

## **РЕЦЕНЗІЯ**

на дисертаційну роботу

Череватенка Олексія Володимировича

на тему «Спосіб побудови віртуальної комп'ютерної мережі на основі технології SDN»,

представлену на здобуття ступеня доктора філософії

в галузі знань 12 – Інформаційні технології

за спеціальністю 123 – Комп'ютерна інженерія

### **Актуальність теми дисертації.**

Зростання кількості користувачів комп'ютерних мереж призводить до підвищення ризиків виникнення таких факторів при функціонуванні мережевої інфраструктури: перевантаження каналів зв'язку, падіння швидкості з'єднання та, як наслідок, відмови окремих вузлів чи усієї мережі в цілому. Окрім того, наявність людського фактору в налаштуванні мережі та необхідність окремої конфігурації для кожного вузла значно погіршує гнучкість та масштабованість традиційних комп'ютерних мереж.

Технологія мереж, що програмно визначені (software-defined networking, SDN) дозволяє здійснювати управління та конфігурування мережевих пристроїв програмним чином за допомогою контролера. Коли технологія SDN була вперше представлена, рівень продуктивності мережевих пристроїв та їх обчислювальних потужностей не дозволяв масове її впровадження. Зараз, коли контролер може ефективно функціонувати на базі персонального комп'ютера або віртуальної машини, існує можливість для створення SDN мереж будь-якої розмірності та для передачі будь-якого типу трафіку. Для повного розкриття потенціалу використання мереж SDN актуальним є поєднання технологій SDN та віртуальних мереж. На відміну від фізичних, віртуальні мережі при необхідності їхнього розширення не потребуватимуть переміщення та повторної комутації пристроїв.

Актуальною проблемою також є необхідність передавати різні типи трафіку у сучасних комп'ютерних мережах. Так, існують типи трафіку з різними вимогами до надійності – наприклад, трафік, пов'язаний з фінансовими операціями, вимагає більшої надійності доставки даних, ніж мультимедійний трафік. Для того, щоб відповідати вимогам, мережа повинна забезпечувати

відповідну якість обслуговування (quality of service, QoS). Вона досягається забезпеченням певних метрик на заданому рівні, як-от, кількість переходів між вузлами або затримка передачі даних. Щоб мати можливість ефективно передавати трафік різного типу, мережа повинна відповідати якомога більшому (не менше трьох-чотирьох) числу метрик якості обслуговування. Але більшість сучасних рішень для побудови мереж зазвичай пропонують відповідність лише одній-двом метрикам QoS.

З огляду на це, актуальність дисертаційної роботи зумовлена необхідністю розроблення комплексного способу побудови комп'ютерної мережі, який спрямований на вдосконалення процесів передачі даних в комп'ютерних мережах та забезпечення необхідного рівня якості обслуговування завдяки інтеграції технологій віртуальних мереж і мереж SDN.

### **Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.**

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1. Вперше розроблено та обґрунтовано інтегральний критерій побудови каналів зв'язку у віртуальній комп'ютерній мережі на основі технології SDN, який, на відміну від існуючих способів побудови, одночасно враховує необхідну кількість та пріоритети метрик якості обслуговування каналів зв'язку мережі, що дозволяє досягти збереження стабільної швидкості передачі трафіку будь-якого типу.
2. Вперше розроблено та обґрунтовано критерій надійності вузлів мережі для побудови каналів зв'язку, який, на відміну від існуючих способів побудови, враховує здатність проміжних пристроїв мережі транспортувати трафік між своїми портами, що дозволяє збільшити надійність каналів зв'язку та зменшити втрати даних під час передачі.
3. Вперше розроблено та обґрунтовано метод побудови відмовостійких каналів зв'язку віртуальної мережі на основі технології SDN, який, на відміну від існуючих методів, базується на розділенні віртуальної мережі на підмережі та використовує розроблені інтегральний критерій побудови каналів зв'язку з урахуванням якості обслуговування та критерій надійності вузлів, що дозволяє

забезпечити стабільну швидкість, зменшити затримку та втрати даних під час передачі будь-якого типу трафіку у разі виходу з ладу окремих ділянок мережі;

4. Удосконалено метод динамічної реконфігурації віртуальної мережі на основі технології SDN, який, на відміну від існуючих методів, базується на використанні відмовостійких резервних каналів зв'язку, збережених у пам'яті контролера SDN, що дозволяє підтримувати безперервний сеанс передачі трафіку у разі відмови основного каналу зв'язку.

