАДУ).

Публікації. За результатом виконаних досліджень опубліковано 14 друкованих праць, серед яких статей в спеціалізованих наукових журналах, що входять до переліку МОН України – 6 (дві з яких одноосібні), 1 стаття в зарубіжному виданні, отримано 2 патенти України на корисну модель, 5 публікацій у збірниках наукових праць за матеріалами науково-технічних конференцій.

Структура й обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 178 сторінок, у тому числі: 152 сторінок основного тексту, 42 рисунки, 10 таблиць, список використаних джерел зі 148 найменувань на 15 сторінках та 2 додатки на 9 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність та доцільність дисертаційної роботи, сформульовано її мету і задачі, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів.

У **першому розділі** «Огляд досліджень щодо динамічної стійкості короткобазових навантажувачів. Мета та завдання дослідження» розглянуто основні проблеми стійкості малогабаритних навантажувачів при виконанні транспортних операцій. Особлива увага приділена роботам, в яких використано числові та ймовірнісні методи з вагомим експериментальним супроводом.

Питанням динамічної стійкості колісних ковшових навантажувачів класичної компоновки присвячено значну кількість робіт. Оцінка статичної та поздовжньої стійкості машин здійснюється згідно з вимогами нормативних документів щодо випробувань навантажувачів. В. М. Векслер і Т. І. Муха на додаток до розрахунку статичної стійкості запропонували враховувати процес динамічного гальмування робочого обладнання під час його опускання, пружні властивості ходових коліс та опорної поверхні. У роботах професора А. М. Холодова, окрім поздовжньої, розглянута також поперечна стійкість ковшового навантажувача. Проблемами поздовжньої стійкості при подоланні одиничної нерівності займалися Л. В. Назаров, Л. В. Разарьонов, Амашех Насер та ін. З'їзд гусеничного навантажувача з перешкоди досліджено в роботах Ю. Г. Беренгарда, М. М. Гайцгорі. Моделювання динаміки вантажопідйомних машин використовується в роботах Ловейкіна В.С., Суглобова В.В., Нефьодова І. О. Авторами запропоновані засоби зменшення динамічних навантажень на вантажопідйомник фронтального навантажувача.

В роботах професорів А. М. Холодова, В. В. Нічке та Л. В. Назарова зроблено спробу оцінювання стійкості навантажувачів та землерийно-транспортних машин під час руху з урахуванням інерційних сил. В одному з випадків розглядається поздовжня стійкість машини (на прикладі бульдозера) під час її гальмування. Встановлено граничний кут нахилу опорної поверхні, за якого забезпечується коефіцієнт запасу стійкості не менш 1,2. Аналіз характеристик вітчизняних та іноземних КБН, проведений нами в дисертаційній роботі, показує, що коефіцієнт запасу статичної стійкості в іноземних аналогів значно вище, ніж у вітчизняних зразків (2,0 порівняно з 1,8).

Аналіз робіт вчених показує, що в їх дослідженнях розглядається, головним чином, стійкість самохідних пневмоколісних машин у русі та в процесі гальмування з урахуванням дії на них сил у поздовжній, горизонтальній, вертикальній площинах, а також під час розвороту. Однак, процеси транспортного режиму руху КБН, втрата стійкості машини потребують подальшого вивчення. Це пов'язано зі складністю процесу взаємодії коліс із опорною поверхнею (наприклад при переїзді через одиночну перешкоду), а також з конструктивними особливостями машин даного типу.

За результатами огляду досліджень у сфері динамічної стійкості як КБН, так і подібних машин, можна зробити висновок про те, що процес утрати стійкості при подоланні одиночної перешкоди потребує додаткового розгляду. У більшості наукових праць, присвячених дослідженням взаємодії машин з опорною поверхнею, подібні питання розглядалися стосовно автомобільної техніки, що за своїми конструктивними особливостями значно відрізняється від КБН.

Підсумовуючи аналіз виконаних досліджень у сфері динаміки навантажувальних та інших подібних машин, слід зазначити, що в даному дисертаційному дослідженні можуть бути використані лише окремі їх результати. Поширити запропоновані раніше розрахункові схеми та їх математичний опис на дослідження стійкості КБН не видається можливим.

У **другому розділі** «Математичне моделювання процесу подолання одиночної перешкоди короткобазовим навантажувачем» обґрунтовано принципи побудови математичної моделі в середовищі MathCad та пакетах статистичної обробки даних.

У наших дослідженнях використано методи аналізу та узагальнення літературних джерел з досліджуваного питання, інформаційних технологій, специфічні математичні, логічні, графічні та методи статистичного аналізу, системи автоматизованого проектування MathCad, Kompas 3D, а також методи регресивного аналізу й апроксимації експериментальних даних, математичної статистики.

У розділі також подані теоретичні обґрунтування і розрахункові схеми, які описують процес переїзду КБН через одиночну перешкоду. Процес подолання одиночної перешкоди характеризувався початковим і основним етапами. На початковому етапі здійснювалося зіткнення навантажувача з перешкодою без відриву переднього колеса від опорної поверхні, на основному етапі враховувався відрив передніх коліс від опорної поверхні з подальшим наїздом і з'їздом з нерівності.

У даній дисертаційній роботі за критерій поздовжньої стійкості КБН обрано кут відхилення центру мас навантажувача відносно вертикалі, яка проходить через вісь ходових коліс (Рис. 1).

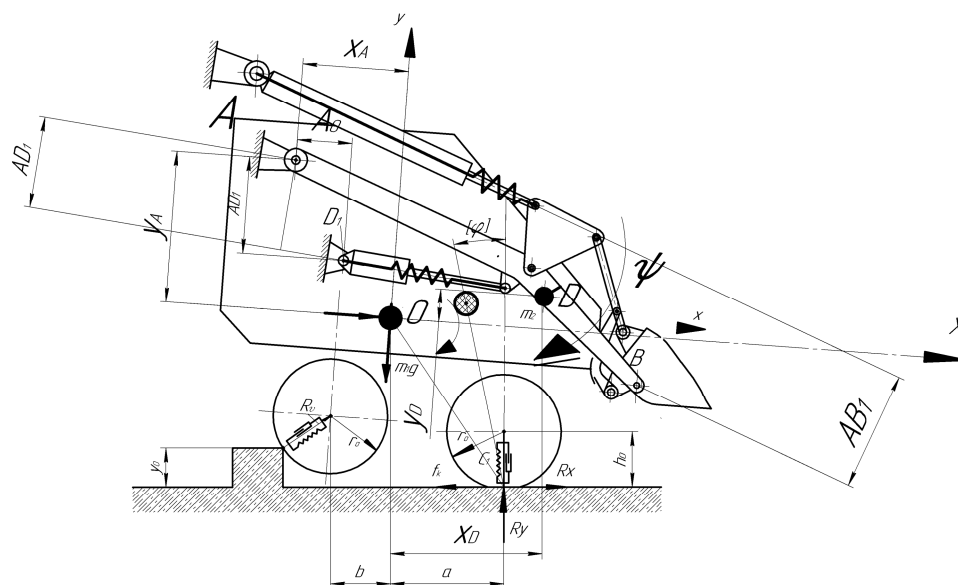


Рис. 1 – Схема взаємодії КБН з одиничною перешкодою

При розробці математичної моделі навантажувача прийнято наступні допущення:

