

РЕЦЕНЗІЯ

старшого викладача кафедри конструювання машин і обладнання Національного університету біоресурсів і природокористування України, доктора філософії зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» **Олександра СПОДОБИ** на дисертацію **Олександра ЗАРІВНОГО** 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 теми дисертаційного дослідження. Тема дослідження є актуальною, оскільки ключовою перешкодою для практичного застосування двоколісних мобільних пристроїв (таких як самокати) у сфері доставки є їхня природна нестійкість. Це вимагає розробки складних систем балансування та просунутих алгоритмів керування, без яких ці пристрої не можуть бути широко впроваджені, а їхній значний потенціал залишається нерозкритим. Відповідно, вагомим завданням є досягнення стійкості як у статичних, так і динамічних режимах, що вимагає математичного моделювання динаміки руху та оптимізації режимів керування. Саме поетапне вирішення цих задач, починаючи від створення прототипу з механізмом балансування до синтезу оптимальних режимів руху, формує необхідну базу для успішної інтеграції автономних двоколісних засобів у логістику малогабаритних вантажів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана згідно з науково-дослідними та ініціативними тематиками кафедри конструювання машин і обладнання Національного університету біоресурсів і природокористування України. Зокрема, автор брав участь у виконанні науково-дослідної роботи спільного українсько-ізраїльського проєкту «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).

Значення одержаних результатів для науки й практики та рекомендації щодо їх можливого використання. Розглянуті в дисертації питання є ключовими для розвитку безпілотної доставки малогабаритних вантажів за допомогою двоколісних пристроїв. Розроблена фізична модель із механізмом балансування, а також апробовані підходи «чорна скриня» та «сіра скриня» для моделювання, мають значну цінність як для наукових досліджень, так і практичного застосування. Запропоновані ефективні інструменти для синтезу оптимального керування рухом нестійких динамічних систем та моделювання складних пристроїв з невідомими параметрами. Завдяки цьому спрощується процес розробки та впровадження таких пристроїв, повністю розкриваючи їхній потенціал. Запропоновані рішення рекомендовані для використання у сучасних логістичних системах та робототехніці.

Повнота викладення матеріалів досліджень в опублікованих працях.

За результатами виконаних дисертаційних досліджень загалом опубліковано 13 наукових праць, у яких представлено основні наукові результати дисертації, серед 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.

Винесені на захист положення наукової новизни та основні результати дослідження Олександра Зарівного з достатньою повнотою оприлюднено у відкритому друці. Вимоги щодо необхідної кількості статей у наукових виданнях дотримано.

Структура і зміст дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел до кожного з розділів та додатків. Загальний обсяг роботи складає 216 сторінок. Дисертація містить 45 ілюстрації, 11 таблиць. До списку використаних джерел увійшло 148 найменувань.

Робота починається з викладу актуальності теми, її інтеграції у наукові програми, а також визначенням чіткої мети, завдань, наукової новизни та практичного значення. Автор здійснив детальний аналіз існуючих рішень та окреслив оптимальні сценарії для застосування двоколісного пристрою у сфері доставки малогабаритних вантажів. На цій базі було розроблено концепцію пристрою, окреслено необхідні параметри вантажу та конструктивні вимоги до конструкції.

У другому розділі на основі концепції пристрою підібрано необхідні комплектуючі та виконано моделювання пристрою в САПР. На основі 3-Д моделі створено фізичну модель пристрою. На основі мікроконтролера STM32 реалізовано функції опитування датчиків та реалізовано базові функції керування приводами пристрою, які в подальшому дозволили реалізувати алгоритми керування.

Наступний етап передбачав розробку математичної моделі, яка описано в розділі 3. Розробка математичної моделі виконана з використанням двох підходів. Перший з них («чорна скриня») реалізований з використанням рекурентних штучних нейронних мереж LSTM. Так на основі масиву експериментальних даних у вигляді часового ряду було навчено нейронну мережу, яка моделює характер руху реального пристрою. Масив містив дані кута нахилу пристрою та кутової швидкості відхилення механізму балансування та був поділений на навчальну та тестову вибірку. Похибка передбачення на 1 та 10 кроків вперед була незначною, що дозволило зробити висновок про адекватність отриманої математичної моделі.