Наукові дослідження виконані здобувачем на кафедрі обчислювальної техніки КПІ ім. Ігоря Сікорського в рамках НДР «Високопродуктивні комп'ютерні системи та мережі: теорія, методи і засоби апаратної та програмної реалізації» під керівництвом професора кафедри обчислювальної техніки, д.т.н., проф. Кулакова Юрія Олексійовича.

Отримані здобувачем наукові результати є обґрунтованими та достовірними, що забезпечується коректним застосуванням методів статистичного аналізу, методів і технологій програмно-визначених мереж, методів маршрутизації та підтверджується результатами експериментів.

Дисертаційна робота Череватенка О. В. є завершеним науковим дослідженням, яке відповідає меті та визначеним у роботі задачам дослідження. Здобувач Череватенко О. В. опанував методологію наукової діяльності.

Наукове завдання підвищення швидкості та надійності передачі даних у спосіб розробки комплексного способу побудови комп'ютерної мережі на основі технології SDN виконано повністю.

**Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.**

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Череватенка О. В. повністю відповідає стандарту вищої освіти зі спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми "Комп'ютерна інженерія".

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям розробки та моделювання віртуальних мереж на основі технології SDN.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна

робота Череватенка О. В. є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело. При підготовці дисертаційної роботи здобувач дотримався принципів академічної доброчесності.

### **Мова та стиль викладення результатів.**

Дисертаційна робота написана українською мовою. Текст дисертації характеризується послідовним і логічним викладом отриманих наукових положень та практичних результатів. Стиль викладення матеріалу – науковий. У дисертації використовуються таблиці, схеми, алгоритми та фрагменти програмного коду, що покращує розуміння матеріалу.

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації 149 сторінок.

У вступі розглянуто актуальність теми та її зв'язок з науковими програмами. Результати аналізу сучасних комп'ютерних мереж підкреслюють необхідність розроблення комплексного способу побудови комп'ютерної мережі, який спрямований на вдосконалення процесів передачі даних та підвищення надійності передачі даних, що дозволить гарантувати відповідність мережі заданим параметрам якості обслуговування. Визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, а також сформульовано наукову новизну та практичну значимість отриманих результатів.

У першому розділі проаналізовано відомі рішення для побудови віртуальних комп'ютерних мереж з використанням технології SDN. На основі аналізу сформульовано мету і задачі дослідження, а також обґрунтовано необхідність розробки способу побудови віртуальної комп'ютерної мережі на основі технології SDN, що дозволить вдосконалити процеси передачі даних у випадку відмов окремих вузлів та ділянок комп'ютерної мережі. У результаті аналізу відповідності існуючих рішень для побудови програмно-визначених мереж критеріям якості обслуговування зроблено висновок про необхідність розроблення методу врахування необхідної (не менше чотирьох) кількості метрик якості обслуговування при передачі даних у мережі.

У другому розділі запропоновано метод побудови каналів зв'язку віртуальної мережі на основі технології SDN, який використовує розроблений

інтегральний критерій побудови каналів зв'язку мережі з урахуванням якості обслуговування, а також критерій надійності вузлів мережі. Представлено теоретичне обґрунтування запропонованого інтегрального критерію для побудови каналів зв'язку з урахуванням якості обслуговування у віртуальній комп'ютерній мережі на основі класичного алгоритму Дейкстри. Представлено теоретичне обґрунтування запропонованого критерію надійності вузлів мережі для побудови каналів зв'язку. На конкретному прикладі продемонстровано, що комбінаторний алгоритм багатошляхової маршрутизації, що формує  $k$  шляхів, що не перетинаються, на графі мережі, характеризується меншою часовою складністю у порівнянні з базовим алгоритмом для випадку розділення графа на підграфи.