- опорна поверхня – асфальтобетон, при цьому поперечні зусилля на ходових колесах обмежені зчіпними якостями рушіїв з опорною поверхнею;
- подолання колесами навантажувача перешкоди здійснюється перпендикулярно до ребра перешкоди, при цьому вплив сил на колеса в бічному напрямку відсутній (отже розглядається плоска задача);
- деформація опорної поверхні та перешкоди не враховується;
- контакт коліс навантажувача з ребром перешкоди розглядається як точковий, реакція в точці контакту спрямована до центра колеса;
- висота перешкоди не перевищує статичний радіус колеса;
- залежність деформації шин від реакції R_0 на ребрі перешкоди й від реакції R_y на плоскій опорній поверхні приймаються лінійними;
- проковзування шин на ребрі перешкоди відсутнє, тангенціальна деформація шин не враховується.

Поступальне переміщення навантажувача в напрямку координатних осей X і Y , що проходять через центр мас навантажувача, описуються наступними диференціальними рівняннями:

$$(m_1 + m_2)\ddot{x} + m_2 y_A \ddot{\phi} + m_2 (y_D - y_A) \ddot{\psi} = R_{x1} + R_{x2} - (Rv \sin v) + (R\tau \cos v); \quad (1)$$

$$(m_1 + m_2)\ddot{y} - m_2 x_A \ddot{\phi} - m_2 (x_D - x_A) \ddot{\psi} = -G + R_{x1} + R_{x2} + Rv \cos v + R\tau \sin v; \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & m_2 y_A \ddot{x} - m_2 x_A \ddot{y} + [m_2 (x_A^2 + y_A^2) + J_1 + J_2] \ddot{\phi} + \\ & + [m_2 x_A (x_D - x_A) + m_2 y_A (y_D - y_A) + J_2] \ddot{\psi} = \\ & = -a \cdot R_{x1} + b \cdot R_{x2} + (-Rv \sin v + R\tau \cos v) \cdot (Y_0 - y_0 + y) \cdot \phi - \\ & - R_{x1} \cdot (Y_0 + y) \cdot \phi + R_{x2} \cdot (Y_0 + y) \cdot \phi; \end{aligned} \quad (3)$$

$$m_2(y_D - y_A)\ddot{x} - m_2(x_D - x_A)\ddot{y} + [m_2x_A(x_D - x_A) + m_2y_A(y_D - y_A) + J_2]\ddot{\phi} + \\ + [m_2(y_D - y_A)^2 + m_2(x_D - x_A)^2 + J_2]\ddot{\psi} = \psi \cdot (AD_1)^2 \cdot C_3. \quad (4)$$

де x і y – відповідно поточні горизонтальні й вертикальні координати центра мас навантажувача;

a – відстань від початкового положення центру мас КБН до осі передніх коліс;

b – відстань від початкового положення центру мас КБН до осі задніх коліс.

ϕ – поточний кут нахилу поздовжньої осі КБН;

m_1, m_2 – маси остова та робочого обладнання КБН відповідно;

R_v і R_τ – відповідно радіальна й тангенціальна реакції в контакті i -го колеса з перешкодою;

r_v – відстань від ребра перешкоди до осі колеса, що долає перешкоду;

AD_1 – відстань від осі гідроциліндра підйому стріли до точки кріплення стріли до остова навантажувача;

y_A – відстань від центра мас навантажувача до точки кріплення стріли до остова машини;

y_D – відстань від центру мас робочого обладнання до початку координат по осі y ;

ψ – поточний кут нахилу стріли КБН;

x_A – відстань від початку координат до точки кріплення стріли навантажувача по осі x ;

x_D – відстань від центру мас робочого обладнання до початку координат по осі x ;

Y_0 – висота розташування центра мас навантажувача;

y_0 – висота перешкоди.

За результатами моделювання отримано залежність переміщення центру мас КБН від часу (Рис. 2), з якої видно як це переміщення змінюється в залежності від взаємодії коліс КБН з перешкодою.

Як зазначалося раніше, критерієм поздовжньої стійкості КБН є кут відхилення центру мас відносно вертикалі, яка проходить через вісь ходових коліс (Рис. 3).

Виявлено, що найбільш небезпечний випадок – це з'їзд навантажувача з перешкоди під час подолання останньої задніми колесами, при цьому кут ϕ досягає критичної відмітки у 28° (при $m=0$ кг), 26° (при $m=600$ кг), 22° (при $m=1200$ кг).

У **третьому розділі** «Комп'ютерне моделювання переїзду короткобазового навантажувача через одиночну перешкоду» запропоновано вирішення даної задачі за допомогою сучасних програмних комплексів. Опис моделі здійснювався за допомогою існуючих комп'ютерних пакетів (Рис. 4), та їх чисельних методів.

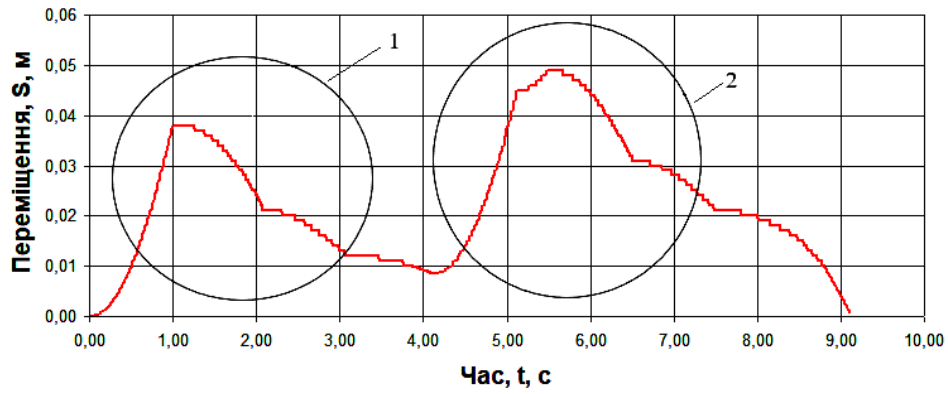


Рис. 2 – Осцилограма взаємодії передніх та задніх коліс КБН з перешкодою:
 1 – переміщення центру мас по осі y при взаємодії передніх коліс з перешкодою;
 2 – переміщення центру мас по осі y при взаємодії задніх коліс з перешкодою

