

*Голові разової спеціалізованої вченої
ради Державного університету
інформаційно-комунікаційних
технологій
доктору технічних наук, професору
Віктору ВИШНІВСЬКОМУ
вул. Солом'янська, 7, м. Київ, 03110*

ВІДГУК

офіційного опонента

кандидата технічних наук, доцента, завідувача кафедри інформаційної та кібернетичної безпеки імені професора Володимира Бурячка Київського столичного університету імені Бориса Грінченка

Складанного Павла Миколайовича

на дисертаційну роботу «Моделі та алгоритми адаптивної маршрутизації для C2C логістики на основі глибокого навчання» Коваленка Данила Сергійовича, подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія

Актуальність теми дослідження. У зв'язку зі стрімким розвитком електронної комерції, поширення моделей спільного споживання та зростаючої урбанізації логістика типу *mer*) набуває ключового значення, оскільки передбачає взаємодію між приватними особами у процесі доставки малогабаритних вантажів, що створює нові виклики для традиційних логістичних підходів.

Традиційні системи маршрутизації, які базуються на заздалегідь відомих даних або працюють зі статичними алгоритмами, виявляються малоефективними в умовах високої динаміки міського середовища, непередбачуваності попиту та потреби в оперативному коригуванні рішень. Зміни трафіку, погодні умови, несподівані події та обмеженість ресурсів вимагають застосування методів, здатних адаптуватися у режимі реального часу. Враховуючи ці обставини, використання технологій глибокого навчання та підкріплювального навчання є не лише доцільним, а й необхідним. Ці підходи дозволяють створювати інтелектуальні системи управління логістичними процесами, що здатні до самонавчання, адаптації до змін середовища та прийняття оптимальних рішень в умовах невизначеності.

Дисертаційна робота Коваленка Данила Сергійовича логічно вписується у сучасний науковий дискурс, пропонуючи ефективні рішення проблем адаптивної маршрутизації у C2C логістиці, тому є актуальною і практично значущою, оскільки результати можуть бути

безпосередньо впроваджені як у наукових дослідженнях, так і в практиці компаній, що надають послуги останньої милі доставки.

Оцінка наукового рівня дисертації, представлених теоретичних та експериментальних результатів проведених здобувачем досліджень, їх наукової обґрунтованості, рівня виконання поставленого наукового завдання

Загальна характеристика дослідження. У вступі дисертаційної роботи окреслено загальний науковий контекст дослідження, обґрунтовано актуальність теми в умовах розвитку електронної комерції та динамічних логістичних систем типу C2C. Автор чітко сформулював мету, завдання, об'єкт і предмет дослідження, визначив методологічну базу роботи та структуру дисертації. Вступ містить логічне підґрунтя для подальших теоретичних і прикладних розробок у рамках дослідження.

Перший розділ дисертаційної роботи присвячено ґрунтовному аналізу підходів до побудови систем маршрутизації в контексті логістики типу C2C. У розділі детально розглянуто загальні характеристики систем клієнт-клієнт доставки, акцентується на зростаючій ролі C2C моделі у сфері електронної комерції та пов'язаних з нею логістичних викликах, зокрема динамічності попиту, невизначеності транспортного середовища та необхідності швидкої адаптації маршрутів. Автор систематизує існуючі методи маршрутизації — від класичних евристик до сучасних інтелектуальних алгоритмів, — і критично оцінює їх придатність до застосування в умовах, характерних для C2C логістики. Аналіз засвідчує, що більшість традиційних підходів не здатні забезпечити оперативне реагування на зміни в реальному часі, обмежені в масштабованості та недостатньо враховують специфіку децентралізованих систем доставки. На основі цього обґрунтовується необхідність створення нової адаптивної системи маршрутизації, здатної до навчання в процесі функціонування та прийняття рішень у динамічному середовищі. У результаті розділ формує теоретичну та методологічну базу для подальшої розробки моделі прогнозування попиту і адаптивного алгоритму маршрутизації, визначає ключові вимоги до таких систем, а також формулює мету та завдання всього дослідження.

