

ВІДГУК
офіційного опонента
доцента кафедри будівельних машин
Київського національного університету будівництва і архітектури,
кандидата технічних наук, доцента **МІЩУКА Дмитра Олександровича**
на дисертацію **ЗАРІВНОГО Олександра Юрійовича** на тему:
**«Оптимізація режимів руху пристрою
для переміщення малогабаритних вантажів»,**
подану на здобуття ступеня доктора філософії
за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування»
галузі знань 13 «Механічна інженерія»

Актуальність теми дослідження. Задачі розробки та створення мобільних систем для переміщення малогабаритних вантажів набувають особливої значущості в умовах стрімкої автоматизації виробництва та розвитку логістики. Такі системи також є ключовими у побудові гнучких виробництв, де важливо забезпечити швидке транспортування вантажів між робочими просторами без залучення додаткових ресурсів. Двоколісні мобільні транспортні системи типу самокат мають перспективи у задачах доставки вантажів, а однією з основних проблем, що ускладнюють їхнє практичне використання є забезпечення стійкості під час руху та зупинки. Такі засоби транспортування за своєю фізичною природою є нестійкими системами і потребують використання спеціальних механізмів балансування та складних алгоритмів керування. Як наслідок, такі пристрої не знайшли широкого розповсюдження, а їхні перспективи застосування не розкриті. Для забезпечення стійкості положення подібних систем в статичних і динамічних режимах потрібно знати точну конструкцію механізму балансування для якої розроблюється математична модель системи керування. Таким чином задача синтезу прототипу двоколісного транспортного пристрою з механізмом балансування та розробка оптимально режиму його руху є актуальною та створює основу для впровадження подібних безпілотних систем у міську систему доставки малогабаритних вантажів.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у визначенні із застосуванням генетичних алгоритмів закону керування системи балансування двоколісним безпілотним транспортним засобом, де враховано принцип зміщення центру ваги пристрою відносно опори для стабілізації його положення.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації. Наукові положення, висновки та рекомендації дисертації щодо теоретичних міркувань та практичних висновків з оптимізація режимів руху пристрою для переміщення малогабаритних вантажів є обґрунтованими та достовірними, що підтверджується високим методичним рівнем проведених досліджень, а також логічною та послідовною реалізацією всіх етапів роботи. Сформульовані мета і завдання дослідження повністю узгоджується з актуальністю теми та її науково-практичною цінністю. Завдання

дослідження логічно впливають із назви дисертації. Об'єкт і предмет дослідження сформовані вірно, а застосовані методи дослідження є обґрунтованими та відповідають поставленим цілям і напряму дослідження.

Отримані наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовано на основі результатів дослідження та відзначаються достатнім рівнем обґрунтованості.

Достовірність основних наукових положень, висновків проведених наукових досліджень та одержаних результатів. Основні наукові положення та висновки, сформульовані в дисертації ґрунтуються на застосуванні, як класичних методів теоретичної механіки, так і на сучасних дослідницьких методах і відповідних наукових джерелах. Теоретичні засади, узагальнення та висновки побудовані на основі математичної моделі руху двоколісного транспортного засобу, яка розроблена із застосуванням рівнянь Лагранжа 2-го роду. Для визначення оптимальних режимів руху сформовано цільову функцію, яка відповідає мірі відхилення теоретичних даних від експериментальних та здійснено мінімізацію такої функції із застосуванням методу рою часточок Ring-Rot-PSO. Отримані результати підтверджено експериментальними даними.

Загальна характеристика структури і змісту дисертації. Дисертація за своєю структурою складається з анотації, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи складає 216 сторінок тексту разом з додатками. Дисертація з додатками містить 88 рисунків та 11 таблиць. Анотація викладена в лаконічній та змістовній формі і передає основні положення та висновки дослідження, а також відображає логічну послідовність і структуру наукової роботи.

Розділи дисертації побудовано у логічній послідовності та змістовно наповнені.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і задачі дослідження, викладено наукову новизну дисертаційного дослідження та її практичну значимість.

У **першому розділі** здобувачем зроблено аналіз існуючих публікацій за темою дослідження, проаналізовано способи транспортування малогабаритних вантажів та методи автоматизації цих процесів. Також було проведено аналіз відомих патентних рішень і визначено області застосування пристрою для транспортування малогабаритних вантажів. В даному розділі наведено невеликий перелік робіт за напрямами щодо розробки оптимального керування динамічними системами та нестійкими пристроями.

За результатами проведеного аналізу робіт автором в даному розділі було сформовано завдання дослідження, зокрема значну увагу приділено опису перспективи застосування генетичних алгоритмів для оптимізації параметрів регулятора системи керування.

