

# Облікова картка дисертації

## I. Загальні відомості

**Державний обліковий номер:** 0825U002988

**Особливі позначки:** відкрита

**Дата реєстрації:** 16-07-2025

**Статус:** Захищена

**Реквізити наказу МОН / наказу закладу:**



## II. Відомості про здобувача

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові:**

1. Зарівний Олександр Юрійович

2. Oleksandr Y. Zarivnyi

**Кваліфікація:**

**Ідентифікатор ORCID ID:** Не застосовується

**Вид дисертації:** доктор філософії

**Аспірантура/Докторантура:** так

**Шифр наукової спеціальності:** 133

**Назва наукової спеціальності:** Галузеве машинобудування

**Галузь / галузі знань:** механічна інженерія

**Освітньо-наукова програма зі спеціальності:** Галузеве машинобудування

**Дата захисту:** 20-08-2025

**Спеціальність за освітою:** Галузеве машинобудування

**Місце роботи здобувача:** Національний університет біоресурсів і природокористування України

**Код за ЄДРПОУ:** 00493706

**Місцезнаходження:** вул. Героїв Оборони, буд. 15, Київ, 03041, Україна

**Форма власності:** Державна

**Сфера управління:** Міністерство освіти і науки України

**Ідентифікатор ROR:**

### **III. Відомості про організацію, де відбувся захист**

**Шифр спеціалізованої вченої ради (разової спеціалізованої вченої ради):** PhD 152

**Повне найменування юридичної особи:** Національний університет біоресурсів і природокористування України

**Код за ЄДРПОУ:** 00493706

**Місцезнаходження:** вул. Героїв Оборони, буд. 15, Київ, 03041, Україна

**Форма власності:** Державна

**Сфера управління:** Міністерство освіти і науки України

**Ідентифікатор ROR:**

### **IV. Відомості про підприємство, установу, організацію, в якій було виконано дисертацію**

**Повне найменування юридичної особи:** Національний університет біоресурсів і природокористування України

**Код за ЄДРПОУ:** 00493706

**Місцезнаходження:** вул. Героїв Оборони, буд. 15, Київ, 03041, Україна

**Форма власності:** Державна

**Сфера управління:** Міністерство освіти і науки України

**Ідентифікатор ROR:**

### **V. Відомості про дисертацію**

**Мова дисертації:** Українська

**Коди тематичних рубрик:** 55.51.13, 55.51.37, 55.51.99

**Тема дисертації:**

1. Оптимізація режимів руху пристрою для переміщення малогабаритних вантажів
2. Optimization of operating modes of a device for transporting small-sized cargo

**Реферат:**

1. У дисертації проведено дослідження, спрямовані на підвищення ефективності переміщення малогабаритних вантажів шляхом створення прототипу безпілотного двоколісного пристрою та синтезу керування його рухом. Розроблений пристрій призначений для використання в умовах міської інфраструктури на завершальному етапі логістичного ланцюга («остання миля»). Робота включає повний цикл – від розробки концепції пристрою та створення фізичної моделі до математичного моделювання, синтезу оптимального керування, експериментальної перевірки, оцінки економічної ефективності його роботи. Виконано аналіз сучасного стану сфери доставки малогабаритних вантажів, досліджено перспективи використання безпілотних мобільних платформ та окреслено проблему стабілізації двоколісних нестійких систем. Встановлено недостатню вивченість питань стабілізації двоколісних пристроїв та їх використання в задачах автономної доставки малогабаритних вантажів, що визначає актуальність теми. Розроблено

