

ВІДГУК

офіційної опонентки

кандидатки технічних наук, доцентки **СТРИЖАК Мар'яни Георгіївни**

на дисертацію **ЗАРІВНОГО Олександра Юрійовича** на тему:

«Оптимізація режимів руху пристрою для переміщення малогабаритних вантажів»,

подану на здобуття ступеня доктора філософії

зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»

галузі знань 13 «Механічна інженерія»

Актуальність обраної теми дослідження. Наразі використання систем автоматизації роботи обладнання є надзвичайно актуальним, оскільки сучасний рівень розвитку електронних систем та мереж дозволяє впроваджувати повністю автоматизовані рішення, що реалізують робочий цикл без участі людини. Зокрема, у сфері логістики в її розумінні науки про управління рухом матеріальних потоків, останні роки відбувається стрімке впровадження систем автоматичного сортування та переміщення, сучасні компанії створюють повністю автоматизовані логістичні центри, що дозволяє суттєво скоротити терміни доставки товарів та полегшити роботу людини.

Окремо варто відзначити актуальну роль пристроїв переміщення малогабаритних вантажів, адже у зв'язку зі стрімким розвитком інтернет-торгівлі, сервісів доставки їжі, медичних товарів, а також постпандемічним попитом на безконтактне обслуговування, зросла потреба у компактних і енергоефективних автономних засобах доставки дрібних вантажів.

Останній етап доставки, так звана «остання миля», є одним з найбільш витратних компонентів у логістичному ланцюгу. За оцінками галузевих аналітиків, саме цей етап може формувати до 40–41 % загальних витрат на транспортування. Це зумовлено низкою чинників: необхідністю доставки дрібних партій вантажів, часто – адресною доставкою; впливом міського трафіку та неефективного використання транспортних засобів; витратами на оплату праці кур'єрів. У цьому контексті особливо актуальними стають автоматизовані та повністю автономні рішення, здатні скоротити ці витрати та підвищити ефективність логістичних операцій на завершальному етапі. Саме тому пристрої, здатні ефективно виконувати доставку малих вантажів у щільно забудованих міських умовах, стають ключовим елементом сучасної інфраструктури.

За даними різних аналітичних досліджень глобальний ринок автономних систем доставки у 2023–2024 роках оцінюється приблизно у 0,9–1,25 млрд дол. із прогнозованим зростанням до 4–4,2 млрд дол. до 2030 року (або навіть до 84,9 млрд дол.). При цьому за прогнозами ринок роботів-доставників зросте з 3,7 млрд дол. (станом на 2024 рік) до 184 млрд дол. до 2037 року.

Актуальність тематики досліджень підтверджується також обсягом світових інвестицій у роботів-доставників. Так, за оцінками аналітиків одного з найавторитетніших економічних видань США «The Wall Street Journal», у 2019 р. у США інвестиції у роботів для доставки їжі досягли 3.5 млрд дол.

Водночас, незважаючи на високий інтерес до автономних логістичних рішень, на практиці залишається недостатньо дослідженою і реалізованою саме категорія компактних двоколісних платформ, які завдяки своїм габаритам та маневреності є особливо придатними для експлуатації в умовах щільної міської забудови. Конструктивна нестійкість таких пристроїв обумовлює складність забезпечення їх балансу, що, у свою чергу, вимагає розробки ефективних систем стабілізації та інтелектуального керування.

Таким чином, дисертація О. Ю. Зарівного, присвячена створенню прототипу безпілотного двоколісного пристрою з балансуванням і синтезу керування його рухом, є важливим науковим дослідженням і відповідає актуальним завданням науки, техніки і суспільства.

Слід зауважити, що дисертація виконана здобувачем відповідно до науково-дослідних та ініціативних тематик кафедри конструювання машин і обладнання Національного університету біоресурсів і природокористування України. Зокрема, О. Ю. Зарівний брав участь у виконанні науково-дослідної роботи україно-ізраїльського проекту «Розробка нових модифікацій методу оптимізації PSO та їх застосування у задачах інженерії» (номер державної реєстрації 0123U103322) та ініціативної тематики кафедри конструювання машин і обладнання «Динамічна оптимізація вантажопідйомних та транспортуючих машин в агропромисловому виробництві» (номер державної реєстрації 0118U004170).

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації. Дисертаційне дослідження О. Ю. Зарівного включає в себе анотацію, вступ, шість розділів (тридцять два підрозділи), висновки, списки використаних джерел до кожного розділу (усього 147 позицій) та сім додатків.