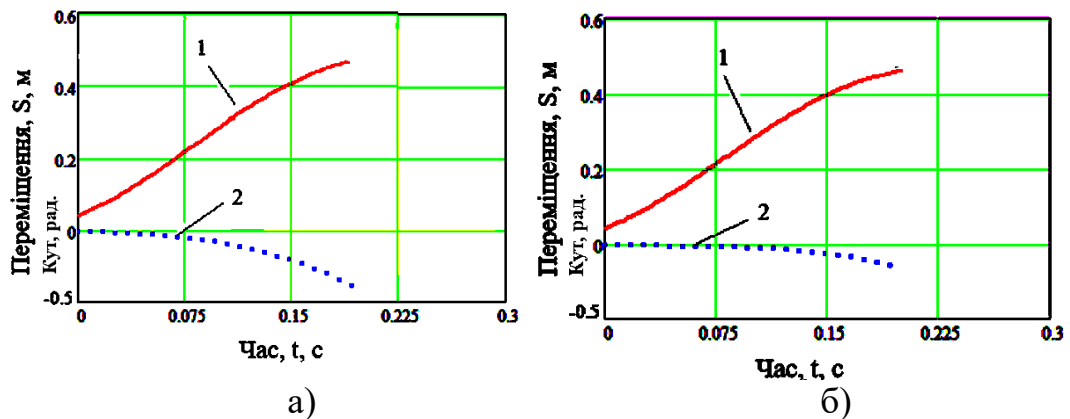


Рис. 3 – Залежність критерію стійкості навантажувача від часу при взаємодії задніх коліс з перешкодою: а) при масі вантажу 600 кг; б) при масі вантажу 1200 кг;
 1 – переміщення центру мас КБН по вертикалі;
 2 – кут відхилення центру мас КБН відносно вертикалі, яка проходить через вісь ходових коліс



Рис. 4 – Малогабаритний навантажувач ПМТС 1200
 а) комп'ютерна модель; б) натурна машина

За допомогою сучасних методів комп'ютерного моделювання отримано осцилограму переміщень центру мас КБН у вертикальному напрямку (Рис. 5).

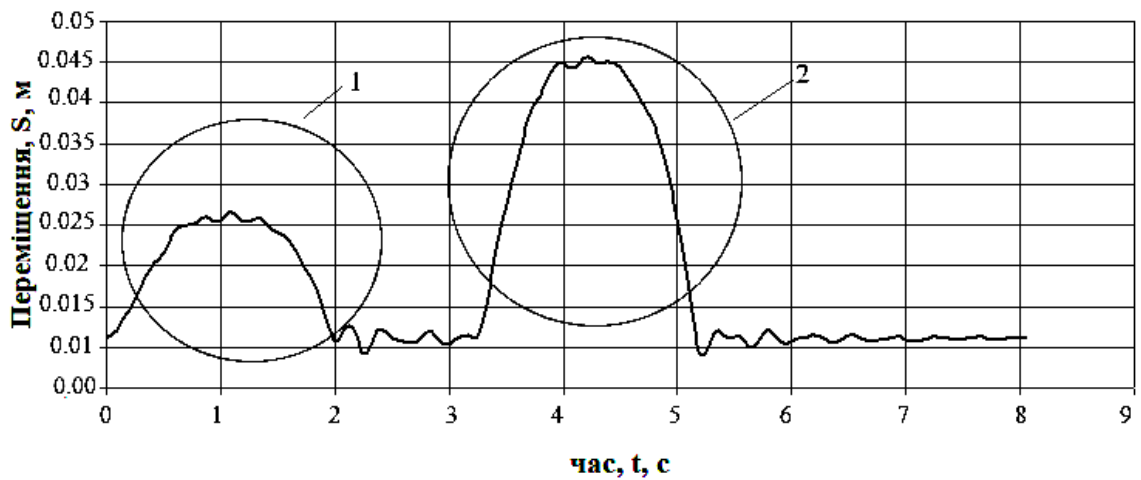


Рис. 5 – Осцилограма переміщення центру мас КБН по осі у:
1 – взаємодія передніх коліс навантажувача з перешкодою; 2 – взаємодія задніх коліс навантажувача з перешкодою

Розроблена комп'ютерна модель повністю відповідає своєму реальному прототипу та складається із 93 елементів. Виявлено переваги імітаційного моделювання та за допомогою розроблених моделей КБН знайдено залежності показника стійкості машини від швидкості при різних висоті робочого обладнання (Рис. 6).

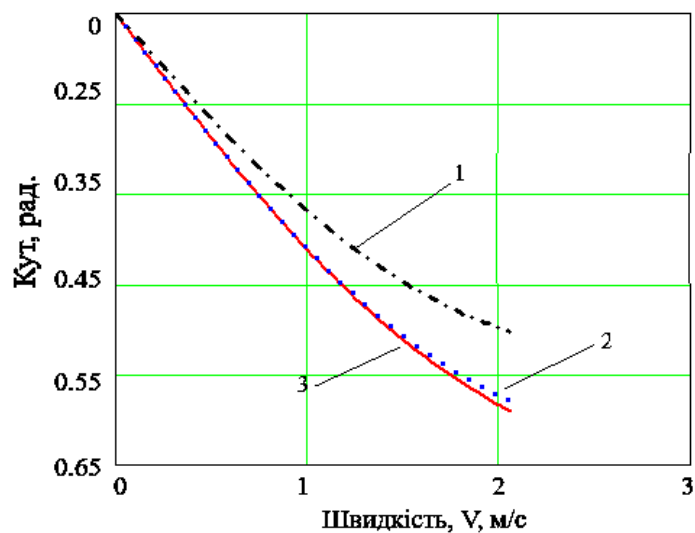


Рис. 6 – Залежність показника стійкості КБН від швидкості при піднятому робочому обладнанні на 1,25 м (1), на 1,75 м (2), на 2,25 м (3)

Для оцінки вірогідності отриманих результатів здійснювалося узгодження віртуальних і математичних даних. Для підтвердження правильності ухвалених рішень прийнято критерій Пірсона χ^2 (Рис. 7).