концепцію пристрою для використання в міському середовищі, з урахуванням вимог до габаритів вантажу (об'ємної ваги, вантажопідйомності, швидкості руху, обмежень електричної потужності приводів). Створено фізичну модель пристрою з механізмом балансування, який працює за принципом зміщення центра ваги щодо точок опори. Підібрано елементну базу, створено 3D-модель пристрою з подальшим виготовленням її прототипу. Побудовано математичну модель динаміки стабілізації пристрою за допомогою підходів «чорна скриня» та «сіра скриня». Підхід «чорна скриня» реалізовано за допомоги рекурентної нейромережі з довгою короткочасною пам'яттю (LSTM), яка за допомогою експериментальних даних роботи пристрою (кут та кутова швидкість нахилу рами та відхилення механізму балансування) дозволила виконувати прогнозування динаміки роботи пристрою в режимі стабілізації свого положення. Для реалізації підходу «сіра скриня» побудовано динамічну модель пристрою та складено рівняння його руху у вигляді рівнянь Лагранжа 2-го роду. Отримані рівняння містили невідомі параметри пристрою, для їхнього визначення було зібрано масив експериментальних даних роботи пристрою. Для розв'язання задачі ідентифікації параметрів пристрою застосовано оптимізаційний алгоритм RING-ROT-PSO. У результаті визначено еквівалентні значення моментів інерції рами  $I_k=5,52 \cdot 10^{-4}$  кг·м<sup>2</sup> та колеса  $I_{kk}=2,75 \cdot 10^{-3}$  кг·м<sup>2</sup>, а також масу колеса  $m_k=3,31 \cdot 10$  кг. На основі математичної моделі сформульовано задачу синтезу оптимального керування положенням пристрою в режимі стабілізації свого положення під час зупинки (статичне балансування). Розглянуто застосування два типи регуляторів – ПІ та ПІД. Сформовано комплексний критерій оптимізації та складено 11 наборів вагових коефіцієнтів його складових. Проведено оптимізацію коефіцієнтів кожного з регуляторів для всіх наборів вагових коефіцієнтів. Мінімізацію критерію проведено за допомогою модифікованого методу рою часточок VCT-PSO за рахунок знаходження відповідних коефіцієнтів регуляторів. Оцінку якості отриманого керування проведено за показниками середньоквадратичних та максимальних кутових прискорень нахилу пристрою та відхилення механізму балансування. Визначено оптимальні коефіцієнти ПІД-регулятора ( $k_1=-2,113$ ,  $k_2=-1,747$ ,  $k_3=-4,92 \cdot 10^{-6}$ ). Встановлено, що введення диференціальної складової дозволило зменшити максимальні кутові прискорення до 20 разів, а середньоквадратичні – до 4,8 разів. Це підтверджує застосовність ПІД-регулятора для задачі стабілізації положення пристрою. Для перевірки теоретичних результатів проведено експериментальне дослідження роботи розробленого керування на фізичному прототипі пристрою в лабораторних умовах. Суть експериментів полягала в зчитуванні даних роботи стабілізації положення пристрою під дією зовнішніх збурень (поштовхів). За результатами експериментів отримано 11 масивів даних роботи пристрою. Співставляючи теоретичні і експериментальні дані, отримали показники максимальних ( $0,00325 \dots 0,0112$  рад) та середньоквадратичних ( $0,00155 \dots 0,00487$  рад) похибок кута нахилу пристрою та показники похибок максимальної ( $0,0218 \dots 0,0782$  рад/с) та середньоквадратичної ( $0,00669 \dots 0,0238$  рад/с) кутової швидкості нахилу пристрою. Водночас логарифмічний декремент згасання коливань знаходився в межах  $0,25 \dots 2,11$ . Додатково проведено дослідження впливу змінного навантаження на ефективність стабілізації положення пристрою. Для забезпечення стабілізації положення пристрою з додатковою масою коефіцієнти регулятора потребували коригування. Встановлено, що чим більша вага наважки, тим більша тривалість стабілізації. Отримані результати дають підстави вважати задачу синтезу оптимального керування рухом пристроєм для транспортування малогабаритних вантажів виконаною. Визначено вартість розробленого прототипу (23244 грн) та вартість повноцінного функціонального прототипу (46029 грн), який містить необхідні складові для доставки вантажів у реальних умовах. Потенційне зниження витрат на доставку сягає 2,4 рази в перший рік та 5 разів у другий і подальші роки.

2. The dissertation presents a study aimed at improving the efficiency of small-scale cargo transportation through the development of a prototype of an unmanned two-wheeled device and the synthesis of motion control. The developed device is intended for use in urban infrastructure at the final stage of the logistics chain («last mile»). The research encompasses the full development cycle – from conceptual design and creation of a physical prototype to mathematical modeling, optimal control synthesis, experimental verification, and economic efficiency evaluation. An analysis of the current state of small cargo delivery was conducted, highlighting the potential of unmanned mobile platforms and identifying the stabilization problem of unstable two-wheeled systems. It was established that the topic of stabilization and control of two-wheeled devices for autonomous small cargo delivery