Аналіз дисертації О. Ю. Зарівного свідчить про те, що авторові вдалося успішно досягти поставленої мети дослідження. Представлені наукові результати, висновки та практичні рекомендації є достатньо обґрунтованими, їх достовірність не викликає сумнівів. Завдяки використанню широкого кола наукових методів на кожному етапі дослідження автор комплексно розкрив завдання, поставлені в роботі, й отримав результати, що можуть бути застосовані в теорії й на практиці.

Аналіз дисертації свідчить про високий рівень обґрунтованості наукових положень, висновків і практичних рекомендацій, викладених у дослідженні. Автором застосовано комплексний підхід, що включає як теоретичне моделювання, так і практичну реалізацію технічного рішення. Особливістю цієї роботи є системне поєднання сучасних методів

математичного моделювання – зокрема побудови моделей типу «чорна скриня» на основі рекурентних нейромереж (LSTM) та «сіра скриня» через рівняння Лагранжа 2-го роду – з подальшою експериментальною верифікацією результатів.

Ретельно проведене моделювання процесів стабілізації, застосування оптимізаційних алгоритмів (наприклад, RING-ROT-PSO, VCT-PSO), а також синтез і налаштування ПІ- та ПІД-регуляторів на основі багатокритеріальної оптимізації забезпечили отримання достовірних і кількісно підтверджених висновків. Експериментальна перевірка на фізичному прототипі дозволила автору зіставити розрахункові та фактичні результати, що суттєво підвищує доказовість висунутих тверджень.

Дисертація вирізняється повнотою проведених досліджень: від аналізу сучасного стану проблеми до побудови працездатної інженерної моделі. Представлені технічні рішення та математичні підходи логічно пов'язані з метою дослідження та адекватно відображають поставлені завдання. Усе це свідчить про достатній рівень наукової зрілості автора та обґрунтованість сформульованих у роботі положень і рекомендацій.

Об'єктом дослідження є пристрій для транспортування малогабаритних вантажів, а предметом дослідження – оптимальне керування рухом пристрою в режимі стабілізації свого положення. Обрані методи дослідження повністю відповідають поставленим завданням.

Структура роботи передбачає кількісний аналіз наукових публікацій та патентів, де визначено основні напрями досліджень у сфері мобільних платформ, тенденції до впровадження автономних засобів переміщення та рівень зацікавленості до теми у науковому середовищі. Змістовний аналіз патентів дозволив проаналізувати конструкції наземних пристроїв переміщення малогабаритних вантажів і виявити ключові проблеми, з якими стикаються їх розробники та дослідники, зокрема складність стабілізації, обмеження щодо енергоспоживання та вантажопідйомності. Це, у свою чергу, дало змогу обґрунтовано визначити доцільну область застосування розроблюваного пристрою – автономна доставка в умовах міського середовища – та обрати оптимальну конструкцію з урахуванням габаритів, маси та маневреності. Окремо необхідно відзначити аналіз публікацій, що визначив підхід до математичного опису та синтезу оптимального керування стабілізацією положення механічних систем.

Здобувачем здійснено обґрунтування конструкції пристрою, призначеного для переміщення малогабаритних вантажів у міському середовищі. При цьому враховано вимоги до габаритів, вантажопідйомності, швидкості руху, енергоспоживання та стабілізації положення. Розроблено 3D-модель пристрою, підібрано елементну базу та виготовлено фізичний прототип з механізмом балансування, що працює за принципом зміщення центра ваги.

У третьому розділі проведено математичне моделювання динаміки пристрою за допомогою двох підходів: «чорна скриня» на основі рекурентної нейромережі LSTM для прогнозування динаміки, та «сіра скриня» на основі рівнянь Лагранжа 2-го роду з подальшою ідентифікацією параметрів через оптимізаційний алгоритм RING-ROT-PSO. Побудовані моделі лягли в основу подальшого синтезу системи керування положенням пристрою під час стабілізації в статичному режимі. Розглянуто застосування ПІ- та ПІД-регуляторів, сформовано багатокритеріальний функціонал оптимізації, проведено підбір коефіцієнтів регуляторів із використанням методу VCT-PSO. Оцінено динамічні характеристики отриманого керування за показниками кутових прискорень та похибок стабілізації.

У п'ятому розділі представлено результати експериментальної перевірки роботи системи стабілізації на фізичному прототипі. Виміряно параметри руху пристрою під впливом зовнішніх збурень та змінного навантаження. Здійснено порівняння експериментальних та теоретичних даних, що підтвердило ефективність синтезованої системи керування. Додатково виконано економічну оцінку доцільності впровадження розробленого рішення в задачах доставки вантажів.

