

ХЕРСОНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ ТА МЕРЕЖ

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи

магістра

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему «Дослідження технологій програмно-визначених
комп'ютерних мереж»

«Research of software-defined computer network technologies»

Виконав: студент 6 курсу, групи 6КСМ

напряму підготовки (спеціальності)

123 «Комп'ютерна інженерія»

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Риндер А.П.

(прізвище та ініціали)

Керівник Веселовська Г.В.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Огнева О.Є.

(прізвище та ініціали)

ХЕРСОНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інститут, факультет,
відділення

інформаційних технологій та дизайну

Кафедра, циклова
комісія

Комп'ютерних систем та мереж

Освітньо-кваліфікаційний
рівень

Магістр (другий (магістерський) рівень
вищої освіти)

Напрямок підготовки

(шифр і назва)

Спеціальність

123 «Комп'ютерна інженерія»

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри,
голова циклової комісії
комп'ютерних систем
та мереж

Григорова А.А.
«18» вересня 2025 року

ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТУ

Риндеру Артему Павловичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) «Дослідження технологій програмно-визначених комп'ютерних мереж» (Research of software-defined computer network technologies)

керівник проекту (роботи) Веселовська Г.В., к.т.н., доцент.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від «18» вересня 2025 року №439-с

2. Строк подання студентом проекту(роботи) 1.12.2025

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Методичні рекомендації до виконання кваліфікаційної роботи магістра; матеріали практики.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Аналіз предметної галузі програмно-визначених комп'ютерних мереж

Дослідження, систематизація та порівняльний аналіз SDN-інфраструктур

Аналіз, моделювання та дослідження практичних аспектів побудови SDN-мереж

Дослідження та багатокритеріальний вибір найкращих рішень та оптимальних моделей SDN

Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) електронна мультимедійна презентація що містить 15 слайдів

5. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

6. Дата видачі завдання «18» вересня 2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Вивчення предметної області	18.09.2025/ 23.09.2025	
2	Аналіз предметної галузі програмно-визначених комп'ютерних мереж	24.09.2025/ 4.10.2025	
3	Дослідження, систематизація та порівняльний аналіз SDN-інфраструктур	5.10.2025/ 16.10.2025	
4	Аналіз, моделювання та дослідження практичних аспектів побудови SDN-мереж	17.10.2025 /26.10.2025	
5	Дослідження та багатокритеріальний вибір найкращих рішень та оптимальних моделей SDN	27.10.2025 /15.11.2025	
6	Оформлення пояснювальної записки	15.11.2025/ 1.12.2025	

Студент _____
(підпис)

Риндер А.П.
(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи) _____
(підпис)

Веселовська Г.В.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

До складу кваліфікаційної роботи магістра входять такі компоненти: 112 сторінок; 14 таблиць; 54 джерела посилань; 2 рисунки.

Тема роботи: дослідження технологій програмно-визначених комп'ютерних мереж.

Мета роботи: дослідження теоретичних основ, сучасних технологій, моделей, стандартів і практичних рішень у сфері програмно-визначених мереж; розроблення рекомендацій щодо вибору оптимальної SDN-архітектури та підходів до підвищення продуктивності, масштабованості та безпеки мережевих інфраструктур.

Представлена до розгляду робота охоплює такі теоретичні питання: аналіз традиційних архітектур комп'ютерних мереж і передумов появи SDN; дослідження сутності програмно-визначених мереж, їх принципів, архітектури та ключових інтерфейсів; огляд стандартів і моделей взаємодії компонентів SDN; дослідження вимог до побудови надійних, масштабованих та керованих SDN-систем; аналіз класифікації SDN-архітектур; дослідження методів моніторингу, оптимізації продуктивності та забезпечення безпеки SDN.

Практична частина роботи містить: моделювання SDN у Mininet, GNS3 та EVE-NG; дослідження роботи контролерів ONOS, Ryu та OpenDaylight; аналіз ефективності різних архітектур; формування багатокритеріальної моделі вибору оптимальної SDN-інфраструктури.