remains underexplored, which substantiates the relevance of the research. A concept of the device for urban application was developed, taking into account cargo volume, payload capacity, velocity, and electric power limitations of the drives. A physical prototype with a balancing mechanism based on shifting the center of mass relative to the support points was created. The hardware base was selected, and a 3D model of the device was designed and subsequently fabricated. A mathematical model of the device's stabilization dynamics was constructed using «black box» and «gray box» approaches. The black-box model was implemented using a Long Short-Term Memory (LSTM) recurrent neural network, which used experimental data on tilt angle and angular velocity of the frame and balancing mechanism to predict the stabilization behavior of the device. To implement the gray-box approach, a dynamic model of the device was built and its equations of motion were formulated using second-order Lagrange equations. These equations included unknown parameters. A dataset of experimental measurements was collected, and the Ring-Rot-PSO optimization algorithm was used to identify the parameters that minimized the modeling error. As a result, the equivalent moments of inertia were found:  $I_{\text{к}} = 5.52 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$  for the frame and  $I_{\text{кк}} = 2.75 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$  for the wheel. The wheel mass was also refined to  $m_{\text{к}} = 3.31 \cdot 10^{-1} \text{ kg}$ . Based on the mathematical model, the task of optimal control synthesis in static balancing mode was formulated. Two types of controllers – PI and PID – were considered. A comprehensive optimization criterion was defined, and 11 sets of weighting coefficients were prepared. Each controller's coefficients were optimized for all weight sets using the modified VTC-PSO particle swarm algorithm. Control quality was evaluated based on maximum and RMS angular accelerations of the frame and the balancing mechanism. The optimal PID controller coefficients were identified ( $k_1 = -2.113$ ,  $k_2 = -1.747$ ,  $k_3 = -4.92 \cdot 10^{-6}$ ). It was found that introducing the derivative component reduced peak angular accelerations by up to 20 times and RMS accelerations by up to 4.8 times. This confirms the applicability of the PID controller for position stabilization. To verify the theoretical results, experimental testing of the control system was performed using the physical prototype under laboratory conditions. The experiments focused on collecting data under external disturbances (e.g., mechanical impacts). Eleven datasets were recorded. Comparison of theoretical and experimental results yielded maximum tilt angle errors in the range of 0.00325 to 0.0112 rad and RMS errors of 0.00155 to 0.00487 rad. Maximum angular velocity errors ranged from 0.0218 to 0.0782 rad/s, and RMS errors from 0.00669 to 0.0238 rad/s. The logarithmic decrement of oscillation damping ranged from 0.25 to 2.11. Additionally, the impact of varying payload on stabilization performance was studied. It was found that controller coefficients required adjustment depending on the mass of the load: the heavier the load, the longer the stabilization time. These findings confirm the successful solution of the optimal control synthesis problem for the two-wheeled device in small cargo transportation tasks. The prototype cost was calculated at 23244 UAH, while the cost of a fully functional delivery-capable version was 46029 UAH. The full prototype includes key subsystems such as trajectory planning and positioning, a container with an electronic lock, remote control, and a self-righting mechanism. Delivery costs could be reduced by up to 2.4 times in the first year and up to 5 times in subsequent years. This demonstrates the practical feasibility of implementing the proposed device for last-mile logistics applications.

### **Державний реєстраційний номер ДіР:**

**Пріоритетний напрям розвитку науки і техніки:** Фундаментальні наукові дослідження з найбільш важливих проблем розвитку науково-технічного, соціально-економічного, суспільно-політичного, людського потенціалу для забезпечення конкурентоспроможності України у світі та сталого розвитку суспільства і держави

**Стратегічний пріоритетний напрям інноваційної діяльності:** Не застосовується

**Підсумки дослідження:** Нове вирішення актуального наукового завдання

### **Публікації:**

- 1. Romasevych Yu., Zarivnyi O. Mathematical modeling of the device for transporting small-sized cargo. UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering. 2024. Vol. 86. Iss. 3. P. 87–102.

- 2. Зарівний О., Ромасевич Ю. Розробка фізичної моделі пристрою для транспортування малогабаритних вантажів. Наукові доповіді Національного університету біоресурсів і природокористування України. 2023. Т. 19. № 6. URL: <https://scireports.com.ua/uk/journals/tom-19-6-2023/rozrobka-fizichnoyi-modeli-pristroyu-dlya-transportuvannya-malogabaritnikh-vantazhiv>.
- 3. Loveikin V., Romasevych Yu., Zarivnyi O. Development of a mathematical model of stabilisation of device for small-sized cargo transportation. Scientific Reports of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. 2024. Vol. 20. No. 4. P. 57–71.
- 4. Ромасевич Ю., Зарівний О. Експериментальне дослідження стабілізації положення пристрою для переміщення малогабаритних вантажів. Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. 2025. Вип. 105. С. 37–44.