Другий розділ дисертаційної роботи присвячено розробці математичних моделей адаптивної маршрутизації, орієнтованих на специфіку C2C логістики. У цьому розділі автор формалізує задачу управління маршрутами доставки у динамічному середовищі як стохастичну задачу прийняття рішень, що дозволяє враховувати змінність попиту, конкуренцію між агентами та обмеження логістичних ресурсів. Ключовим елементом моделювання виступає розробка моделі прогнозування попиту на основі функціональної регресії, яка забезпечує оцінювання ймовірності появи логістичних завдань у різних зонах міського простору в конкретні часові інтервали. Такий підхід дозволяє здійснювати

попередній розподіл виконавців відповідно до очікуваного попиту, що підвищує ефективність функціонування системи в умовах високої навантаженості. У моделі передбачено використання стохастичної апроксимації для ітеративного оновлення прогнозованих параметрів, що дозволяє алгоритму адаптуватися до змін у середовищі без необхідності повного перенавчання. Крім того, автором запропоновано архітектуру системи прийняття рішень, що інтегрує прогнозні дані із загальною моделлю маршрутизації, і забезпечує підготовку до реалізації адаптивних рішень у реальному часі. Запропоновані математичні моделі відзначаються формальною строгістю, здатністю до масштабування та сумісністю з технологіями підкріплювального навчання, що створює основу для реалізації алгоритмів динамічного управління доставками в наступних розділах.

Третій розділ дисертаційної роботи зосереджено на розробці методу адаптивної маршрутизації та алгоритму корекції маршруту для C2C логістики, що функціонує в умовах динамічного міського середовища. Автором сформульовано загальну структуру системи прийняття рішень, яка базується на концепції підкріплювального навчання та використанні Марковських процесів прийняття рішень. У рамках запропонованого підходу система оптимізує маршрути доставки, навчаючись на основі накопиченого досвіду взаємодії з середовищем. Модель враховує такі параметри, як поточний стан попиту, наявність виконавців, транспортні обмеження, затори, час доби тощо, а процес навчання орієнтований на максимізацію функції винагороди, що охоплює як логістичні (витрати, час), так і експлуатаційні показники (навантаження, розподіл ресурсів). Автор вводить розширену функцію винагороди, яка дозволяє балансувати між миттєвими і довгостроковими вигодами, а також забезпечує стійкість роботи в умовах нестабільного попиту. Розроблений алгоритм корекції маршруту реалізує динамічне оновлення траєкторії доставки на основі поточної інформації, враховуючи як локальні, так і глобальні зміни у системі. Особливістю запропонованого підходу є його здатність до автономного прийняття рішень, що базується не на заздалегідь заданих правилах, а на здобутому досвіді, що забезпечує високий рівень адаптивності. Розділ демонструє інтеграцію математичних моделей попереднього розділу з алгоритмічними засобами реалізації інтелектуального управління маршрутами, формуючи повноцінний інструмент для подальшої практичної реалізації.

Четвертий розділ дисертаційної роботи присвячено практичній реалізації та експериментальній перевірці ефективності запропонованого алгоритму адаптивної корекції маршруту для C2C логістики. У розділі докладно описано створене програмне забезпечення, яке реалізує розроблені математичні моделі та алгоритми на основі підкріплювального навчання. Архітектура програмної системи включає модулі для обробки вхідних даних, прогнозування попиту, прийняття рішень, навчання агентів та візуалізації результатів, що забезпечує повний цикл логістичного управління в умовах динамічного середовища. Для

оцінювання ефективності системи проведено серію симуляційних експериментів у різних сценаріях навантаження, зокрема в умовах пікових періодів, змінної щільності попиту та обмеженості транспортних засобів. Експерименти підтверджують суттєве зниження середнього часу доставки та витрат на транспортування порівняно з класичними методами, зокрема у випадках, коли необхідно оперативно адаптувати маршрути до змін у середовищі. Крім симуляційних досліджень, автор наводить приклади апробації розробленої системи в реальних умовах, зокрема через її впровадження у логістичних процесах компанії. Описано також результати її використання у виробничих сценаріях, де спостерігалось покращення ключових логістичних показників, таких як точність виконання замовлень, рівень завантаження виконавців і стійкість системи до зовнішніх змін. Загалом, четвертий розділ демонструє повну працездатність запропонованого підходу та підтверджує доцільність його використання в практиці управління C2C доставкою.