У роботі також розглянуто сучасні тенденції розвитку SDN, включаючи інтеграцію з хмарними середовищами, 5G/6G, IoT, застосування штучного інтелекту та Zero Trust-підходів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: SDN, ПРОГРАМНО-ВИЗНАЧЕНА МЕРЕЖА, КОНТРОЛЕР, МЕРЕЖЕВА ВІРТУАЛІЗАЦІЯ, OPENFLOW, NFV, MONITORING, NETWORK SECURITY.

АНОТАЦІЯ

У роботі здійснено всебічний аналіз сучасних підходів, принципів та технологій побудови програмно-визначених мереж (SDN). Розглянуто архітектурні особливості SDN, включно з розподілом рівнів керування та даних, механізмами централізованого управління та використанням протоколів взаємодії між контролерами та мережевими пристроями. Проведено дослідження ключових методів оптимізації мережевої інфраструктури на базі SDN, а також визначено функціональні можливості контролерів і програмних інтерфейсів, що забезпечують гнучкість та масштабованість мереж.

Розроблено й обґрунтовано технологію практичної реалізації програмно-визначених мереж з урахуванням сучасних вимог до безпеки, продуктивності та надійності. Особливу увагу приділено питанням інтеграції SDN з хмарними технологіями, віртуалізацією мережевих функцій (NFV), а також автоматизацією керування мережевими ресурсами.

Виконано аналіз майбутніх тенденцій розвитку програмно-визначених мереж, зокрема використання штучного інтелекту та машинного навчання для автономного керування мережею, еволюції мультиконтролерних архітектур, розвитку intent-based networking, а також перспектив застосування SDN у сферах 5G/6G, індустріального Інтернету речей та кібербезпеки.

Отримані результати підтверджують актуальність використання SDN як інноваційного підходу до побудови масштабованих, керованих, гнучких і безпечних мережевих інфраструктур, що відповідають зростаючим вимогам сучасних інформаційно-комунікаційних систем.

ABSTRACT

The paper provides a comprehensive analysis of modern approaches, principles, and technologies for building software-defined networks (SDN). The architectural features of SDN are considered, including the distribution of control and data layers, centralized management mechanisms, and the use of interaction protocols between controllers and network devices. The key methods for optimizing network infrastructure based on SDN are studied, and the functional capabilities of controllers and software interfaces that ensure network flexibility and scalability are determined.

The technology for practical implementation of software-defined networks is developed and substantiated, taking into account modern requirements for security, performance, and reliability. Particular attention is paid to the issues of integrating SDN with cloud technologies, network function virtualization (NFV), and automation of network resource management.

An analysis of future trends in the development of software-defined networks was performed, in particular, the use of artificial intelligence and machine learning for autonomous network management, the evolution of multi-controller architectures, the development of intent-based networking, as well as the prospects for the application of SDN in the areas of 5G/6G, the industrial Internet of Things and cybersecurity.

The results obtained confirm the relevance of using SDN as an innovative approach to building scalable, manageable, flexible and secure network infrastructures that meet the growing requirements of modern information and communication systems.

ЗМІСТ

ВСТУП	11
1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ГАЛУЗІ ПРОГРАМНО-ВИЗНАЧЕНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ	14
1.1 Традиційні архітектури комп'ютерних мереж та їхні обмеження	14
1.2 Розвиток програмно-визначених мережевих технологій та передумови появи SDN у світі	17
1.3 Програмно-визначені мережі (SDN): сутність, принципи та переваги	22
1.4 Архітектура SDN та моделі взаємодії компонентів (Control Plane / Data Plane / API)	27
2 ДОСЛІДЖЕННЯ, СИСТЕМАТИЗАЦІЯ ТА ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ SDN-ІНФРАСТРУКТУР	35
2.1 Основні стандарти та специфікації SDN (OpenFlow, NETCONF, REST API)	35
2.2 Вимоги до надійності, масштабованості та керованості SDN	40
2.3 Класи програмно-визначених мереж: централізовані, гібридні, розподілені	46
2.4 Рівні абстракції та гарантії якості роботи мережі (QoS, SLA, Policy rules)	51
3 АНАЛІЗ, МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРАКТИЧНИХ АСПЕКТІВ ПОБУДОВИ SDN-МЕРЕЖ	57
3.1 Основні вимоги до побудови SDN та способи їх реалізації	57
3.2 Технології побудови SDN у середовищі моделювання (Mininet, GNS3, EVE-NG)	61
3.3 Аналіз ключових підходів до оптимізації продуктивності SDN	65