Другий розділ присвячено розробці фізичної моделі пристрою для транспортування малогабаритних вантажів. У даному розділі розглянуто концепції систем для балансування

транспортними двоколісними пристроями, а саме за допомогою реактивних коліс з використанням гіроскопів та механізм балансування, що працює за принципом зміщення центра ваги пристрою відносно коліс. З огляду на те, що пристрій має бути компактним, автором було обрано механізм балансування за рахунок зміщення центру ваги вантажу. Також в другому розділі дисертації надано алгоритм процесу стабілізації, який полягає в зчитуванні даних з фізичної моделі, обробці даних, визначенні сигналів управління, виконання управління пристроєм з наступним контролем параметрів кута нахилу.

В якості основи для системи керування даним пристроєм було обрано плату Arduino Nucleo F446RE STM32 з датчиком гіроакселерометра MPU9250 для вимірювання кута нахилу пристрою та резистивним датчиком повороту механізму балансування. Механізм балансування побудовано на основі чотириланкового паралелограма на задньому колесі та керованого переднього колеса. Система керування може змінювати кут повороту переднього колеса за допомогою сервоприводу DS3218MG, повертаючи його в бік крену та змінювати положення центра ваги вантажу за допомогою керованої підвіски заднього колеса з приводом від крокового двигуна NEMA 23.

Визначаючи параметри кута нахилу пристрою та швидкості його зміни, обраховуються значення коефіцієнтів регулятора, який застосовується для керування кутовою швидкістю механізму балансування.

У **третьому розділі** розглянуто математичне моделювання пристрою для транспортування малогабаритних вантажів. Пристрій для транспортування малогабаритних вантажів потребує стабілізації положення тільки в одній площині, тому для побудови математичної моделі було обрано характеристики, які описують рух пристрою в площині, що перпендикулярна до його функціонального напрямку руху. Для розробки математичної моделі автором застосовано декілька підходів. Не класичний підхід полягав у застосуванні машинного навчання з використанням штучної нейронної мережі. Для цього було визначено вхідні та вихідні характеристики механічної системи, які описують її стан, а математична модель знаходилася чисельними методами наближення деякої функції. Для підбору функцій, на яких відбувається наближення відгуку динамічної системи використано рекурентну нейронну мережу із довгою короткотривалою пам'яттю, що дозволяє досить якісно виконувати прогноз часових рядів, які представляють собою вхідні і вихідні характеристики динамічної системи, зібрані протягом певного часового проміжку.

Реалізацію структури, обчислення і навчання штучної нейронної мережі було виконано в середовищі Wolfram Cloud. Розроблена нейронна мережа складається з вхідного, прихованих та вихідного шарів. Нейрони вхідного шару отримують матрицю розмірністю 10×2 , що відповідає 10 часовим вимірам стану системи, кожен з яких включає дві

характеристики, а саме кут нахилу пристрою та кутову швидкість механізму стабілізації. Прихований шар складається з трьох шарів по 20 елементів. Вихідним елементом розробленої структури нейронної мережі є лінійний шар, який повертає прогноз на один часовий крок вперед.

Також в даному розділі дисертаційного дослідження автором подано математичну модель пристрою механічної системи балансування двоколісного транспортного засобу. Розроблена модель була створена із застосуванням рівнянь Лагранжа 2-го роду, в якій враховано масу рами транспортного засобу та колеса, моменти інерції шківів пасової передачі приводу механізму зміщення центра ваги, колеса, рами, ротора приводного двигуна. За узагальнені координати прийнято кут нахилу рами пристрою переміщення у вертикальній площині та кут зміщення механізму балансування. Отримані системи диференціальних рівнянь відображають динаміку поведінки механізму стабілізації рами досліджуваного транспортного засобу у вертикальній площині. Невідомі параметри отриманої системи рівнянь визначалися із застосування оптимізаційних методів. Цільова функція оптимізації сформована у вигляді загальної величини відхилення теоретичних даних кута крену та швидкості його зміни від експериментальних. У подальшому було здійснено мінімізацію цільової функції за допомогою модифікованого методу рою часточок Ring-Rot-PSO.

У **четвертому розділі** розглянуто синтез оптимального керування рухом пристрою в режимі стабілізації свого положення. В якості керуючого впливу було обрано кут відхилення механізму балансування. Так як процес керування можна розділити на декілька складових задач: стабілізація положення пристрою під час зупинки та стабілізація положення пристрою під час руху по траєкторії, тому автор даної роботи особливу увагу приділив саме першому способу.