У висновках наведено одержані результати, їх наукова новизна та практична цінність.

У додатках наявні копії актів впровадження та псевдокод розроблених алгоритмів та моделей.

Наукова новизна особисто отриманих здобувачем результатів полягає в наступному:

вперше розроблено модель прогнозування попиту та розподілу логістичних завдань, яка за рахунок використання за методу функціональної регресії для прогнозування локалізованих піків попиту та теорії стохастичної апроксимації для динамічного вибору оптимальних рішень, забезпечує адаптивний механізм розподілу задач між виконавцями на основі прогнозованих параметрів;

вперше розроблено метод адаптивної маршрутизації для систем доставки типу C2C, що ґрунтується на розробленій моделі прогнозування попиту та механізмі стохастичного прийняття рішень у динамічному середовищі, та дозволяє приймати оптимальні рішення щодо виконання доставок, адаптуючись до змін у середовищі, конкуренції між агентами та з урахуванням обмежених ресурсів;

вперше розроблено алгоритм адаптивної корекції маршруту, що ґрунтується на розробленому методі адаптивної маршрутизації та за рахунок використання розширеної функції винагороди та жадібної евристики з підкріплювальним навчанням для Марковського процесу прийняття рішень, забезпечує динамічне оновлення оптимального маршруту доставки згідно актуальної логістичної ситуації, що знизить критичні показники часу та вартості доставки.

Таким чином поставлене в дисертаційному дослідженні наукове завдання виконане в повному обсязі.

Достовірність наукових положень. Достовірність наукових положень в дисертації підтверджується: цілісною теоретико-методологічною базою дослідження, формальною

строгістю побудови математичних моделей, методів та алгоритмів, а також відповідністю обраного інструментарію сучасним науковим підходам у галузі інтелектуальної маршрутизації. Важливими елементами, що забезпечують наукову обґрунтованість, є використання концепції Марковських процесів прийняття рішень, методів стохастичної апроксимації, функціональної регресії та підкріплювального навчання — усі ці компоненти мають глибоке аналітичне підґрунтя та широко використовуються в задачах оптимізації в умовах невизначеності.

Наукове значення дисертаційної роботи полягає у подальшому розвитку методології побудови інтелектуальних систем адаптивної маршрутизації для C2C логістики шляхом застосування підходів глибокого та підкріплювального навчання для прийняття рішень в умовах динамічної невизначеності та обмежених ресурсів.

Практичне значення дисертаційної роботи полягає у створенні та впровадженні ефективних програмно-алгоритмічних засобів для управління процесами доставки в системах C2C логістики, що функціонують в умовах динамічного міського середовища. Розроблені алгоритми адаптивної маршрутизації та корекції маршрутів забезпечують можливість оперативного реагування на зміну попиту, транспортну ситуацію, обмеження ресурсів, що значно підвищує ефективність роботи логістичних платформ, орієнтованих на доставку «останньої милі».

Реалізоване у рамках дослідження програмне забезпечення має високу адаптивність до параметрів середовища, підтримує горизонтальну масштабованість та може бути інтегроване до існуючих логістичних систем без потреби в повній їх перебудові. Відкрита архітектура програмного комплексу дозволяє використовувати його в широкому спектрі прикладних задач — від міської кур'єрської доставки до оптимізації логістики в обмежених виробничих середовищах. Запропоновані алгоритми можуть бути легко модифіковані для врахування специфічних обмежень галузевих застосувань.

Ефективність практичного застосування підтверджується результатами експериментальної перевірки, яка показала зниження логістичних витрат на 15–25% та скорочення часу доставки на 20–22% у порівнянні з традиційними підходами. Розроблені рішення впроваджені в навчальний процес Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій, проаналізовані Інститутом програмних систем НАН України та адаптовані до виробничих процесів підприємства «УКР-ОН», що демонструє їхню придатність до практичного використання в умовах реального функціонування логістичних систем.