Другий підхід («сіра скриня») реалізовано на основі рівнянь Лагранжа, які складені на основі динамічної моделі пристрою з двома незалежними координатами (кут нахилу пристрою та кут відхилення механізму балансування), а невідомі параметри фізичної моделі пристрою знайдено за допомогою модифікованого методу рою часточок (RING-ROT-PCO)

з експериментальних даних. Похибки при порівнянні експериментальних та теоретичних даних були мінімальні, що показує адекватність отриманої математичної моделі.

У четвертому розділі було поставлено та успішно вирішено задачу синтезу оптимального керування рухом пристрою в режимі стабілізації свого положення під час зупинки. Для забезпечення оптимальності керування застосовано комплексний критерій оптимізації, який знаходився як алгебраїчна сума термінального та квадратичного інтегрального критерію. Термінальний критерій забезпечує умову збереження стабілізації положення пристрою, а другий відповідає за плавність режиму роботи приводу механізму балансування. Задачу було розв'язано для випадку застосування ПД- та ПІ-регуляторів та для різних варіацій вагових коефіцієнтів інтегрального критерію.

Теоретична перевірка отриманого керування, а згодом і експерименти на фізичному прототипі, підтвердили коректність отриманих результатів. Додатково було проведено експериментальну перевірку з додатковою корисною вагою 1–3 кг, що показала необхідність перераховувати коефіцієнти регулятора для різної ваги.

Далі проведено аналіз економічної ефективності, що демонструє суттєве зниження витрат на доставку (у 2–5 разів) завдяки використанню розробленого пристрою, підкреслюючи його комерційну привабливість. Висновки дисертації відзначаються цілісністю, обґрунтованістю та повним узгодженням з поставленою метою й завданнями дослідження.

Відсутність (наявність) порушення академічної доброчесності. Дисертація є повністю самостійною науковою працею, що характеризується обґрунтованістю висновків та рекомендацій. Автор ретельно посилався на всі використані ідеї, результати та текстові матеріали інших дослідників. У роботі не зафіксовано жодних випадків привласнення чужих здобутків без належного цитування. Отже, дисертаційне дослідження Олександра Зарівного відповідає вимогам академічної доброчесності.

Питання для дискусійного обговорення та недоліки дисертації щодо її змісту та оформлення:

1. У дисертації спостерігається невідповідність між кількістю сформульованих завдань та кількістю представлених у висновках результатів. Доцільно було б узгоджено сформулювати висновки відповідно до кожного із зазначених у вступі завдань, що підвищило б наукову обґрунтованість і завершеність роботи.

2. У роботі не враховувалася деформація покриття та її кривизна, що може впливати на процес стабілізації пристрою.

3. У роботі не проводилися розрахунки на міцність конструктивних елементів пристрою, це залишає відкритим питання надійності пристрою в умовах практичного застосування.

Водночас наведені зауваження та дискусійні моменти дисертаційного дослідження принципово не впливають на наукову та практичну цінність одержаних автором результатів і не знижують у цілому високої позитивної оцінки роботи.

Загальний висновок. Дисертація є завершеною, самостійно підготовленою кваліфікаційною науковою працею, в якій отримано нові науково обґрунтовані та практично цінні результати, що вирішують важливе наукове завдання. Актуальність обраної теми дисертації, ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, новизна та повнота викладення в опублікованих наукових працях повністю відповідають вимогам наказу Міністерства освіти і науки України № 40 від 12 січня 2017 року «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» та 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, а її автор Зарівний Олександр Юрійович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» галузі знань 13 «Механічна інженерія».

Рецензент старший викладач кафедри конструювання машин і обладнання Національного університету біоресурсів і природокористування України, доктор філософії зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» Олександр СПОДОБА