

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет комп'ютерної інженерії та управління
(повна назва)

Кафедра електронних обчислювальних машин
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Методи машинного навчання у хмарних
платформах для забезпечення ефективної передачі даних

(тема)

Виконав:

студент II курсу, групи КСМм-22-2
Остапчук В.В.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність

123 «Комп'ютерна інженерія»

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма

Комп'ютерні системи та мережі

(повна назва освітньої програми)

Керівник: доц. Ільїна І.В.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри ЕОМ

(підпис)

Коваленко А.А.

(прізвище, ініціали)

2024 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ комп'ютерної інженерії та управління _____

Кафедра _____ електронних обчислювальних машин _____

Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____

Спеціальність _____ 123 «Комп'ютерна інженерія» _____
(код і повна назва)

Тип програми _____ освітньо-професійна _____
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма _____ Комп'ютерні системи та мережі _____
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

“ _____ ” _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студенту _____ Остапчуку Владиславу Валерійовичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ Методи машинного навчання у хмарних платформах для
забезпечення ефективної передачі даних _____

затверджена наказом по університету від “ 06 ” листопада 2023 р. № 1298 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____ 15 січня 2024 р.

3. Вхідні дані до роботи _____

1) OpenFlow протокол _____

2) SDN контролери _____

3) Мова програмування Python _____

4) REST API інтерфейс _____

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати у роботі _____

1) Аналіз мереж зв'язку до 2030 року та подальші його перспективи _____

2) Аналіз методів машиного навчання _____

3) Прогнозування навантаження на контролери Програмно-конфігуруючи мережі _____

4) Застосування ШНМ _____

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) 13 слайдів

6. Консультанти розділів роботи (заповнюється за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Постановка задачі	07.11.2023-08.11.2023	
2	Аналіз основних технологій мереж зв'язку	09.11.2023-14.11.2023	
3	Завдання ідентифікації трафіку послуг у мережах зв'язку	15.11.2023-20.11.2023	
		20.11.2023-30.11.2023	
4	Розробка методу на основі технології ШНМ	01.12.2023-25.12.2023	
5	Застосування штучної нейронної мережі	25.12.2023-10.01.2024	

Дата видачі завдання 06 листопада 2023 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис)

доц.Гльїна І.В.
(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 78 с., 21 рис., 1 табл., 1 дод., 21 джерел.

ІНТЕРНЕТ РЕЧІ, МАШИННЕ НАВЧАННЯ, OPENFLOW, SDN КОМУТАТОР, НЕЙРОННА МЕРЕЖА, АРХІТЕКТУРА ШНМ.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження та розробка методів машинного навчання у хмарних платформах для забезпечення ефективної передачі даних.

Об'єктом дослідження є мережі зв'язку п'ятого покоління 5G/IMT-2020, а предметом дослідження – методи побудови цих мереж та послуг на основі технологій ШІ.

У ході виконання кваліфікаційної роботи було проаналізовано концепції сучасних та перспективних мереж зв'язку з огляду на довгострокові до 2030 року перспективи, аналіз тематики «Штучний Інтелект у мережах зв'язку» з огляду на прогрес стандартизації автономних мереж у МСЕ-Т, аналіз методів машинного навчання завдань моніторингу та керування трафіком у мережах зв'язку, розробка методу ідентифікації трафіку послуг у мережах зв'язку п'ятого та наступних поколінь, розробка методу прогнозування навантаження на контролери програмно-конфігурованих мереж.

ABSTRACT

Master's thesis: 78 pages, 21 figures, 1 tables, 1 appendices, 21 sources.

INTERNET OF THINGS, MACHINE LEARNING, OPENFLOW, SDN SWITCH, NEURAL NETWORK, SDN ARCHITECTURE.

The major goal of this thesis is the qualification work is to research and develop machine learning methods in cloud platforms to ensure efficient data transfer.

The object of research is the fifth generation communication networks 5G/IMT-2020, and the subject of research is the methods of building these networks and services based on AI technologies.

In order to the qualification work, the concepts of modern and future communication networks were analysed with a view to long-term prospects up to 2030, the analysis of the topic "Artificial Intelligence in Communication Networks" in view of the progress of standardisation of autonomous networks in ITU-T, the analysis of machine learning methods for monitoring and traffic management in communication networks, the development of a method for identifying service traffic in fifth and subsequent generations of communication networks, the development of a method for predicting the load on controllers of software-configurable networks.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	8
ВСТУП	9
1 АНАЛІЗ КОНЦЕПЦІЙ СУЧАСНИХ І ПЕРСПЕКТИВНИХ МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ	11
1.1 Аналіз основних технологій мереж зв'язку 5G/ІМТ-2020	11
1.1.1 Концепція мереж зв'язку 5G/ІМТ-2020 та основні напрямки послуг	11
1.1.2 Аналіз концепції програмно-конфігурованих мереж та протоколу OpenFlow	18
1.2 Мережі зв'язку п'ятого покоління: на шляху до мереж 2030.....	24
1.3 Штучний інтелект у мережах зв'язку	28
2 МЕТОД ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТРАФІКУ ПОСЛУГ У МЕРЕЖАХ ЗВ'ЯЗКУ П'ЯТОГО ТА НАСТУПНИХ ПОКОЛІНЬ	31
2.1 Завдання ідентифікації трафіку послуг у мережах зв'язку	33
2.2. Архітектура модельної мережі	35
2.3 Розробка методу моніторингу та ідентифікації трафіку послуг у мережах зв'язку п'ятого та наступного поколінь	41
2.4 Нейронна мережа та Deep Learning	44
3 МЕТОД ПРОГНОЗУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ НА КОНТРОЛЕРИ ПРОГРАМНО-КОНФІГУРУЮЧИХ МЕРЕЖ.....	53
3.1 Проблема моніторингу контролерів програмно-конфігурованої мережі	53
3.2 Розробка методу прогнозування навантаження на контролери програмно-конфігурованих мереж на основі технологій штучного інтелекту.....	55