Мова та стиль викладення дисертації дозволяють зрозуміти суть розроблених наукових положень та отриманих практичних результатів. Дисертація відповідає вимогам, які висуваються до її оформлення.

Оцінка рівня наукових публікацій здобувача та підтвердження повноти викладу в них основних результатів дисертації. Основні результати за темою дисертаційного дослідження опубліковані в 11 наукових публікаціях, серед яких чотири у фахових виданнях України категорії В, сім тез доповідей на конференціях, серед яких одна індексується в наукометричній базі Scopus. Апробація результатів дослідження відбувалась на конференціях різного рівня в період з 2022 по 2025 роки.

Недоліки та зауваження.

У дисертаційній роботі доцільно було б надати більш розгорнуте пояснення щодо вибору конкретних архітектур нейронних мереж, які використовуються в рамках алгоритмів адаптивної маршрутизації. Зокрема, доцільним є розширене аргументування переваг використання глибоких Q-мереж (Deep Q-Networks) у порівнянні з альтернативними підходами, такими як Actor-Critic, Proximal Policy Optimization (PPO) чи Asynchronous Advantage Actor-Critic (A3C). Додаткове обґрунтування вибору конкретної архітектури дозволило б чіткіше продемонструвати переваги розробленого підходу у контексті задач динамічної маршрутизації з високим ступенем невизначеності.

У розділі, присвяченому практичному впровадженню системи, бажано було б конкретизувати, які саме компоненти запропонованого алгоритмічного комплексу були впроваджені у виробничі або тестові середовища. Це дозволило б оцінити рівень інтеграції системи, її модульність та адаптованість до реальних технологічних процесів. Крім того, доцільним є представлення ширшого спектру кількісних показників ефективності, отриманих у результаті впровадження — наприклад, зміни продуктивності, економії витрат у грошовому вираженні, точності прогнозування або кількості успішно адаптованих маршрутів. Включення подібних метрик зробило б оцінку ефективності більш предметною та об'єктивною.

Окремі терміни, використані в роботі, такі як «горизонтальна масштабованість» або «адаптивна корекція маршруту», потребують уточнення або ілюстрації. Така конкретизація допомогла б уникнути неоднозначного трактування і забезпечила б повніше розуміння запропонованих підходів для широкого кола фахівців, у тому числі тих, хто не спеціалізується на інтелектуальних логістичних системах. Наведення прикладних сценаріїв використання цих понять дозволило б краще розкрити прикладну сутність розробок та їх потенціал до масштабування і адаптації у різних умовах.

Вказані недоліки не знижують наукової цінності та практичного значення одержаних наукових результатів і не впливають на загальну позитивну оцінку роботи.

Висновок. На основі критичного вивчення дисертації та праць здобувача, опублікованих за темою дисертації, об'єктивно встановлено, що дисертація Коваленка Д.С. є завершеною кваліфікаційною науковою працею, що відповідає вимогам освітньо-наукової програми за спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія, містить нові науково обґрунтовані результати проведених здобувачем досліджень, які вирішують конкретне наукове завдання, пов'язане з підвищенням ефективності процесів маршрутизації в С2С логістиці шляхом розробки моделі, методу та алгоритму адаптивного управління маршрутами доставки на основі прогнозування попиту та технологій глибокого навчання з можливістю врахування динамічних змін логістичної ситуації в реальному часі. Дане наукове завдання має значення для створення та впровадження ефективних програмно-алгоритмічних засобів для управління процесами доставки в системах С2С логістики, що функціонують в умовах динамічного міського середовища.

Дисертаційна робота Коваленка Д.С. на тему «Моделі та алгоритми адаптивної маршрутизації для С2С логістики на основі глибокого навчання» відповідає діючим вимогам, що висуваються до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії, передбачених «Порядком 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, а її автор, КОВАЛЕНКО Данило Сергійович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія.

Офіційний опонент:

завідувач кафедри інформаційної та кібернетичної безпеки

імені професора Володимира Бурячка

Київського столичного університету

імені Бориса Грінченка,

кандидат технічних наук, доцент