Розглянутий процес керування зі стабілізацією положення рами транспортного засобу має безліч способів для досягнення заданої мети, а це означає, що існує множина можливих рішень. Для пошуку оптимального варіанту керування в даній роботі досліджено основні параметри стану системи, а саме куту нахилу пристрою і кут відхилення механізму балансування. Для збереження стійкості пристрою з оптимальним режимом роботи приводу механізму балансування в роботі було розроблено його оптимальне керування. В якості показника оцінки режиму роботи, введено квадратичний інтегральний критерій оптимізації, який характеризує плавність регулювання, забезпечує мінімальні кутові швидкості і відхилення пристрою та механізму балансування на всьому проміжку регулювання.

Для забезпечення оптимального керування було розглянуто систему управління зі зворотним зв'язком на основі ПД-регулятора та його частинний випадок ПІ-регулятор.

Визначення невідомих коефіцієнтів для прийнятих регуляторів здійснювалося із застосуванням методів оптимізації. Для мінімізації цільової функції застосовано метод рою

частинок VCT-PSO. В результаті було знайдено параметри для ПІ- та ПІД-регуляторів, які відповідають мінімальним значенням показників кутових прискорень та тривалості регулювання.

У **п'ятому розділі** надано результати експериментальних досліджень якості роботи пристрою балансування двоколісного механізму в режимі стабілізації свого положення з використанням ПІД-регулятора. У ході експериментів на пристрій, що знаходився в стані рівноваги передавалися збурення, які змушували пристрій задіяти механізм балансування для збереження стійкого положення. Під час експерименту проводилося зчитування даних кута і кутової швидкості нахилу пристрою пересування. Оцінка відповідності експериментальних і теоретичних даних проводилася на основі знайдених середньоквадратичних похибок кута крену механічної систем та швидкості його зміни.

Для перевірки роботи пристрою з корисним навантаженням було проведено 5 дослідів, де маса вантажу на пристрої змінювалася у межах від 1 до 3 кг з кроком 0,5 кг.

Отримані результати досліджень дають підстави стверджувати, що отриманий спосіб балансування системи стабілізації має перспективи свого застосування в двоколісних транспортних засобах, а розроблена електронна систем та програмний регулятор можуть мати практичне засновування в реальних промислових системах.

У **шостому розділі** надано економічну оцінку практичного застосування пристрою для переміщення малогабаритних вантажів. Автором було розраховано вартість складових частин двоколісної системи для транспортування вантажів, визначено прибутковість застосування отриманого технічного рішення та порівняно з річними витратами для кур'єра на самокаті. Розрахунок витрат на утримання одного робота-самоката в парку обсягом 20 одиниць у порівнянні з кур'єром на електросамокаті показав зменшення витрат до 2,4–5 разів.

Загальні висновки відповідають отриманим у дисертації результатам теоретичних і експериментальних досліджень, які є змістовними та дозволяють розроблювати оптимальне керування рухом пристрою для переміщення малогабаритних вантажів у режимі стабілізації свого положення.

Практичне значення результатів дослідження. Отримані в дисертації результати створюють основу для подальшого впровадження двоколісних пристроїв у сферу безпілотної доставки малогабаритних вантажів. Зокрема, було розроблено математичну модель балансувального пристрою для двоколісної транспортної системи типу електросамокат, спроектовано конструкцію і виготовлено прототип безпілотного транспортного засобу для переміщення вантажів, на якому також можна виконувати подальші експериментальні дослідження, створено систему керування та управляючу програму на основі ПІ та ПІД-регуляторів. Окрім цього автором дослідження було показано методику розв'язку

оптимізаційних задач із застосуванням генетичних алгоритмів та з використанням штучних нейронних мереж.

Повнота відображення наукових положень, висновків і рекомендацій, в опублікованих працях. Основні наукові результати дисертації опубліковано в 13 наукових працях, з яких стаття у науковому виданні, включеному до міжнародної наукометричної бази даних Scopus, 3 статті у наукових виданнях, включених до категорії «Б» Переліку наукових фахових видань України, 9 тез наукових доповідей.

Відповідність академічній доброчесності. Аналіз звіту про подібність за результатами перевірки дисертації на наявність текстових збігів дає підстави стверджувати, що дисертація Зарівного Олександра Юрійовича не містить ознак фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату чи неправомірних запозичень і є результатом самостійного наукового дослідження автора. Ідеї, результати та тексти інших авторів, використані в роботі, супроводжуються належними посиланнями на відповідні джерела.