3.3 Застосування штучної нейронної мережі для прогнозування навантаження на контролер SDN	59
ВИСНОВКИ.....	66
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	69
ДОДАТОК А Графічний матеріал кваліфікаційної роботи.....	71

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ
І ТЕРМІНІВ

АПК – апаратно-програмний комплекс

АП – асоціативна пам'ять

АЗУ – асоціативний запам'ятовуючий пристрій

ДР – дерево рішень

ІР – інтернет речі

ШІ – штучний інтелект

ІКТ – інфокомунікаційні технології

ШНМ – штучна нейронна мережа

ІТ – інформаційні технології

МСЕ-Р – Міжнародний Союз електрозв'язку, сектор стандартизації
радіозв'язку

ОЗУ – оперативний пристрій, що запам'ятовується

ОС – операційна система

API – програмний інтерфейс (анг. Application Programming Interface)

REST – інтерфейс (анг. Representational State Transfer)

ВСТУП

Світ інфокомунікаційних технологій однією ногою стоїть уже у мережах наступного (п'ятого) покоління. Інфраструктура, пропоновані послуги та програми якої, частково реалізують утопічні ідеї, запропоновані фантастами буквально останніх 10-15 років, не кажучи вже про більш ранні ідеї [1]. Мережі зв'язку п'ятого покоління 5G/ІМТ-2020 та нові типи послуг є особливо актуальною темою досліджень останніх 5-6 років, при цьому результатом досліджень та розробок світового масштабу став плавний перехід до концепції мереж зв'язку 2030. Цей перехід відбувся у зв'язку з великою кількістю нових типів послуг, що з'явилися, заснованих на концепції Інтернету Речей. У свою чергу, концепція Інтернету Речей породила приватні концепції, в рамках яких були сформовані власні вимоги до мереж зв'язку. Міжнародний Союз Електрозв'язку виділяє три основні «кити» мереж зв'язку 5G/ІМТ-2020: масштабні міжмашинні взаємодії, високомобільний зв'язок та мережі зв'язку з ультрамалими затримками. До 2022 року можна стверджувати, що частина з цих напрямків вже у широкомасштабному форматі впроваджується та має суто прикладний характер, а саме міжмашинні взаємодії. Так званий тип з'єднання «машина-машина» вже переважає у мережах зв'язку над типом «людина-машина» і кількість підключених до мережі пристроїв перевищує кількість користувачів. При цьому гостро стоїть питання реалізації другої, не менш важливої складової мереж зв'язку – мереж з ультрамалими затримками. Набір запропонованих концепцій послуг у цьому напрямку вже плавно переходить на наступне покоління мереж зв'язку – мереж зв'язку 2030. Такі послуги, як телемедицина, в повній мірі передачі інформації, так і в затримках, що вносяться на шляху прямування даних. Крім того, такий критерій, як надщільність мереж зв'язку вносить додаткові вимоги до методів побудови мережної та обчислювальної інфраструктури. Надщільність є однією з ознак

не тільки мереж 5G/IMT-2020, а й усіх наступних. Дійсно, вимога 3GPP щодо забезпечення необхідного рівня якості обслуговування та сприйняття при розміщенні 1 млн. терміналів на 1 кв2/м принципово відрізняється від характеристик щільних мереж, що існують в даний час. Відповідно до відомого прогнозу, гранична кількість Інтернету Речів оцінюється в 50 трлн пристроїв, що може бути досягнуто в районі 2030 року.

На підставі вищесказаного та безлічі існуючих до цього часу міжнародних рекомендацій та стандартів можна зробити висновок, що концепція мереж зв'язку 5G/IMT-2020 включає цілий комплекс концепцій і технологій, а не тільки описує принципи та технології організації мобільної мережі доступу [2].