**Наукова (науково-технічна) продукція:** пристрої

**Соціально-економічна спрямованість:** підвищення автоматизації виробничих процесів

**Охоронні документи на ОПВ:**

**Впровадження результатів дисертації:** Планується до впровадження

**Зв'язок з науковими темами:** 0123U103322; 0118U004170

## **VI. Відомості про наукового керівника/керівників (консультанта)**

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові:**

1. Ромасевич Юрій Олександрович
2. Yurii O. Romasevych

**Кваліфікація:** д. т. н., професор, 05.05.05

**Ідентифікатор ORCID ID:** 0000-0001-5069-5929

**Додаткова інформація:**

**Повне найменування юридичної особи:** Національний університет біоресурсів і природокористування України

**Код за ЄДРПОУ:** 00493706

**Місцезнаходження:** вул. Героїв Оборони, буд. 15, Київ, 03041, Україна

**Форма власності:** Державна

**Сфера управління:** Міністерство освіти і науки України

**Ідентифікатор ROR:**

## **VII. Відомості про офіційних опонентів та рецензентів**

**Офіційні опоненти**

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові:**

1. Стрижак Мар'яна Георгіївна
2. Mariana H. Stryzhak

**Кваліфікація:** к. т. н., доц., 05.05.17

**Ідентифікатор ORCID ID:** 0000-0003-3335-4086

**Додаткова інформація:**

**Повне найменування юридичної особи:** Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"

**Код за ЄДРПОУ:** 02071180

**Місцезнаходження:** вул. Кирпичова, буд. 2, Харків, Харківський р-н., 61002, Україна

**Форма власності:** Державна

**Сфера управління:** Міністерство освіти і науки України

**Ідентифікатор ROR:**

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові:**

1. Міщук Дмитро Олександрович

2. Dmytro O. Mishchuk

**Кваліфікація:** к. т. н., доц., 05.05.04

**Ідентифікатор ORCID ID:** 0000-0002-8263-9400

**Додаткова інформація:**

**Повне найменування юридичної особи:** Київський національний університет будівництва і архітектури

**Код за ЄДРПОУ:** 02070909

**Місцезнаходження:** проспект Повітряних сил, буд. 31, Київ, 03037, Україна

**Форма власності:** Державна

**Сфера управління:** Міністерство освіти і науки України

**Ідентифікатор ROR:**

**Рецензенти**

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові:**

1. Коробко Микола Миколайович

2. Mykola M. Korobko

**Кваліфікація:** к. т. н., доц., 05.05.11

**Ідентифікатор ORCID ID:** 0000-0002-2602-4225

**Додаткова інформація:**

**Повне найменування юридичної особи:** Національний університет біоресурсів і природокористування України

**Код за ЄДРПОУ:** 00493706

**Місцезнаходження:** вул. Героїв Оборони, буд. 15, Київ, 03041, Україна

**Форма власності:** Державна

**Сфера управління:** Міністерство освіти і науки України

**Ідентифікатор ROR:**

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові:**

1. Сподоба Олександр Олександрович

2. Oleksandr O. Spodoba

**Кваліфікація:** д.філософ, 133

**Ідентифікатор ORCID ID:** 0000-0001-8217-866X

**Додаткова інформація:**

**Повне найменування юридичної особи:** Національний університет біоресурсів і природокористування України

**Код за ЄДРПОУ:** 00493706

**Місцезнаходження:** вул. Героїв Оборони, буд. 15, Київ, 03041, Україна

**Форма власності:** Державна

**Сфера управління:** Міністерство освіти і науки України

**Ідентифікатор ROR:**

## VIII. Заключні відомості

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові  
голови ради**

Болбот Ігор Михайлович

**Власне Прізвище Ім'я По-батькові  
головуючого на засіданні**

Болбот Ігор Михайлович

**Відповідальний за підготовку  
облікових документів**

Боярчук Сергій Васильович

**Реєстратор**

УкрІНТЕІ

**Керівник відділу УкрІНТЕІ, що є  
відповідальним за реєстрацію наукової  
діяльності**



Юрченко Тетяна Анатоліївна