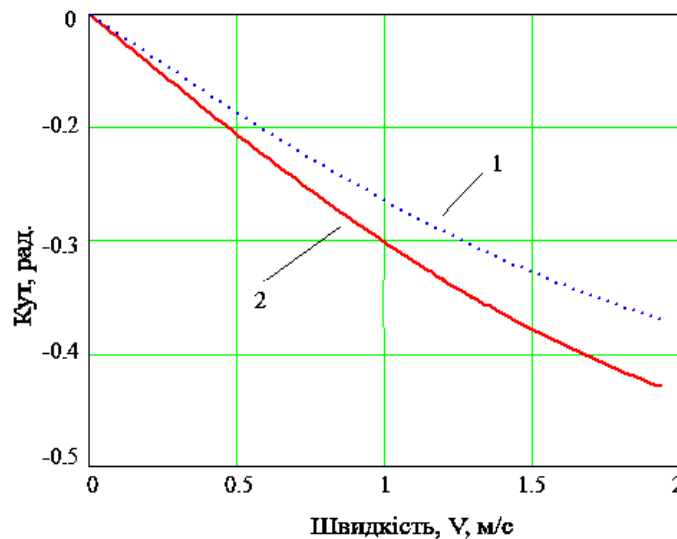


Рис. 7 – Залежність показника стійкості КБН від швидкості при з'їзді його задніх коліс з перешкоди:

1 – дані комп'ютерного моделювання; 2 – дані математичного моделювання

При порівнянні комп'ютерних даних з даними математичного моделювання, виявилося, що ймовірність їх збігу дорівнює $P(\chi^2, q) = 0,82$, тобто це свідчить про достатню збіжність результатів і відповідає критерію Пірсона на 82 %.

У **четвертому розділі** «Експериментальне дослідження процесу подолання короткобазовим навантажувачем одиночної перешкоди» описано натурну модель короткобазового навантажувача ПМТС 1200. Експериментальні дослідження спрямовано на верифікацію теоретичних положень і результатів розрахункових досліджень, представлених у дисертації. Основною метою експериментальних досліджень була перевірка теоретичного положення про підвищення показників поздовжньої стійкості КБН при подоланні одиночної перешкоди.

Експериментальні дослідження проведено на навчально-виробничій базі Харківського національного автомобільно-дорожнього університету (ХНАДУ) у м. Харків у період з 2015 по 2018 р. (Рис. 8).

Програма проведення експериментальних досліджень передбачала такі етапи:

- проведення статичних випробувань навантажувача для визначення зведеної маси й зусиль на провідних осях, опору коченню машини і коефіцієнта зчеплення рушіїв з опорною поверхнею;
- проведення серії експериментів у транспортному режимі руху машини;
- встановлення експериментальних залежностей формування динамічних навантажень на провідних осях, металоконструкції та в гідросистемі робочого обладнання при подоланні машиною одиночної перешкоди з варіюванням швидкості, висоти розташування вантажу і його маси;

– проведення кореляції результатів експериментальних даних з розрахунковими показниками для підтвердження адекватності запропонованої динамічної моделі навантажувача.

Методичний аналіз, яким супроводжувався вибір вимірювальної апаратури, виконувався з урахуванням наступних основних факторів:

– відповідність виміру діапазонів датчиків і фіксуєчої апаратури, узгодження їх з максимальним навантаженням на машину;

– всі прилади використано відповідно до правил, які приводяться у керівництвах з експлуатації виробів. Чутливість до вібрацій, температурних і вологісних впливів перебуває у межах допустимих значень, при цьому забезпечується зручність монтажу, підключення, налагодження, отримання даних, обслуговування, простота регулювання і контролю показників.



Рис. 8 – Загальна схема розташування вимірювальної апаратури на навантажувачі

Програмою випробувань передбачалося фронтальне подолання перешкоди (під кутом 90° до нього) переднім ходом із варіюванням швидкості, достатньої для подолання перешкоди без зупинки, без різких прискорень на трьох рівнях.

У процесі пробних заїздів оцінювалися стійкість випробувального спорудження, можливість виїзду КБН після проходження перешкоди без додаткових маневрів, працездатність вимірювальної апаратури й безперервність запису сигналів датчиків у ході заїзду в умовах динамічних навантажень і т. д.

В результаті обробки експериментальних даних встановлено зміни періоду основної форми коливань навантажувача залежно від швидкості й маси матеріалу в ковші. Швидкість і місткість ковша навантажувача

варіювалися на трьох рівнях, максимальна швидкість досягала 2,2 м/с, а мінімальна 0,4 м/с.

Оцінка адекватності математичної моделі натурної машини виконувалася за критерієм Пірсона. Розрахунок було виконано у програмному середовищі Mathcad (Рис. 9).

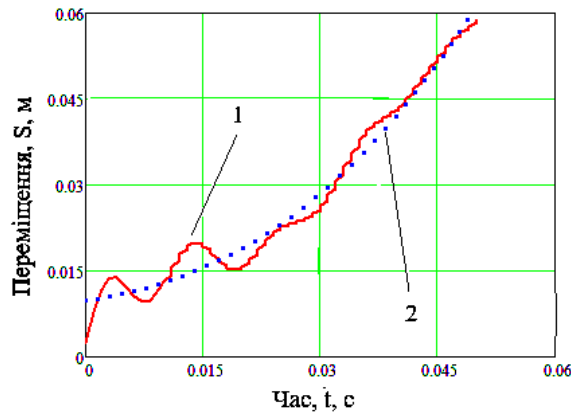


Рис. 9 – Залежність переміщення центру мас навантажувача від часу:
1 – крива даних експериментального дослідження; 2 – крива даних математичного моделювання

При зіставленні експериментальних даних з даними математичного моделювання виявилось, що ймовірність їхнього збігу складає $P(\chi^2, q) = 0,84$.

Порівняння експериментальних даних з даними математичного моделювання свідчить про достатню збіжність результатів і відповідає критерію Пірсона на 84 %.

Результати порівнянь виявились задовільними, що дало змогу підтвердити коректність математичної моделі та програми для її дослідження.

У п'ятому розділі «Розробка автоматизованої системи керування короткобазових навантажувачів для підвищення їх стійкості» розглядається методика підвищення ефективності роботи КБН, яка полягає в створенні автоматизованої системи керування. За даною методикою визначаються параметри, за яких забезпечується стійкість КБН при переїзді через одиничну нерівність із оцінкою умов можливої її втрати.