У той же час, на початок 2023 р. ще не до кінця завершено роботи зі стандартизації мереж зв'язку п'ятого покоління, а в Секторі Стандартизації телекомунікацій Міжнародного Союзу Електрозв'язку було створено спеціальну робочу групу з дослідження та подальшої стандартизації покоління мереж зв'язку 2030. Даній робочій групі поставлено не настільки тривіальне завдання – проаналізувати основні тенденції у розвитку мереж зв'язку, які з'явилися сьогодні при роботах над концепцією та в процесі початку реалізації мереж 5G/IMT-2020, та визначити основні характеристики та напрямки стандартизації мереж та послуг. Наприклад, як уже було зазначено вище, один із напрямків – Тактильний Інтернет (TI) [3].

На даний момент паралельним «курсом» і при цьому безпосередньо впливає на розвиток мереж зв'язку та послуг є напрям «Штучний Інтелект у мережах зв'язку». Тематика Штучного Інтелекту у мережах зв'язку у світі наукових досліджень з'явилася порівняно недавно, причиною великого інтересу до застосування технологій ШІ в мережах зв'язку є надія на вирішення безлічі завдань мереж зв'язку 5G і наступних поколінь [3].

1 АНАЛІЗ КОНЦЕПЦІЙ СУЧАСНИХ І ПЕРСПЕКТИВНИХ МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ

1.1 Аналіз основних технологій мереж зв'язку 5G/ІМТ-2020

1.1.1 Концепція мереж зв'язку 5G/ІМТ-2020 та основні напрямки послуг

Мережі зв'язку 5G/ІМТ-2020 повинні створити екосистему для технічних та бізнес-інновацій [1]. Як уже згадувалося раніше, очікується, що мережі ІМТ-2020 дадуть можливість ефективно і економічно пускати безліч нових послуг. При цьому варто зазначити, що позначення «5G», що раніше позначає технологічний етап мобільних мереж, в даному поколінні, де-факто на міжнародному рівні відображає нову еру мереж зв'язку та сервісів загалом, торкаючись змін у тому числі й у технологіях ядра мереж, принципів надання послуг тощо. Аббревіатура G дається консорціумом 3GPP (3rd Generation Partnership Project), при цьому аббревіатуру ІМТ-2020 (International Mobile Telecommunications) використовує МСЕ-Т. На момент 2021 року в МСЕ-Т існує кілька Дослідницьких комісій (ІК), робота яких повністю присвячена вирішенню питань стандартизації в галузі технологій інфраструктури та сервісів 5G/ІМТ-2020. Варто зазначити, роботи наступних ІЧ:

- 11 ІЧ: Фокусується на вимогах до сигналізації, протоколах, специфікацій випробувань та боротьби з контрафактною продукцією. У рамках цієї ІЧ ведуться особливо активні роботи з розробки рекомендацій у галузі протоколів ІВ їх сумісності, архітектури тестування, ідентифікації пристроїв Інтернету Речів. Варто звернути увагу на рекомендації, що описують методи тестування контролерів Програмно-конфігурованих мереж (ПКС);

- 13 ІЧ: Фокусується на майбутніх мережах (Future Networks) і зокрема ІМТ-2020, хмарним обчисленням та довіреним мережевим інфраструктурам. У рамках цієї ІЧ розглядаються інфраструктурні рекомендації: архітектури, фреймворки (структури), правила та принципи побудови. Варто відзначити один із найактуальніших напрямків, яким також займаються в рамках цієї ІЧ – Штучний Інтелект у мережах зв'язку;

- 20 ІЧ: Фокусується на концептуальних питаннях Інтернету Речів, розумних містах та спільнотах. В рамках цієї ІЧ часто розглядаються питання розробки рекомендацій концептуального плану, а також додатків глобальної концепції Інтернету Речів, наприклад – Віртуальна та Доповнена реальність (з англ. Augmented & Virtual Reality).

Питання інфраструктури та послуг мереж зв'язку 5G/ІМТ-2020, слід зазначити, що попередні зміни (покоління) були в першу чергу пов'язані з появою стільникових мереж зв'язку третього покоління 3G (1999 рік) та пакетних мереж зв'язку загального користування (2000 рік) . Крім того, варто враховувати, що раніше мережі зв'язку ділилися на три групи технологій: мережі передачі даних (СПД), мережі рухомого (мобільного) зв'язку, телефонні мережі загального користування (ТФоП).

На сьогоднішній момент мережі п'ятого покоління покликані інтегрувати в собі всі досягнення мобільних і фіксованих мереж зв'язку, забезпечити швидкість передачі даних в 10 Гбіт/с і вище, а також наблизити можливості нових структур хмарних обчислень (Fog-туманні та МЕС-прикордонні) безпосередньо до користувача.

5G/ІМТ-2020 є гетерогенними, тобто об'єднують у собі безліч різних типів мереж, від традиційних фіксованих мереж зв'язку загального користування та мобільних, до літаючих та сенсорних [2]. В англійській літературі такий тип мереж отримав назву HetNet (Heterogeneous Networks) [4]. Проте спочатку властивість гетерогенності було помічено щодо взаємодії систем тривалої еволюції (з англ. LTE – long Term Evolution) і сенсорних мереж.