3.4 Порівняльна характеристика методів моніторингу та аналізу SDN: Telemetry, sFlow, NetFlow	70
3.5 Моделювання та приклади типових атак на SDN та їх попередження	74
3.6 Аналіз програмне забезпечення для керування та тестування SDN (ONOS, Ryu, OpenDaylight)	79
4 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИЙ ВИБІР НАЙКРАЩИХ РІШЕНЬ ТА ОПТИМАЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ SDN	87
4.1 Основи теорії прийняття рішень при побудові мережевих архітектур	87
4.2 Порівняння та вибір оптимальної SDN-архітектури за сукупністю критеріїв	91
4.3 Розглядання майбутніх тенденцій розвитку програмно-визначених мереж	98
ВИСНОВОК	104
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ	106
ДОДАТОК А	109

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

- SDN – *Software-Defined Networking* – програмно-визначені мережі
- NFV – *Network Function Virtualization* – віртуалізація мережевих функцій
- OpenFlow (OF) – протокол керування мережевими пристроями в SDN
- API – *Application Programming Interface* – програмний інтерфейс
- NBI – *Northbound Interface* – північний інтерфейс SDN-контролера
- SBI – *Southbound Interface* – південний інтерфейс SDN-контролера
- SDNC – *SDN Controller* – контролер програмно-визначеної мережі
- VNF – *Virtual Network Function* – віртуальна мережева функція
- NFVI – *NFV Infrastructure* – інфраструктура NFV
- MANO – *Management and Orchestration* – система управління та оркестрації
- NFV
- QoS – *Quality of Service* – якість обслуговування
- QoE – *Quality of Experience* – якість користувацького досвіду
- SLA – *Service Level Agreement* – угода про рівень сервісу
- SD-WAN – *Software-Defined Wide Area Network* – програмно-визначена глобальна мережа
- OVS – *Open vSwitch* – віртуальний комутатор з підтримкою OpenFlow
- ONF – *Open Networking Foundation* – організація, що розвиває SDN
- ONOS – *Open Network Operating System* – мережна ОС для SDN
- ODL – *OpenDaylight* – SDN-платформа з відкритим кодом
- BGP – *Border Gateway Protocol* – протокол міждоменної маршрутизації
- NETCONF – *Network Configuration Protocol* – протокол конфігурації мережі
- YANG – *Yet Another Next Generation* (модель даних для управління пристроями)
- REST – *Representational State Transfer* – стиль веб-API
- RESTCONF – протокол керування пристроями на базі REST
- SR – *Segment Routing* – сегментна маршрутизація
- MPLS – *Multiprotocol Label Switching* – багатопротокольна комутація за

мітками

VLAN – *Virtual Local Area Network* – віртуальна локальна мережа

VXLAN – *Virtual Extensible LAN* – розширювана віртуальна мережа

SD-LAN – *Software-Defined Local Area Network*

IDC – *Inter-Domain Controller* – міждоменний контролер

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасні інформаційно-комунікаційні системи характеризуються стрімким зростанням обсягів передаваних даних, ускладненням мережевих сервісів та підвищенням вимог до надійності, безпеки й гнучкості мережевої інфраструктури. Традиційні архітектури комп'ютерних мереж, що базуються на жорстко пов'язаних апаратно-програмних рішеннях, дедалі частіше виявляються неспроможними оперативно адаптуватися до змін навантаження, вимог користувачів і нових сервісів. Це зумовлює необхідність пошуку нових підходів до побудови та керування мережами.