Методика пропонується вперше й базується на результатах досліджень, виконаних у дисертації. Її доцільно використовувати на стадії розробки технічного завдання та при проектуванні навантажувачів розглянутого типу. За результатами дисертаційного дослідження встановлено, що рекомендовані значення транспортних швидкостей повинні знаходитися в межах, зазначених у таблиці 1.

Таблиця 1 – Рекомендовані значення транспортних швидкостей КБН

Маса вантажу Q, кг	Діапазон швидкості руху навантажувача
400	менше або дорівнює 1,2 м/с
800	менше або дорівнює 1 м/с
1200	менше або дорівнює 0,8 м/с

Аналіз показав, що швидкості робочих переміщень усіх короткобазових машин коливаються від 11 км/год до 13 км/год при русі вперед і до 9,0 км/год при русі заднім ходом, а прискорення розгону може збільшуватися у 1,4 рази в порівнянні із прискорення гальмування.

За результатами досліджень отримано залежності впливу швидкісних, вантажних та конструктивних характеристик КБН на критерій його динамічної стійкості (Рис. 10). Виявилося, що найбільше на критерій стійкості КБН впливає положення його робочого обладнання.

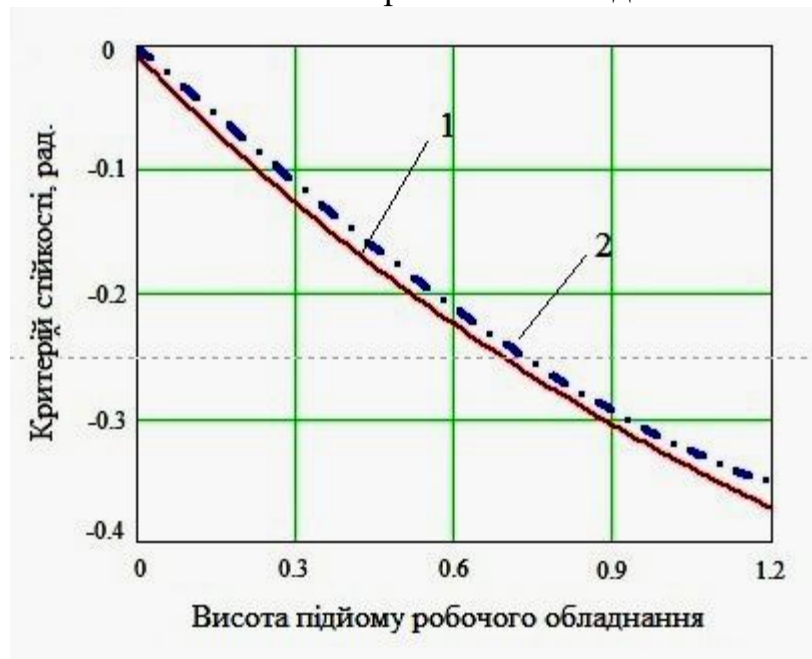


Рис. 10 – Залежність впливу висоти підйому робочого обладнання КБН на критерій його стійкості: 1 – крива даних дослідження; 2 – крива рівняння апроксимації.

Для автоматизації транспортного режиму навантажувача потрібно задати системі необхідні умови, які можна сформулювати наступним рівнянням:

$$f_i = F_0 + e^{(F_1 \cdot X_i)} + F_2, \quad (5)$$

де F_0 , F_1 , F_2 – постійні коефіцієнти рівняння апроксимації;

X_i – значення критерія стійкості КБН.

Для оцінки вірогідності отриманих результатів здійснювалося узгодження даних дослідження з рівнянням апроксимації (5). Для підтвердження правильності ухвалених рішень прийнятий критерій Пірсона χ^2 .

При зіставленні даних дослідження з даними рівняння апроксимації виявилось, що ймовірність їх збігу становить $P(\chi^2, q) = 0,906$.

Порівняння експериментальних даних з кривою рівняння апроксимації, свідчить про достатню збіжність результатів і відповідає критерію Пірсона на 90 %. Отримане рівняння можна використовувати для будь-якої моделі КБН, за винятком коефіцієнтів, які є різними для окремо взятих машин.

В роботі розроблено фізичну модель з системою керування, яка автоматично знижує швидкість машини до рекомендованої в залежності від висоти перешкоди та відстані до неї (Рис. 11).

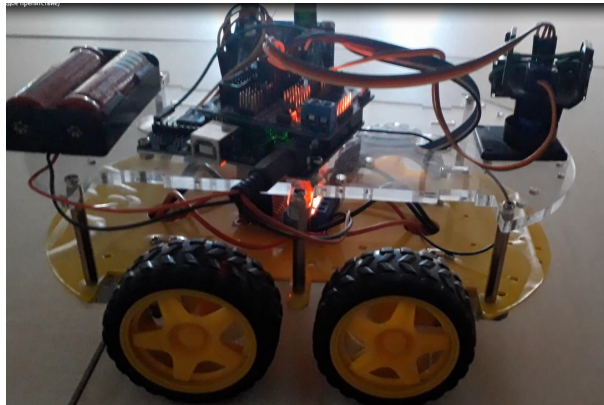


Рис. 11 – Фізична модель навантажувача з використанням автоматизованої системи керування

Фізичну модель побудовано на апаратній платформі Arduino UNO, яка зображена на рисунку 12, на базі мікроконтролера Atmega 328. Це відкрита програмувальна апаратна платформа для роботи з різними фізичними об'єктами і являє собою базову плату з мікроконтролером, а також спеціальне середовище розробки для написання програмного алгоритму.

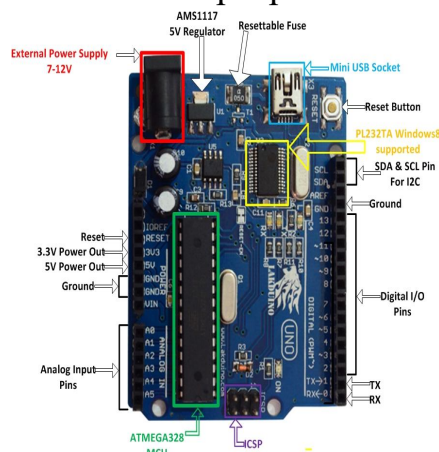


Рис. 12 – Схема плати Arduino UNO

Система для фізичного моделювання процесу складалася з Arduino UNO R3; шасі (або датчики положення коліс), Wheel Drive Mobile Robot Platform Smart Car Chassis Arduino Compatible; моторів постійного струму з обертанням в обидві сторони; плати для керування DC моторами Motor Drive Shield L293D; ультразвукового вимірювача відстані HC-SR04 Ultrasonic Module Distance Measuring Senso.