Системи ІМТ-2020 – це не лише засіб зв'язку для користувачів, але й інструмент, що сприяє розвитку інших галузей, таких як медицина, транспорт, освіта та інші [5]. МСЕ-Т визначив у рекомендації МСЕ-Р М.2083-0 такі сценарії використання 5G/ІМТ-2020 [5]:

- удосконалений рухомий широкопasmовий зв'язок. (з англ. ЕМВ – Enhanced Mobile Broadband) Попит на послуги рухомого широкопasmового зв'язку зростатиме й надалі;

- наднадійна передача даних із малою затримкою. У цьому сценарії використання пред'являються жорсткі вимоги до таких показників, як пропускна здатність, затримка та готовність мережі. У цьому випадку можна навести приклад: дистанційна хірургія, автоматизація розподілу енергії в «розумних електромережах», безпека на транспорті, зокрема автономному транспорті;

- великомасштабні системи міжмашинного зв'язку. Цей сценарій характеризується великою кількістю підключених пристроїв на кв. км.

МСЕ визначило дані сценарії як основні три «кита» мереж зв'язку 5G/ІМТ-2020, у кожному з векторів якого буде відбуватися як приватний розвиток, так і спільне з іншими векторами, що має принести досить великий позитивний синергетичний ефект.

Результати синергії даних напрямів розвитку мереж зв'язку вже видно нині: поява безпілотного транспорту (в тестовому режимі), поява систем типу «Розумне місто» та інші. Опрацьованість існуючих рішень, можна сказати, перебуває на початковому рівні, але оцінити сам ефект вже можна зараз, продемонстровано на рисунку 1.1.

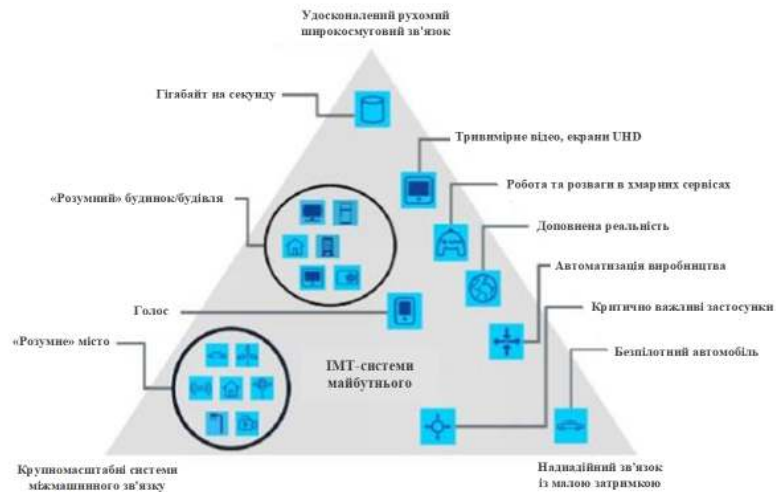


Рисунок 1.1 – Сценарії використання ІМТ-2020 [5]

Як опорні мережі МСЕ у рекомендації [5] пропонує використовувати концепції Програмно-конфігурованих мереж (з англ. SDN – Software-Defined Networking) та Віртуалізації мережних функцій (з англ. NFV – Network Function Virtualization). Відповідно до рекомендації МСЕ-T Y.3100 «Терміни та визначення для ІМТ-2020 мереж» від вересня 2017 року, ІМТ-2020 (на основі [5]) – це системи, системні компоненти та пов'язані з ними аспекти, які підтримують надання набагато більше розширених можливостей, ніж ті, що описані в рекомендації (МСЕ-P M.1645 – «Структура та загальні цілі майбутнього розвитку ІМТ-2000 та наступних систем»). Рекомендації МСЕ-P M.2083-0 ІМТ на 2020 рік і далі від вересня 2015 року відображені ті розширені можливості, які надають мережі ІМТ-2020. Відповідно до тієї ж рекомендації, мережі ІМТ-2020 є засобом комунікації для людей і машин, допомагають у розвитку інших галузей промисловості. Враховуючи тенденції розвитку технології ІКТ, мережі ІМТ-2020 повинні зробити свій внесок у наступне:

- бездротова інфраструктура як мережа доступу:широкополосний зв'язок набуває того ж рівня важливості, як і доступ до електроенергії. У майбутньому приватним та корпоративним клієнтам буде надано широкий спектр послуг, починаючи від інформаційно-розважальних сервісів та

закінчуючи новими для промислового та професійного застосування (промисловий Інтернет Речів);

- новий ринок ІКТ:Розвиток майбутніх ІКТ (інформаційно-комунікаційних) систем сприятиме появі інтегрованої індустрії, яка, у свою чергу, стане рушійною силою для економіки послуг. Щодо існуючих інтеграційних ІКТ проектів у Російській Федерації можна відзначити національний проект «Цифрова економіка», в рамках якого також необхідне впровадження мереж зв'язку 5G/ІМТ-2020 для забезпечення необхідної якості та ресурсних можливостей, у тому числі стійкості ІКТ-інфраструктури;