Дискусійні положення та зауваження щодо роботи. Високо оцінюючи науковий рівень підготовки дисертації, необхідно також акцентувати увагу на окремих положеннях роботи, які заслуговують на подальше обговорення в рамках наукової дискусії.

1. У першому розділі автором для того, щоб показати актуальність застосування мобільних систем для переміщення вантажів було проаналізовано значну кількість патентів різних країн та університетів. Основна увага при цьому приділена саме оцінці кількості розробок, а не їхній технічній складовій. З проведеного аналізу не зрозуміло, які саме ефективні конструкції безпілотних систем транспортування вже існують та впроваджено в систему доставки вантажів, не зрозуміла проблематика таких рішень, а також не зрозуміло, які є ефективні технічні рішення систем балансування. Окрім цього було б цікаво побачити огляд досліджень в напрямі оптимізаційних задач режимів руху та розвитку систем балансування для незрівноважених колісних систем.

2. У другому розділі надано інформацію з конструкторської розробки експериментального зразка двоколісного транспортного засобу з електроприводом. У подальшому в роботі автор зазначає, що розроблена конструкція досліджуваної механічної систем є фізичною моделлю, проте коефіцієнти подібності для такої фізичної моделі не було визначено, відповідно не відомо, як результати подальших досліджень можна інтерпретувати для широкого кола подібних пристроїв та які параметри фізичної моделі мають домінуючий вплив на вирішення проблеми стійкості даного рішення. Також в даному розділі бажано було б провести аналіз типів вантажів, вид дорожнього полотна і опорної поверхні для яких може бути застосовано та масштабовано запропоноване рішення дослідного зразка.

3. У третьому розділі при побудові математичної моделі системи балансування двоколісного транспортного засобу було враховано масово-інерційні характеристики рами

пристрою для переміщення, проте масово-габаритні параметри вантажу, що переміщується не взято до уваги. Якщо масу вантажу в даних рівняннях приєднати до маси рами механічної системи, тоді постає питання, як зміниться центр ваги вантажу? Також на зрозуміло, яким чином враховано габаритні розміри вантажу.

У прийнятих дослідженнях, маси складових елементів розроблюваного пристрою враховано, як такі, що зосереджені в точці, але в реальності вантажі мають розподілену масу, а також можуть бути розміщені несиметрично. Яка в такому випадку буде поведінка системи балансування для забезпечення її стійкості?

4. При застосуванні нейронної мережі для розрахунків бажано було б надати її детальний опис, а не лише вказувати кількість шарів та кількість нейронів для кожного шару. Також не зрозуміло, чому саме таку архітектуру штучної нейронної мережі було прийнято, як було прийнято функцію активації для нейронів та як визначалася похибка нейронної мережі. Застосування подібного підходу з нейронною системою для проведення розрахунків передбачає певну вибірку тестових даних, але такі тестові дані можна отримати для деякого заздалегідь прогнозованого стану. В реальних умовах такі системи будуть застосовуватися в недетермінованому просторі для різних видів вантажів і типів опорної поверхні, а це означає, що початкова тестова вибірка для таких випадків буде не актуальною. Тоді постає питання, яким чином дані отриманих експериментів будуть накладатися на реальні умови застосування даного рішення.

5. У розділі експериментальних досліджень бажано було б надати план матриці експериментів, критерії відтворюваності, повторюваності та достовірності отриманих експериментальних даних. У такому випадку було б зрозуміло, як в подальшому можна накладати дані експериментів на подібні системи та які параметри системи найбільше впливають на оптимальний режим руху пристрою для переміщення малогабаритних вантажів.

Наведені зауваження не носять принципового характеру і не знижують рівня виконаних досліджень.

Висновок про відповідність дисертації встановленим вимогам. Аналіз дисертації та опублікованих праць свідчить про те, що дисертація Зарівного Олександра Юрійовича на тему «Оптимізація режимів руху пристрою для переміщення малогабаритних вантажів» є завершеною науковою працею, яка містить наукову новизну, теоретичне та практичне значення.

За актуальністю, ступенем новизни представлених результатів, їх наукової обґрунтованості, повноти викладення в опублікованих наукових працях, рівнем виконання поставленого наукового завдання та володінням методологією наукової діяльності дана робота відповідає вимогам до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії.

Дисертація відповідає спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» галузі знань 13 «Механічна інженерія», вимогам наказу Міністерства освіти і науки України від 12 січня 2017 року № 40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» (зі змінами) і Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44, а її автор Зарівний Олександр Юрійович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» галузі знань 13 «Механічна інженерія».

Офіційний опонент доцент кафедри будівельних машин Київського національного університету будівництва і архітектури, кандидат технічних наук, доцент Дмитро МПЩУК