На підставі результатів дослідження отримано практичні рекомендації що до підвищення ефективності роботи КБН у транспортному режимі із використанням датчиків і алгоритмів керування.

ВИСНОВКИ

У дисертації розв’язана актуальна науково-практичної задача – підвищення ефективності роботи короткобазових колісних навантажувачів (КБН) за рахунок створення автоматизованої системи керування під час виконання машиною транспортних операцій. Підсумовуючи результати досліджень, можна зробити наступні висновки і запропонувати рекомендації.

1. Аналітичний огляд робіт вітчизняних та зарубіжних авторів показує, що в дослідженнях учених у галузі динаміки землерийно-транспортних та підіймально-транспортних машин розглядаються, головним чином, стійкість самохідних пневмоколісних машин у динаміці з урахуванням сил, що діють на них у поздовжніх, горизонтальних та вертикальних площинах, а також при повороті. Зниження ефективності КБН у транспортних режимах роботи, наприклад, під час подолання нерівностей на робочому майданчику, вимагають створення інтелектуальної системи керування, яка дозволить раціоналізувати параметри машини. Встановлено, що підвищення ефективності КБН під час виконання транспортних операцій з вантажем та без нього можливе за рахунок використання автоматизованих систем керування.

Необхідними показниками для створення автоматизованих систем керування є дослідження процесу взаємодії рушіїв КБН з опорною поверхнею, математичне моделювання машини та її алгоритмізація під час виконання транспортних операцій.

2. Розроблено математичні моделі транспортного режиму КБН, які характеризують взаємодію машини з перешкодою і дозволяють оцінити її стійкість та зчіпні можливості окремих її коліс.

3. У результаті математичного моделювання виявлено додаткові зусилля, що діють на колеса під час подолання машиною одиначної нерівності, висотні характеристики якої не перевищують половину дорожнього просвіту КБН. Таким чином, для навантажувача ПМТС 1200 під час переїзду передніх коліс через перешкоду зусилля зростають до 136 кН. Зусилля на колесах, що долають перешкоду, при масі вантажу 1200 кг та швидкості 2 м/с складають 160 кН, а при масі вантажу 400 кг та швидкості 0,6 м/с – 138 кН.

Встановлено, що найбільш небезпечним періодом взаємодії навантажувача з опорною поверхнею є з'їзд з перешкоди під час подолання останньої задніми колесами. При цьому чим менша маса вантажу в ковші, тим більший кут нахилу навантажувача у поздовжній площині. Так, наприклад, кут нахилу навантажувача досягає критичної позначки в 28° (при $m=0$ кг) та 23° (при $m=1200$ кг).

4. Імітаційне моделювання короткобазового навантажувача дозволило визначити положення його центра мас при початковій взаємодії з перешкодою, а також залежність переміщення центру мас навантажувача від швидкості. Встановлено, що при максимальній швидкості центр мас машини піднімається на висоту до 0,04 м у вертикальній площині, а у горизонтальній площині зміщується на 0,08 м. Рівень адекватності комп'ютерного моделювання і математичних моделей за критерієм Пірсона сягає 82 %.

5. Експериментально-польові дослідження короткобазового навантажувача ПМТС 1200 дозволили встановити кореляцію отриманих даних запропонованої динамічної моделі навантажувача в порівнянні з математичними моделями з відхиленням не більше 16 % за критерієм Пірсона.

6. На основі експериментальних, імітаційних та теоретичних досліджень розроблено практичні рекомендації щодо встановлення раціональних параметрів (швидкості й маси вантажу), які забезпечують стійкість короткобазового навантажувача під час виконання ним транспортних операцій.

Так, швидкість машини не повинна перевищувати: 1,2 м/с при масі вантажу 400 кг; 1 м/с при масі вантажу 800 кг та 0,8 м/с при масі вантажу 1200 кг.

7. На основі проведених теоретичних і експериментальних досліджень запропоновано методологічний підхід до вирішення проблеми стійкості руху навантажувача у транспортному режимі за рахунок впровадження системи автоматизованого керування, яка дозволяє повідомляти оператору машини про раціональні параметри навантажувача, або автоматично їх регулювати під час його руху і взаємодії з опорною поверхнею.

8. Економічний ефект від впровадження автоматизованої системи керування склав 63238 грн/рік на одну машину за рахунок забезпечення стійкості машини та, як наслідок, зменшення витрат на технічне обслуговування та ремонт.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. Єфименко О. В., Плугіна Т. В., Мусаєв З. Р. Вибір оптимальних параметрів машин для земляних робіт на основі статистичного аналізу // Вестник ХНАДУ: сб. науч. тр. / Харків: ХНАДУ, 2017. №77. С. 62 – 67. (Особистий внесок – розгляд основних параметрів машин, які є необхідними для їх статистичного аналізу).

2. Єфименко О. В., Пługіна Т. В., **Мусаєв З. Р.** Моделювання робочого обладнання малогабаритного навантажувача за допомогою сучасних програмних засобів // Вісник східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля: науковий журнал / Северодонецьк: СХУ, 2017. №4. С. 98 – 102. *(Особистий внесок – вибір оптимальних програмних комплексів для моделювання робочих процесів короткобазових вантажно-розвантажувальних машин).*

3. Єфименко О. В., Пługіна Т. В., **Мусаєв З. Р.** Моделювання робочих процесів одноківшових навантажувачів за допомогою «AutoDesk Inventor» // Строительство Материаловедение Машиностроение: сб. науч. тр. / Дніпро: ДВНЗ ПДБА 2017. №88. С. 179 – 184. *(Особистий внесок – моделювання процесу подолання короткобазовим навантажувачем одиничної нерівності).*

4. Єфименко О. В., Пługіна Т. В., **Мусаєв З. Р.** Моделі параметричного синтезу елементної бази системи управління програмно-технічним комплексом // Технологія приборостроения: научно – технический журнал / Харьков: ХНАДУ 2016. № 2. С. 74 – 77. *(Особистий внесок – аналіз систем контролю сучасних програмно-технічних комплексів).*

5. **Мусаєв З. Р.**, Єфименко О. В. Вплив нерівностей земної поверхні на динамічну стійкість короткобазового навантажувача під час виконання ним транспортних операцій // Scientific discussion jornal / Praha, Czech Republic ISSN 3041-4245. 2019. Vol 1, No 36. P. 42 – 46. *(Особистий внесок – аналіз динаміки коротко базового навантажувача під час подолання ним одиничної нерівності).*