- подолання цифрового розриву:ІМТ-2020 мають також продовжувати розвиватися у бік подолання так званого «цифрового розриву», надання послуг зв'язку наступного покоління в будь-якій точці світу, де є підключення; Нові способи комунікації:ІМТ-2020 повинні надати зв'язок у будь-який час, в будь-якому місці, з будь-якого пристрою;

- нові форми навчання:ІМТ-2020 може змінити методи навчання, надаючи легкий доступ до цифрових підручників або хмарних сховищ знань в Інтернеті (електронне навчання, електронна охорона здоров'я, електронна комерція тощо);

- підвищення енергоефективності:ІМТ-2020 реалізує нові типи зв'язку, такі як М2М (міжмашинні комунікації), які дозволять надати нові типи послуг для оптимізації виробничих та бізнес-процесів;

- соціальні зміни:ІМТ-2020 є одним із базових рушійних сил переходу до постіндустріального (інформаційного) суспільства

- та інші, визначені в МСЕ-Р М.2083-0[5].

За перерахованими вище вкладками, які мають бути внесені мережами зв'язку п'ятого покоління, можна дійти висновку, що вже на момент 2023 року помітні досить чималі зміни як у технічних аспектах, так і в соціальних, при цьому повноцінного впровадження мереж зв'язку 5G/ІМТ-2020 ще не відбулося. Використання знаходиться на стадії пілотних проектів у всьому

світі і в тому числі в Україні. На основі аналізу прояву «ефектів» мережі та послуг 5G/IMT-2020, визначених у рекомендації МСЕ, можна визначити такі причини:

- розвиток сервісів та послуг відбувається набагато швидше за зміни мереж;
- поява нових сервісів (не операторського рівня), які раніше були визначені, зокрема можна віднести і змішаного типу послуги;
- доступність обчислювальної бази та мережних ресурсів для звичайних користувачів мережі Інтернет, що створило ґрунт для «буму» різноманітних стартапів та мікро-компаній в ІТ-секторі, де необхідно платити лише сервісному провайдеру за певний пул обчислювальних ресурсів, де розгорнуть власний продукт;
- випереджальне впровадження обчислювальних технологій нового покоління швидше за впровадження мереж зв'язку;
- особливо різким каталізатором стала нова інфекція Covid-19 у 2020 році, в результаті якої фінансові моделі, бізнес-моделі, виробничі моделі зазнавали своєї зміни буквально «через біль». Однак протягом року роботи формату «віддаленої участі» відбулися зміни у формах освіти, процесах підприємств (підвищення ефективності), а також у соціальній сфері. Наприклад, вже зараз людина має можливість «замкнути» її потреби в рамках свого будинку, отримуючи інформаційні та грошові ресурси у цифровому вигляді, а фізичні ресурси (продукти харчування, енергію тощо) у форматі доставки, при цьому здійснюючи професійну діяльність також у форматі «віддаленої участі» через мережу зв'язку.

Події останніх років стали каталізатором прискорення впровадження нового типу послуг, котрим необхідно забезпечити нові рівні якості обслуговування, стійкості та ємності мережі.

Ключовими принципами проектування мережі 5G/IMT-2020 є гнучкість, масштабованість та різноманітність послуг. Наступні критерії вважаються ключовими можливостями мереж п'ятого покоління [6]:

- пікова швидкість для користувача: максимальна швидкість передачі даних в ідеальних умовах для кожного користувача пристрою до 10 гбіт/с;
- затримка: має бути забезпечено мінімально можливу затримку (наприклад, для послуг тактильного інтернету – не більше 1мс);
- мобільність: необхідно забезпечити виконання вимог qos за високої швидкості пересування об'єкта/користувача;
- висока густина підключених пристроїв;
- енергоефективність: необхідно забезпечити енергоефективність як на стороні користувача, так і на стороні оператора;
- площа пропускної спроможності: пікова пропускна здатність мережі на одиниці простору, тобто мбіт/с/м². imt-2020, як уже зазначалося, передбачає реалізацію концепції інтернету речів, що сприяє збільшенню кількості підключених пристроїв на одиницю простору, що тягне за собою збільшення навантаження на обладнання в кілька разів.

В результаті тих вимог, які поставлені перед мережами п'ятого покоління, з метою досягнення виконання найжорстокіших критеріїв якості до нових послуг, наприклад, таких як, Тактильний Інтернет, потрібно опрацювати питання міграції мережних технологій на ті технологічні рішення, які зможуть забезпечувати необхідну стабільну роботу мережної інфраструктури, її масштабованість, модульність, високу абстракцію рівня керування, що зрештою дозволить створити єдину гнучку систему контролю та керування через стандартні програмні інтерфейси. Також одним із принципів, згідно яким розробляється інфраструктура мереж п'ятого покоління – "Network Slicing", де "Network Slice", інакше кажучи "Мережний зріз" – це логічна мережа, яка забезпечує певний набір мережних та обчислювальних можливостей, а також характеристик (відповідно до МСЕ-Т Y.3100) , тобто по суті є «програмованої одиницею», яка дозволяє логічно ізолювати мережні функції, що надаються, наприклад: «slice» для організації послуги VoIP, E-health і так далі.

