

## РЕЦЕНЗІЯ

доцента кафедри конструювання машин і обладнання  
Національного університету біоресурсів і природокористування України,  
кандидата технічних наук, доцента **КОРОБКА Миколи Миколайовича**  
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 теми дисертаційного дослідження.** Дослідження є актуальним через проблему забезпечення стійкості двоколісних мобільних пристроїв (типу самокат) під час руху та зупинки, що суттєво ускладнює їхнє практичне використання у задачах транспортування вантажів. Ці пристрої є нестійкими системами, які вимагають спеціальних механізмів балансування та складних алгоритмів керування, що обмежує їхнє широке розповсюдження та не дозволяє розкрити їхні перспективи. Відтак, забезпечення стійкості таких пристроїв через точне математичне моделювання, оптимізацію систем керування є важливим. Це дослідження, з його поетапним підходом, створює основу для впровадження двоколісних безпілотних пристроїв у міську систему доставки малогабаритних вантажів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Роботу виконано 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).

**Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.** Наукові положення, висновки та рекомендації дисертації є обґрунтованими та достовірними. Це підтверджується коректним застосуванням сучасного математичного апарату, використанням методів системного аналізу та чисельного моделювання. Достовірність результатів забезпечена порівнянням теоретичних розрахунків з результатами експериментальних досліджень.

**Значення одержаних результатів для науки й практики та рекомендації щодо їх можливого використання.** Отримані результати дисертації створюють основу для впровадження двоколісних пристроїв у безпілотну доставку малогабаритних вантажів. Розроблені фізична модель з механізмом балансування, а також підходи «чорна скриня» та «сіра скриня» для математичного моделювання мають вагоме значення для науки

та практики. Вони можуть бути використані для синтезу оптимального керування нестійкими динамічними системами та побудови моделей пристроїв зі складною конструкцією. Це спростить розробку та використання нестійких пристроїв, дозволяючи реалізувати їх переваги. Результати досліджень актуальні для сфери логістики та робототехніки.

#### **Повнота викладення матеріалів досліджень в опублікованих працях.**

За результатами виконаних дисертаційних досліджень загалом опубліковано 13 наукових праць, у яких представлені 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 О. Ю. Зарівного з достатньою повнотою оприлюднено у відкритому друці. Вимоги щодо необхідної кількості статей у наукових фахових виданнях дотримано.

**Структура і зміст дисертації** повною мірою охоплює предмет дисертаційного дослідження. Представлені автором дослідження свідчать про системне й ґрунтовне опрацювання проблем та наукових завдань, які вирішуються у дисертаційному дослідженні, та високий рівень наукової підготовки здобувача, його наукову зрілість.

У **вступі** подано обґрунтування обраної теми дослідження, вказується, як робота пов'язана з науковими програмами, планами і темами. Подана мета, завдання, об'єкт, предмет і методи дослідження. Підкреслюється наукова новизна і практичне значення отриманих результатів, а також надаються відомості щодо їх апробації. Висвітлена інформація про кількість публікацій, в яких ґрунтовно представлені основні положення дисертаційного дослідження.

У **першому розділі** проведено кількісний та змістовний аналіз статей і патентів за темою дослідження. Визначено доцільні сфери та сценарії застосування двоколісного пристрою для переміщення малогабаритних вантажів.

У **другому розділі** виконано розробку концепції пристрою відповідно до умов використання в задачах доставки в межах мікрорайону «Варшавський». Виконано побудову фізичної моделі пристрою з обґрунтуванням вибору складових частин їх взаємодії. Складено алгоритми роботи керування пристроєм в режимі стабілізації свого положення.

У **третьому розділі** виконано побудову математичної моделі пристрою з використанням двох методів: «чорна скриня», «сіра скриня». У результаті отримано математичні моделі у вигляді рекурентної штучної нейронної мережі з шарами LSTM та у вигляді рівнянь Лагранжа 2-го роду з уточненими динамічними параметрами пристрою. Обидва методи показали свою працездатність і адекватність.

У **четвертому розділі** виконано постановку задачі синтезу оптимального керування рухом пристрою в режимі стабілізації свого положення. Розроблено комплексний критерій оптимізації та розв'язано задачу оптимізації для випадку застосування ПІ- та ПІД-регуляторів. Виконано теоретичну перевірку отриманого керування на математичній моделі. У результаті отримані розв'язки для ПІД-регуляторів мають в 20 разів менші показники кутових прискорені і дозволяє виконати перевірку експериментально.

У **п'ятому розділі** проведено експериментальну перевірку якості роботи отриманого керування на фізичній моделі пристрою. У результаті отримано графіки руху пристрою, які відповідають теоретично отриманим результатам, що дає підстави вважати задачу синтезу оптимального керування виконаною, а використані методи дієвими.

У **шостому розділі** проведено розрахунок економічних показників пристрою, оцінено вартість фізичної моделі пристрою та функціонального прототипу. Проведено порівняння вартості однієї доставки автономним пристроєм і кур'єром на самокаті, в результаті застосування пристрою в 2 рази зменшує вартість доставки в перший рік і в 5 разів у подальші роки використання. Це показує практичну доцільність впровадження розробленого пристрою у сферу доставки малогабаритних вантажів.

Завершується дисертація **висновками**. Висновки дисертації є цілісними, логічними та обґрунтованими, відповідають меті та завданням дослідження й містять важливі теоретичні та практичні положення щодо розв'язання науково-практичної задачі, яка полягає в покращенні ефективності доставки малогабаритних вантажів, шляхом розробки двоколісного пристрою та синтезу оптимального керування його рухом. Отримані результати є основою для створення повноцінного функціонального пристрою.

**Відсутність (наявність) порушення академічної доброчесності.** У процесі рецензування дисертації не виявлено жодних фактів, що свідчили б про порушення академічної доброчесності. Дисертація є самостійно виконаною кваліфікаційною науковою працею здобувача, в якій сформульовано обґрунтовані наукові висновки та практичні рекомендації. Усі використані тексти, результати та ідеї інших авторів мають посилання на відповідні джерела.

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

1. У пункті 3.2.1 не повною мірою вказані припущення, які приймалися при побудові математичної моделі пристрою.

2. Яким чином проведені експерименти відповідають реальним умовам роботи пристрою?

3. Варто було б детальніше розглянути питання енергоспоживання системи керування та механізму балансування. Це дозволить краще розрахувати реальну енергоефективність при розрахунку економічних показників.

4. У розділі 5 було б цікаво побачити аналіз поведінки пристрою при русі на похилих поверхнях або під час долаття невеликих перешкод, що є типовим для міського середовища.

5. Деякі формулювання в тексті могли б бути більш лаконічними, що поліпшило б загальне сприйняття матеріалу.

Висловлені зауваження і побажання, скоріше, є рекомендаціями для подальшої наукової роботи й не зменшують високої оцінки дослідження О. Ю. Зарівного в цілому, його наукової та практичної значущості.

**Загальний висновок.** Дисертація на тему «Оптимізація режимів руху пристрою для переміщення малогабаритних вантажів» є завершеним, цілісним, самостійним науковим дослідженням, яке має наукову новизну, теоретичне та практичне значення і відповідає 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 доцент кафедри конструювання машин і обладнання Національного університету біоресурсів і природокористування України, кандидат технічних наук, доцент Микола КОРОБКО**