Достовірність та наукова новизна одержаних результатів. Винесені на захист положення дисертації представляють собою науково обґрунтовані, достовірні результати і положення, які у сукупності сприятимуть подальшому розвитку теорії та практики створення двоколісних безпілотних мобільних платформ. Достовірність визначається використанням сучасних методів математичного моделювання (зокрема LSTM-мережі та рівнянь Лагранжа 2-го роду), застосуванням оптимізаційних алгоритмів, таких як RING-ROT-PSO та VCT-PSO, а також порівнянням результатів моделювання з даними натурного експерименту. Кількість проведених експериментальних досліджень на фізичному прототипі є достатньою і дозволила підтвердити адекватність розроблених моделей та ефективність створених алгоритмів керування. Додатково, зіставлення розрахункових та емпіричних показників (наприклад, кутових прискорень, кутів нахилу, декрементів згасання) підтверджує достовірність зроблених О. Ю. Зарівним висновків.

Автор дисертації:

1) запропонував застосування принципу зміщення центра ваги відносно точки опори як основу механізму балансування двоколісного безпілотного пристрою, у якості чинника, що забезпечує ефективну стабілізацію положення під час зупинки і транспортування малогабаритних вантажів в умовах міського середовища;

2) обґрунтував перспективність застосування двоколісних нестійких мобільних платформ для транспортування малогабаритних вантажів у міських умовах, визначив

їх переваги щодо мобільності, енергоефективності та економічності, а також необхідність використання механізмів балансування;

3) розробив конструкцію пристрою переміщення і створив фізичний прототип з механізмом активного балансування та алгоритмом стабілізації положення, реалізував апаратну частину для експериментальної перевірки;

4) побудував математичну модель прототипу пристрою переміщення з використанням підходів «чорна скриня» (на основі LSTM-мереж) та «сіра скриня» (на основі рівнянь Лагранжа) та визначив динамічні параметри системи за допомогою оптимізаційного алгоритму RING-ROT-PSO;

5) сформулював та реалізував задачу синтезу оптимального керування положенням пристрою з використанням ПІ- та ПІД-регуляторів, оптимізував їх параметри за допомогою алгоритму VCT-PSO, довів ефективність використання ПІД-регулятора в задачах стабілізації;

6) здійснив експериментальну перевірку функціонування системи керування на фізичному прототипі, проаналізував показники кутових прискорень і похибок, що дозволило підтвердити коректність математичних моделей та працездатність розробленого керування в умовах змінного навантаження.

У проведеному дослідженні було удосконалено: 1) методи синтезу оптимального керування рухом нестійких динамічних систем в режимі стабілізації свого положення; 2) підходи до визначення параметрів динамічних систем.

Відтак, виходячи із змісту виконаного дослідження, здобувач виокремив особливості та підходи до розробки конструкції безпілотних мобільних пристроїв доставки малогабаритних вантажів: визначив конструкцію (двоколісний балансуючий пристрій), що задовольняє умовам обмежених габаритів, маси та маневреності та підходи до стабілізації його положення та оптимального керування рухом. Усі визначені завдання роботи були успішно реалізовані: розроблено фізичний прототип пристрою, синтезовано алгоритм оптимального керування і шляхом експериментальних досліджень підтверджено висновки, зроблені в роботі. Отримані результати є достовірними і новими.

Практичне значення і впровадження одержаних результатів дослідження. Зміст одержаних у дисертації результатів доповнює наукові знання у сфері оптимального керування нестійкими динамічними системами та створення безпілотних двоколісних платформ для транспортування малогабаритних вантажів. Запропоновані технічні й алгоритмічні рішення сприяють розвитку галузі міської логістики, зокрема в задачах доставки «останньої милі». Отримані результати можуть бути використані: у подальших наукових дослідженнях зі стабілізації нестійких механічних систем, синтезу керування та впровадження адаптивних алгоритмів у робототехніці; під час створення мобільних роботизованих платформ у сфері

логістики, оборонної та аграрної промисловості; при проектуванні пристроїв автономної доставки, включно з малими транспортними роботами.

Повнота викладення наукових положень, висновків і результатів в опублікованих працях. Дисертація є самостійною науковою роботою, результати й досягнення котрої було отримано автором самостійно. Усі сформульовані в ній положення та висновки обґрунтовано на основі власних авторських досліджень з посиланнями на актуальні й сучасні наукові джерела. Результати дисертації відповідним чином висвітлено у 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. Якість та кількість наукових публікацій здобувача за темою дисертації вказує на сумлінність виконання ним публікаційних завдань з оприлюднення наукових результатів, висновків і рекомендацій, отриманих при здійсненні наукової праці.