1.1.2 Аналіз концепції програмно-конфігурованих мереж та протоколу OpenFlow

Сучасні пакетні мережі складаються з багатьох окремих елементів мережі, що виконують відповідні функції: маршрутизатори, комутатори, балансувальники навантаження, NAT (Network Address Translation), брендмауери та інші. Концепція Програмно-конфігурованих мереж пропонує уникнути такої тенденції розвитку пакетних мереж, виконавши перехід від окремих мережних елементів мережі та платформ в цілому, до програмованих «сутностей». Забезпечивши керування інфраструктурою за допомогою стандартних програмних інтерфейсів, можна досягти ефективної передачі транспортних потоків, введення нових протоколів на мережу та кінцевої мети – організації «Інтелектуального керування» за допомогою реалізації так званого «Штучного Інтелекту». При цьому прозора та повна програмованість мережних та обчислювальних сутностей є достатньою та необхідною умовою реалізації ШІ в мережі зв'язку. Кожен маршрутизатор окремо, особливо високопродуктивний операторський рівень є дорогим пристроєм. При зростанні мережі, обсягів трафіку, типів послуг необхідно модернізувати мережу, додавати нові дорогі пристрої обробки додаткових обчислень; забезпечення виконання нових функцій. Що в результаті призводить до потреби постійного оновлення пристроїв, їхнього програмного забезпечення, а це додаткові витрати, які змушений нести власник мережі. Це хороша бізнес-модель для компаній-виробників: при покупці достатньої кількості мережних пристроїв власникам мереж необхідно регулярно докупувати оновлення ПЗ та модернізувати своє обладнання, щоб забезпечити необхідні критерії якості послуг на мережі, розвивати нові послуги та зрештою не втрачати клієнтів.

В основі концепції SDN лежить відкритий стандарт OpenFlow, що стрімко розвивається, – стандарт протоколу взаємодії контролера мережі (пристрою керування) і комутаторів мережі. Варто зазначити, що перші

версії, як і сама концепція, зароджувалися в стінах дослідницьких центрів Стенфорда і Берклі, згодом виродившись у співтовариство ONF (Open Networking Foundation). Тому при розгляді питання стандартизації та розвитку архітектурних рішень та протоколів потрібно звернути увагу також і на розвиток концепції SDN спільнотою ONF, яка на момент 2021 року увійшла до складу консорціуму The Linux Foundation.

Згідно з визначенням ONF, Програмно-конфігурована мережа – це динамічна, керована та адаптована мережна інфраструктура, в якій розділені рівні керування мережею та передачі даних, що забезпечує програмне керування мережею та абстрагування рівня мережної інфраструктури від рівня застосунків та мережних послуг (сервісів).

У той же час Міжнародний Союз електров'язку визначає Програмно-конфігуровану мережу як технологію побудови мереж, яка дозволяє реалізувати централізований, програмований рівень керування та ізоляцію рівня даних

Концептуальна архітектура Програмно-конфігурованих мереж продемонстровано на рисунку 1.2.