6. **Мусаєв З. Р.** Розробка тензометричної системи для дослідження короткобазових будівельних та дорожніх машин // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля / Северодонецьк: СХУ ім. Володимира Даля 2018. № 2(243). – С. 163 – 167. *(Особистий внесок – розробка вимірювальної тензометричної системи для дослідження напружено-деформованого стану металоконструкції навантажувача у польових умовах).*

7. **Мусаєв З. Р.** Кореляція результатів комп'ютерного моделювання з експериментальними дослідженнями процесу подолання одиничної нерівності короткобазовим навантажувачем // Строительство Материаловедение Машиностроение: сб. науч. тр. / Дніпро: ДВНЗ ПДБА 2019. № 107 С. 102 – 108. *(Особистий внесок – аналіз існуючих критеріїв для оцінки адекватності досліджуваної моделі в порівнянні зі своїм експериментальним зразком).*

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

8. Розенфельд М. В., Єфименко О.В., **Мусаєв З. Р.** Математичне моделювання процесу занурення робочого обладнання малогабаритного навантажувача у штабель з матеріалом // 13-й міжнародний симпозіум українських інженерів механіків у Львові: Тези доповідей міжнародної конференції «Піднімально-транспортне обладнання та елементи приводів машин» (18 – 19 травня 2017 р., Львів). Львів : КІНПАТРИ ЛТД, 2017. С. 144–

145. *(Особистий внесок – аналіз існуючих методик розрахунку стійкості короткобазових навантажувачів, визначення напрямків подальших досліджень).*

9. Розенфельд М. В., Єфименко О.В., **Мусаєв З. Р.** Комп'ютерний аналіз процесу переїзду одиночного колеса через перешкоду // 8 – а міжнародна наукова-практична конференція: Тези доповідей 8-ї міжнародної науково-практичної конференції «проблеми розвитку транспорту і логістики» (23 – 25 травня 2018 р.). Одеса, 2018. Т. 5. Технічне обладнання транспортних вузлів. С. 222 – 224. *(Особистий внесок – застосування програмних засобів для вирішення поставленої задачі).*

10. Розенфельд М. В., Єфименко О.В., **Мусаєв З. Р.** Математичне моделювання процесу подолання одиничної перешкоди короткобазовим навантажувачем // 9 – а міжнародна наукова-практична конференція: Тези доповідей 9-ї міжнародної науково-практичної конференції «проблеми розвитку транспорту і логістики» (22 – 24 травня 2019 р.). Одеса, 2019. Т. 5. Технічне обладнання транспортних вузлів. С. 164 – 167. *(Особистий внесок побудова залежностей критерію стійкості навантажувача відносно змінних параметрів машини під час виконання нею транспортних операцій)*

11. Єфименко О.В., **Мусаєв З.Р.** Дослідження транспортного режиму короткобазового навантажувача при переїзді через одиночну перешкоду // Міжнародна молодіжна науково-технічна конференція: Тези доповідей міжнародної молодіжної науково-технічної конференції «Молода наука роботизація і нано-технології сучасного машинобудування» (09 – 10 квітня 2019 р.). Краматорськ, 2019. С. 88 – 92. *(Особистий внесок – встановлення та калібрування вимірювальної апаратури на навантажувач з метою проведення експериментальних досліджень)*

Охоронні документи на об'єкти права інтелектуальної власності:

12. Спосіб підвищення надійності робочого обладнання малогабаритного навантажувача ПМТС 1200 на базі вихідної 3D моделі: пат. 120120 U Україна / О.В. Єфименко, **З.Р. Мусаєв.** № у 2017 03762; заяв. 18.04.2017; опубл. 07.09.2017 *(Особистий внесок – літературно-патентний пошук аналогів, опис принципу функціонування та складання формули).*

13. Спосіб підвищення надійності робочого обладнання малогабаритного навантажувача ПМТС 1200 за допомогою додаткового гідравлічного обладнання на базі вихідної 3D моделі: пат. 122509 U Україна / О.В. Єфименко, **З.Р. Мусаєв.** № у 2017 08054; заяв. 02.08.2017; опубл. 17.11.2017 *(Особистий внесок – літературно-патентний пошук аналогів, опис принципу функціонування та складання формули).*

АНОТАЦІЯ

Мусаєв З. Р. Підвищення ефективності роботи короткобазових колісних навантажувачів у транспортному режимі. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.05.05 «Піднімально-транспортні машини» (13 Механічна інженерія). – Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, 2020.

Дисертація присвячена розв'язанню актуальної науково-практичної задачі – підвищенню ефективності роботи короткобазових колісних навантажувачів (КБН) за рахунок створення автоматизованої системи керування під час виконання машиною транспортних операцій.

Актуальність роботи полягає в створенні та вдосконаленні будівельних, дорожніх та піднімально-транспортних машин. У даній дисертаційній роботі розглянуто транспортний режим короткобазового навантажувача ПМТС 1200, а саме, процес переїзду через одиночну перешкоду. Через коротку базу і центр мас, що конструктивно розташований ближче до задньої осі, при подоланні нерівностей робочої поверхні машина втрачає стійкість, що знижує її ефективність. Внаслідок цього виникає завдання підвищення ефективності експлуатації КБН за рахунок використання систем автоматизації керування машин у транспортному режимі.

З іншого боку, системи автоматизації керування машиною вимагають розгляду транспортного режиму навантажувача, математичного моделювання машини й алгоритмізації робочих процесів, оскільки ці параметри є необхідними для розробки систем керування. Таким чином, створення автоматизованих систем керування КБН являє собою актуальну науково-технічну проблему, рішення якої має важливе господарське значення для будівельної галузі.

Транспортний режим навантажувача, що характеризується взаємодією рушіїв КБН з опорною поверхнею, призводить до часткової або повної втрати стійкості машини. У даній дисертаційній роботі розглядалася часткова втрата стійкості, під час подолання КБН одиначної перешкоди. У роботі розглядаються відповідні задачі та пропонуються шляхи їх розв'язання за допомогою інформаційних технологій. Математична модель процесу подолання одиначної нерівності КБН виконана в середовищі MathCad. Експериментальні дослідження виконувалися на малогабаритному навантажувачі ПМТС 1200 та за допомогою розробленої вимірювальної системи, яка забезпечувала надійне вимірювання швидкості, прискорення, тиску робочої рідини та навантаження на металоконструкції робочого обладнання. Комп'ютерна модель процесу переїзду одиначної нерівності КБН виконувалася у програмних комплексах Autodesk Inventor, SolidWorks 2015 та ANSYS 2013. За результатами досліджень було перевірено коректність математичної моделі згідно з результатами експерименту, проведено кореляцію результатів комп'ютерного моделювання згідно з

даними отриманими шляхом експериментальних досліджень та математичного моделювання.