Відповідність дисертації встановленим вимогам. Дисертація «Оптимізація режимів руху пристрою для переміщення малогабаритних вантажів» відповідає спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» та вимогам 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 р. № 44.

Змістове наповнення розділів дисертації узгоджується з темою кожного з розділів, що робить зміст дисертації відповідним темі роботи. Висновки, сформульовані автором на основі проведеного дослідження є чіткими, доведеними та підтвердженими. Оформлення дисертації відповідає встановленим нормативними документами вимогам.

Анотація до дисертації повною мірою відповідає її змісту, структурі та основним результатам. Вона стисло, проте інформативно передає суть дослідження, його актуальність, наукову новизну, мету, завдання та практичну значущість. Текст анотації відповідає вимогам академічного стилю, логічний, граматично і стилістично коректний.

Дискусійні положення та зауваження щодо змісту дисертації. Загалом позитивно оцінюючи дисертацію О. Ю. Зарівного, вбачається за доцільне звернути увагу на окремі положення та висновки дисертації, що потребують уточнення або додаткової аргументації, та можуть слугувати підґрунтям наукової дискусії, зокрема:

1. У розділі 1 «Аналіз публікацій за темою дослідження» номери посилань на джерела інформації не відповідають номерам у «Списку використаних джерел» до першого розділу. Наприклад посилання [10] на с. 22 дисертації у «Списку використаних джерел» має позицію [9] і т. д., крім того в тексті першого розділу є посилання на 92 використаних джерела, а у списку їх 91-не, що ускладнює перевірку використаної інформації.

2. Здобувач не провів якісний аналіз наукових публікацій, присвячених конструктивним особливостям механічної частини колісних платформ і їхньому впливу на працездатність пристроїв. У дисертації акцент зроблено переважно на кількісний аналіз, без належного осмислення технічних рішень, запропонованих в існуючих роботах.

3. У розділі 2 недостатньо розкрито питання впливу геометричних параметрів елементів пристрою (наприклад, розміру коліс, ширини бази, маси компонентів) на його стійкість та ефективність стабілізації. Відсутній аналіз варіативності цих параметрів.

4. У розділі 3 застосування підходу «сіра скриня» базується на математичній моделі, однак не обговорено можливі похибки моделювання або чутливість моделі до зміни вхідних параметрів. Відсутній аналіз достовірності моделі з точки зору механіки.

5. У висновках до розділу 5 зроблено твердження про ефективність роботи пристрою, але не наведено статистичної перевірки значущості результатів експерименту. Відсутнє визначення довірчих інтервалів або оцінка похибок вимірювань.

6. У роботі практично не розглядаються ризики чи обмеження запропонованої системи стабілізації в умовах реального середовища (нерівності дороги, зовнішні вібрації, погодні умови і т. д.).

Висловлені зауваження та рекомендації характеризують складність дослідженої проблеми та суттєво не впливають на її загальну позитивну оцінку та науково-практичну значущість.

Загальний висновок та оцінка дисертації. Вищенаведене свідчить про високий рівень наукової компетентності О. Ю. Зарівного у досліджуваній проблематиці. Дисертація виконана відповідно до встановлених вимог до подібних наукових праць, засвідчує наявність у здобувача дослідницьких та аналітичних здібностей і містить аргументований авторський доробок за темою дослідження.

Дисертація є самостійним, завершеним, оригінальним науковим дослідженням, виконаним на актуальну тему, що містить нові науково обґрунтовані результати проведених досліджень, які розв'язують конкретне наукове завдання, а саме: оптимізація режимів руху пристрою для переміщення малогабаритних вантажів.

Отже, дисертація О. Ю. Зарівного на тему: «Оптимізація режимів руху пристрою для переміщення малогабаритних вантажів» за змістом, обсягом, актуальністю, ступенем наукової новизни, обґрунтованістю, науковою та практичною значущістю здобутих результатів відповідає спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» та вимогам наказу Міністерства освіти і науки України № 40 від 12 січня 2017 року «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» (з наступними 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 № 44 від 12 січня 2022 року (з наступними змінами).

З огляду на зазначене Зарівний Олександр Юрійович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» галузі знань 13 «Механічна інженерія».

**Офіційна опонентка доцентка кафедри «Деталі машин та гідропневмосистеми»
Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»,
кандидатка технічних наук, доцентка Мар'яна СТРИЖАК**