У третьому розділі розроблено метод динамічної реконфігурації віртуальної мережі SDN з використанням резервних каналів зв'язку. Представлено алгоритм побудови множини каналів зв'язку, що не перетинаються, між вузлами мережі, що є реалізацією одного з етапів відповідного методу побудови каналів зв'язку на основі інтегрального критерію з урахуванням якості обслуговування, запропонованого у другому розділі. Представлено алгоритм відбору каналів зв'язку по критерію надійності вузлів, що є реалізацією одного з етапів методу побудови каналів зв'язку, запропонованого у другому розділі. Алгоритми і метод динамічної реконфігурації представлені у вигляді блок-схем та прикладів.

У четвертому розділі розглянуто існуючі програмні реалізації SDN-контролерів, проаналізовано можливості протоколу OpenFlow для побудови віртуальної SDN мережі. Обґрунтовано вибір контролеру ONOS для моделювання віртуальної мережі SDN та перевірки розроблених методів. За результатами моделювання віртуальної SDN мережі з використанням запропонованих методів проаналізовано зміни швидкості та об'єму передачі трафіку для декількох топологій мережі різної зв'язності при відключенні частини вузлів мережі. Результати моделювання підтверджують адекватність розроблених методів та алгоритмів, а також обраних технічних засобів розробки застосунку для SDN-контролера ONOS.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

## Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.

Наукові результати дисертації висвітлені у 8 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 4 статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України; 2 статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базі даних Web of Science Core Collection та/або Scopus, з яких 2 статті у виданнях, віднесених до першого — третього квартилів (Q1—Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports.

Характеристика особистого внеску здобувача в наукових працях, опублікованих зі співавторами та зарахованих за темою дисертації:

1. D. Korenko, O. Cherevatenko, V. Rusinov, and Y. Kulakov, "Creation of the method of multipath routing using known paths in software-defined networks," Technology audit and production reserves, vol. 4, no. 2(66), pp. 19–24, Aug. 2022, doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.262787>.

Внесок здобувача: розробка методу побудови віртуальної комп'ютерної мережі на основі технології SDN з використанням алгоритму реконфігурації з резервними маршрутами та аналіз завантаження каналів зв'язку при відмовах проміжних OpenFlow комутаторів.

2. Ю. Кулаков та О. Череватенко, «Моделювання маршрутизації з використанням відомих маршрутів за допомогою SDN-контролера ONOS,» Проблеми інформатизації та управління, 2, № 74, сс. 55–61, 2023, doi: <https://doi.org/10.18372/2073-4751.74.17882>.

Внесок здобувача: розробка методу побудови віртуальної мережі SDN під управлінням централізованого контролера на базі програмного забезпечення ONOS з підтримкою протоколу OpenFlow, який виконує конфігурацію та підтримку мережі і реалізує механізм реконфігурації віртуальних комутаторів.

3. O. Cherevatenko and Y. Kulakov, "Method of Increasing Data Transmission Stability in Software Defined Network Considering Metrics of Quality of Service," Information, Computing and Intelligent systems, no. 4, pp. 37–47, 2024, doi: <https://doi.org/10.20535/2786-8729.4.2024.303467>.

Внесок здобувача: опис методу підвищення стабільності передачі даних у програмно-визначеній мережі (SDN) шляхом її динамічної реконфігурації з урахуванням параметрів якості обслуговування (QoS) каналів зв'язку та надійності вузлів.



4. A. Volokyta, H. Loutskii, O. Honcharenko, O. Cherevatenko, V. Rusinov, Y. Kulakov, S. Tsybulia, "Fault Tolerance Exploration and SDN Implementation for de Bruijn Topology based on betweenness Coefficient," International journal of computer network and information security, vol. 16, no. 1, pp. 97–112, Feb. 2024, doi: <https://doi.org/10.5815/ijcnis.2024.01.08>.