Ключові слова. автоматизована система керування, експериментальні дослідження, динаміка, робочий процес, комп'ютерне моделювання, динамічні характеристики, математичний опис, робоче обладнання, навантажувач, перешкода, показник стійкості, навантаження, програмне середовище.

АННОТАЦИЯ

Мусаев З. Р. Повышение эффективности работы короткобазовых колесных погрузчиков в транспортном режиме. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (доктора философии) по специальности 05.05.05 «Подъемно-транспортные машины» (13 Механическая инженерия). - Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Харьков, 2020.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-практической задачи - повышению эффективности работы короткобазных колесных погрузчиков (КБП) за счет создания автоматизированных систем управления.

Актуальность работы заключается в создании и совершенствовании строительных, дорожных и подъемно-транспортных машин. В данной диссертационной работе рассмотрен транспортный режим малогабаритного погрузчика ПМТС 1200, а именно, процесс переезда через одиночное препятствие. Из-за короткой базы и центра тяжести, конструктивно расположенного ближе к задней оси, при транспортировке груза, во время преодоления неровностей рабочей поверхности машина теряет устойчивость, что снижает ее эффективность и производительность. Поэтому, возникает задача повышения эффективности КБП за счет использования систем автоматизации управления машин в транспортном режиме. С другой стороны, системы автоматизации управления машиной требуют рассмотрения транспортного режима погрузчика, математического моделирования машины и алгоритмизации, поскольку эти параметры необходимы для разработки систем управления. Таким образом, создание автоматизированных систем управления КБП представляет собой актуальную научно-техническую проблему, решение которой имеет важное хозяйственное значение для строительной отрасли.

Транспортный режим погрузчика, характеризующийся взаимодействием движителей КБП с опорной поверхностью приводит к частичной или полной потере устойчивости машины. В данной диссертационной работе рассматривалась частичная потеря устойчивости, при преодолении КБП единичной неровности. В работе рассматриваются соответствующие задачи и предлагаются пути их решения с помощью информационных технологий.

Усовершенствованная математическая модель, описывающая процесс преодоления КБП единичной неровности построена в программной среде Mathcad. При этом модель состоит из нескольких этапов:

- 1) этап столкновения ходовых колес с препятствием;
- 2) этап отрыва колес от препятствия;
- 3) наезд колес на препятствие;
- 4) съезд колес с препятствия.

Модель учитывает взаимодействие КБП с препятствием, как передней, так и задней оси. Анализ всех процессов выполнялся с учетом контактных взаимодействий. Проскальзывание колес на ребре препятствия не учитывалось. В данной математической модели рассматривалось движение КБП в продольной плоскости без учета сил, которые действуют в боковом направлении и в допущении, что оба колеса одного моста входят в контакт с препятствием одновременно (бралась во внимание плоская расчетная схема движения КБП). Экспериментальные исследования проводились на учебно-производственной базе Харьковского национального автомобильно-дорожного университета в период с 2016 г. по 2018 г. В качестве объекта испытаний был использован малогабаритный погрузчик ПМТС 1200. Данные измерений оцифровывались с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Были подключены 3 канала тензодатчиков, 2 канала датчиков давления типа ПД/40 и 2 канала акселерометров, которые синхронизировались в центральном микропроцессорном блоке и передавались по радиоканалу на компьютер, где формировались текстовые файлы результирующих данных с помощью стандартной для используемого АЦП программы Lgraph. По результатам исследований проверены корректность математической модели согласно эксперименту, проведена корреляция результатов компьютерного моделирования по данным полученных путем экспериментальных исследований и математического моделирования. На выходе получены практические рекомендации для повышения эффективности работы КБП в транспортном режиме.

Ключевые слова. автоматизированная система управления, экспериментальные исследования, динамика, транспортный режим, компьютерное моделирование, динамические характеристики, математическое описание, рабочее оборудование, погрузчик, препятствие, критерий устойчивости, программная среда.

ANNOTATION

Musaiev Z. R. Improving the efficiency of work of compact wheel loaders in transport mode. – Manuscript.

Dissertation for the degree of a candidate of technical sciences (doctor of philosophy), specialty 05.05.05 "Hoisting machines" (13 Mechanical Engineering).
- Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, 2020.

The dissertation is devoted to the solution of the actual scientific and practical task - to increase the efficiency of work of short-range wheel loaders by creating adaptive systems of automatic control of work processes.

The urgency of the work is to create and improve construction and road machines. In this dissertation work the working process of small-sized loader is considered, namely, the process of moving through a single obstacle. Due to the short base and the center of gravity, which is structurally located closer to the rear axle, in some modes of the work process, when overcoming the roughness of the working surface, the machine loses its stability, which reduces its efficiency and productivity. Therefore, there is a problem of increasing the efficiency of short-wheel drive wheel loaders by using automation control systems in transport mode.

On the other hand, automation systems for machine management require consideration of the workflow, mathematical modeling of the machine and algorithmization of work processes, since these parameters are necessary for the development of control systems. Thus, the creation of adaptive systems for the automatic control of work processes of short-range loaders is a topical scientific and technical problem, the solution of which is of great economic importance for the construction industry.

The transport mode of the loader, characterized by the interaction of KBN propulsion engines with the bearing surface, leads to partial or complete loss of machine stability. In this dissertation, a partial loss of stability was considered, while overcoming the single-barrier CBN. The paper deals with the corresponding problems and proposes ways of their solution with the help of information technologies. The mathematical model of the process of overcoming the unit inequality CBN is performed in the environment of MathCad. Experimental researches were carried out on a small-sized loader PMTC 1200 and with the help of the author's measuring system, which ensured reliable measurement of speed, acceleration, pressure of the working fluid and loading on the metal construction of the working equipment. The computer model of the process of moving a single inequality short-range wheel loader was performed in the Autodesk Inventor 2016, SolidWorks 2015 and ANSYS 2013 program systems. The results of the research confirmed the correctness of the mathematical model according to the results of the experiment, correlation of the results of computer simulation was carried out according to the data obtained by experimental research and mathematical modeling.

Keywords: automatic control system, experimental research, dynamics, work process, computer simulation, dynamic characteristics, mathematical description, working equipment, loader, obstruction, stability index, load, program environment.