Одним із найбільш перспективних напрямів розвитку мережевих технологій є програмно-визначені мережі (Software-Defined Networking, SDN), які передбачають відокремлення площини керування від площини передачі даних та централізоване програмне управління мережевими ресурсами. SDN отримали значний розвиток як у наукових дослідженнях, так і в практичних реалізаціях, ставши основою для сучасних дата-центрів, хмарних платформ, операторських мереж, а також інфраструктур 5G/6G та Інтернету речей. Неперервний прогрес у сфері хмарних обчислень, віртуалізації мережевих функцій, автоматизації та штучного інтелекту відкриває нові можливості для подальшого вдосконалення SDN, водночас висуваючи підвищені вимоги до методології їх проектування та впровадження. У зв'язку з цим тема дипломної роботи «Дослідження технологій програмно-визначених комп'ютерних мереж» є актуальною та має значну наукову й практичну цінність.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, виконані в межах даної дипломної роботи, узгоджуються з напрямами наукових досліджень у галузі комп'ютерних систем і мереж, що відповідають освітнім та науковим програмам Міністерства освіти і науки України, а також науковій тематиці випускової кафедри комп'ютерних систем та мереж закладу вищої освіти.

Мета роботи. Аналіз предметних галузі програмно-визначених комп'ютерних мереж, дослідження, систематизація та порівняльний аналіз SDN-інфраструктур, аналіз, моделювання та дослідження практичних аспектів побудови SDN-мереж, а також розроблення рекомендацій щодо вибору та оптимізації SDN-архітектур з урахуванням вимог до продуктивності, масштабованості, керованості та безпеки.

Основні задачі роботи:

- проаналізувати традиційні архітектури комп'ютерних мереж та обґрунтувати передумови появи SDN;
- дослідити сутність, принципи функціонування та архітектуру програмно-визначених мереж;
- розглянути основні стандарти, протоколи та інтерфейси SDN;
- проаналізувати класи SDN-архітектур та вимоги до їх надійності, масштабованості й керованості;
- дослідити практичні аспекти побудови та моделювання SDN у спеціалізованих середовищах;
- виконати порівняльний аналіз SDN-архітектур за сукупністю технічних критеріїв;
- визначити перспективи розвитку програмно-визначених мереж.

Об'єкт дослідження: комп'ютерні мережі та мережеві інфраструктури сучасних інформаційно-комунікаційних систем.

Предмет дослідження: технології, архітектури, методи керування та оптимізації програмно-визначених комп'ютерних мереж.

Методи дослідження: методи аналізу та синтезу мережевих систем, моделювання комп'ютерних мереж, теорії прийняття рішень, оптимізації, методи програмної конфігурації мереж, а також методи експериментального дослідження та порівняльного аналізу.

Наукова новизна отриманих результатів: полягає в узагальненні та систематизації сучасних підходів до побудови SDN, розробленні багатокритеріальної моделі порівняння та вибору оптимальної SDN-

архітектури, а також у формуванні рекомендацій щодо підвищення ефективності, масштабованості та безпеки програмно-визначених мереж.

Особистий внесок автора: усі результати дослідження, викладені в дипломній роботі, отримані автором самостійно та подані до захисту як особисті науково-практичні напрацювання.

Практичне значення роботи: полягає в можливості використання отриманих результатів і рекомендацій під час проектування, впровадження та модернізації SDN-інфраструктур у корпоративних мережах, дата-центрах і хмарних середовищах.

Апробація роботи: основні положення та результати дипломної роботи обговорювалися на наукових семінарах випускової кафедри комп'ютерних систем та мереж.

Публікації: за результатами виконаного дослідження підготовлено та опубліковано тези наукової доповіді.

Структура й обсяг роботи. Дипломна робота складається з пояснювальної записки, яка містить титульний аркуш, завдання, реферат, анотації, зміст, перелік скорочень, вступ, чотири розділи, висновки, список використаних джерел та додатки. Робота викладена на 109 сторінках і містить рисунки, таблиці та схеми, що ілюструють основні положення дослідження.