Внесок здобувача: проведення та опис тестування представлених топологічних організацій мережі у віртуальному середовищі SDN на відмовостійкість шляхом експериментального виміру об'єму переданого трафіку після відключення частини вузлів та виявлення найбільш стабільних до змін типів топологічної організації комутаторів.

5. A. Volokyta, A. Kogan, O. Cherevatenko, D. Korenko, D. Oboznyi, and Y. Kulakov, "Traffic Engineering with Specified Quality of Service Parameters in Software-defined Networks," International Journal of Computer Network and Information Security, vol. 16, no. 5, pp. 1–13, Oct. 2024, doi: <https://doi.org/10.5815/ijcnis.2024.05.01>.

Внесок здобувача: порівняльний аналіз методу конструювання трафіку зі спеціалізованими параметрами якості обслуговування для топологічних організацій віртуальної мережі SDN та графічне представлення результатів експерименту.

Також результати дисертації були апробовані на 2 наукових фахових конференціях.

Наукові публікації здобувача мають високий науковий рівень і пройшли відповідне рецензування. У кожную публікацію здобувач зробив вагомий особистий внесок, який був використаний при підготовці дисертаційної роботи. Усі публікації були написані з дотриманням принципів академічної доброчесності та складаються із власних досліджень здобувача та співавторів.

Отже, наукові результати, описані в дисертаційній роботі, повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

### **Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.**

1. При формулюванні задачі розробки методу здобувач намагається врахувати якомога більшу кількість метрик якості обслуговування (не менше чотирьох), посилаючись на існуючі роботи, де враховано одну або дві. Але

треба вибрати і обґрунтувати необхідну та достатню кількість метрик якості обслуговування.

3. Розділ 3 присвячений удосконаленню методу динамічної реконфігурації віртуальної комп'ютерної мережі, а не його розробленню, що вказано у назві розділу. У дисертації не сказано, хто і коли розробив цей метод.

2. Розділ 2 присвячений методу побудови каналів зв'язку на основі інтегрального критерію з урахуванням метрик якості обслуговування, але сам метод формально не представлений. Замість цього представлений алгоритм Дейкстри та підготовка даних для нього у спосіб обчислення «єдиної вагової матриці» (с. 52-53).

4. На с. 83-84 наведена блок-схема алгоритму, яку автор представив як етапи запропонованого методу динамічної реконфігурації віртуальної мережі SDN. Але сам метод і його призначення формально не представлено.

5. У п.4.1. стверджується, що «протокол OpenFlow є доволі простим у реалізації та підтримці засобом забезпечення швидкого зв'язку». Але це не відповідає дійсності. Схожі неточності зустрічаються також у інших розділах: «робити обробку трафіку», «Задачею у експерименті», «щоб задовольнити поставлену перед наміром задачу», «для тестування не відходить така топологія», «оптимально організувати розподіл інформації між маршрутами» та ін.

6. Не зрозумілі аббревіатури LLDP, DT, SDVN.

7. На рисунках 4.9–4.15 показані топології для проведення експериментів, але не вказано, які саме вузли відключались при моделюванні несправностей, а також вузол-адресат і вузол-відправник.

8. Не зрозуміло, що саме і як було модифіковано в ONOS для реалізації запропонованих методів.

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

### **Висновок про дисертаційну роботу.**

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Череватенка Олексія Володимировича на тему «Спосіб побудови віртуальної комп'ютерної мережі на основі технології SDN» виконана на високому



науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для інформаційних технологій. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п. 6 – 9 «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.

Здобувач Череватенко Олексій Володимирович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 12 – Інформаційні технології за спеціальністю 123 – Комп'ютерна інженерія.

**Рецензент:**

завідувач кафедри інформатики  
та програмної інженерії, Національний  
технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського», д.т.н., проф.

/  / Едуард ЖАРИКОВ



« 29 » квітня 20 25 року