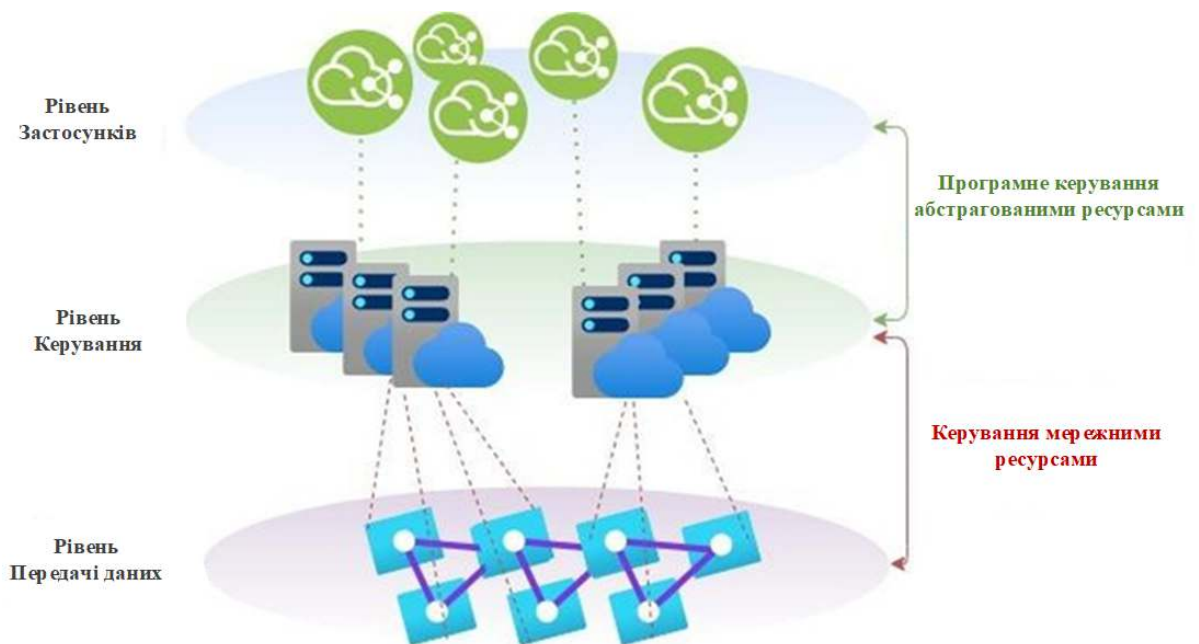


Рисунок 1.2 – Концептуальна архітектура програмно-конфігурованих мереж

У Програмно-конфігурованих мереж виділяють три рівні [7]:

- рівень застосунків. Це рівень, де реалізується логіка послуг, службових сервісів на мережі, забезпечуючи автоматизацію бізнес-процесів надання послуг оператором шляхом керування мережевими ресурсами програмним способом;

- рівень керування. Цей рівень надає інструменти динамічного керування поведінкою мережних ресурсів (динамічна політика QoS тощо.), відповідно до логіки алгоритмів, реалізованих лише на рівні застосунків. При цьому даний рівень, згідно з рекомендацією МСЕ-Т Y.3300, функціонально підрозділяється на підрівні [7]:

1) підтримка рівня застосунків. Функція підтримки рівня застосунків полягає у забезпеченні стабільної роботи програмного інтерфейсу для SDN- застосунків з метою отримання доступу до застосунків до абстрактних моделей мережних ресурсів;

2) оркестрація. Головним чином функції оркестрації спрямовані на керування мережевими ресурсами, які можуть бути представлені як фізичними, так і віртуальними топологіями мережі, мережевими елементами, потоками трафіку. Також однією з головних функцій цього рівня є забезпечення узгодження запитів з рівня застосунків до абстрактних сутностей мережних ресурсів шляхом організації політики доступу (обмеження, керування чергами), тим самим забезпечуючи стабільність функціонування мережної інфраструктури;

3) анотація. Функції абстракції полягають у організації взаємодії мережних ресурсів та його у вигляді абстрактних моделей мережних ресурсів. По суті даний підрівень реалізує стандартний інтерфейс взаємодії між контролером Програмованої мережі та мережевими ресурсами, з подальшим їх поданням у вигляді абстрактних сутностей (моделей), тобто програмних об'єктів зі стандартними програмними інтерфейсами;

- рівень передачі. Даний рівень представляється набором мережних пристроїв, що реалізують головним чином обробку пакетів та їх

транспортування по мережі відповідно до рішень (правил комутації), прийнятих на рівні керування SDN;

1) підтримка керування. Даний підмодуль рівня ресурсів реалізує функції керування пристроєм шляхом організації взаємодії з рівнем керування SDN, який представляється контролером Програмованої мережі. Насправді, цей підмодуль представлений у вигляді підсистеми керування фізичного пристрою (ресурсу), на практиці це «прошивка пристрою», яка реалізує логіку протоколів керування та взаємодії з контролером SDN;

2) транспортування та обробка даних. Цей підмодуль реалізує транспортування даних (потоків) згідно з правилами комутації, встановленими підсистемою керування. При цьому правила встановлюються з урахуванням вимог;

3) запитів від програм SDN. Наприклад, додаток SDN налаштував MPLS тунель та пакети, що задовольняють відповідним перевіроючим даним у таблиці (Math Field), далі комутуються у встановлений тунель, відповідно до цього тунелю може бути застосована логіка керування параметрами QoS і так далі.

Варто також зазначити, що крім повного контролю та керування, згідно з принципами побудови та архітектури SDN, реалізується також і повний моніторинг мережних ресурсів, а саме: моніторинг потоків у мережі, статистика пакетів (успішно скомутованих, відкинутих, з помилкою), навантаження в мережі, статистика фізичних портів і таке інше.

Таким чином, АП – апаратна реалізація того, що в термінах програмування назвали б асоціативним масивом. Дана архітектура дозволяє знизити ціну комутатора, у такому компонуванні одна з найдорожчих частин буде пам'ять TCAM. Однак багато компаній-виробників телекомунікаційного обладнання пішли шляхом м'якої інтеграції, реалізуючи модуль протоколу OpenFlow, як додавання функціональності до своїх і так вже багатофункціональних комутаторів, що в даній ситуації підвищує його ціну на ринку телекомунікаційного обладнання. Консорціум ONF, будучи

розробником відкритих стандартів SDN, виділяє такі протоколи взаємодії різних рівнів архітектури [1]:

- OpenFlow – відкритий протокол встановлення з'єднання між контролером і комутатором, що розширюється, безпосереднього керування потоками і формування правил їх обробки комутатором;

- OF-CONFIG – відкритий розширюваний протокол конфігурування мережного середовища та керування нею (operational context), включаючи віртуальні та фізичні пристрої;

NB-API (NorthBound API) – API «північного» інтерфейсу, що надається контролером мережним застосунком, наприклад, REST API.

Протокол OpenFlow реалізує три види повідомлень [1]:

- повідомлення контролер-коммутатор – ініціалізуються контролером, служать керувати комутатором і контролю над подіями, що відбуваються у ньому;

- асинхронні повідомлення – ініціалізуються OpenFlow комутаторами, призначені для сповіщення контролера про події на мережі, наприклад; збої, помилки, зміни стану;

- симетричні повідомлення розсилаються як комутаторами, так і контролером.

Віртуалізація мережних функцій (з англ. – NFV, Network Function Virtualization) – технологія віртуалізації фізичних мережних елементів (фізичних ресурсів) телекомунікаційної мережі шляхом виконання мережних функцій програмними модулями, що працюють на стандартних серверах та віртуальних машинах (VM) у них. При цьому дані програмні модулі можуть взаємодіяти між собою для надання послуг зв'язку, чим раніше займалися апаратні рішення. Підхід віртуалізації мережних функцій у світ телекомунікацій прийшов із світу інформаційних технологій, перевернувши уявлення про те, як можуть бути побудовані мережі. Різні типи мережного обладнання можуть бути розташовані на стандартних промислових, великих обчислювальних потужностей, серверах, комутаторах та системах зберігання,

які можуть бути розташовані в Центрі обробки даних (ЦОД), мережних вузлах та в приміщеннях кінцевих користувачів. Віртуалізація включає реалізацію мережних функцій у програмному забезпеченні, які можуть працювати в масштабі промислового сервера і які можуть бути переміщені в різні місця в мережі в міру необхідності, без необхідності встановлення нового обладнання. Поточні мережі зв'язку складаються з великої кількості різноманітних пристроїв (мережних функцій), які зазвичай реалізовані як АПК-рішення. Структура NFV та її опис відображається у специфікації ETSI GS NFV 002 від 2013 року.

У специфікації ETSI GS NFV 002 виділяють три основні підсистеми:

- віртуальна мережна функція(-ії), як програмна реалізація мережної функції, яка може працювати поверх NFVI.

- NFV інфраструктура (NFVI), що включає різноманітні фізичні пристрої, а також необхідне програмне забезпечення, що їх поєднує та реалізує функції віртуалізації (гіпервізор) для функціонування NF's.

- керування та оркестрація NFV. На цю підсистему покладено функції оркестрації та керування життєвим циклом фізичних та/або програмних ресурсів, які у свою чергу реалізують NFVI, а також життєвим циклом VNFs.

Абстрактна структура NFV, за специфікацією ETSI, зображена на рисунку 1.3.

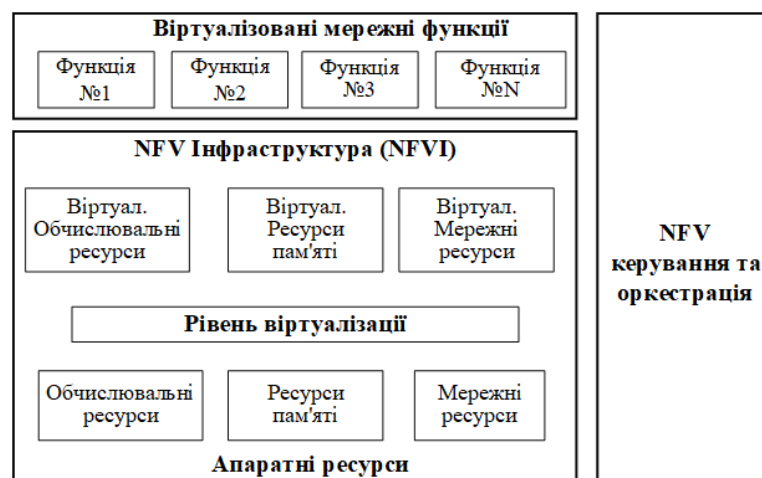


Рисунок 1.3 – Абстрактна структура віртуалізації мережних функцій

Як зазначалося вище, NFV дозволяє динамічно керувати мережними функціями (VNF) і відносинами з-поміж них, тобто, по суті, змінювати їх конфігурацію та зв'язку. Цей рівень автоматизації досягається шляхом уніфікованості інтерфейсів взаємодії систем, що дозволяє використовувати єдину систему керування і моніторингу.

1.2 Мережі зв'язку п'ятого покоління: на шляху до мереж 2030

Як уже раніше було сказано, швидкість появи нових технологій у послугах, мережах зв'язку стала причиною плавного переходу до наступної концепції – мереж зв'язку 2030 у той час, як роботи з мереж п'ятого покоління завершеними ще вважати помилково як на рівні стандартизації, досліджень, так і на виробничому рівні. Таким чином, з метою регулювання концепції 2030 в МСЕ було створено спеціальну робочу групу з дослідження та подальшої стандартизації покоління мереж зв'язку 2030, яка повинна визначити основні характеристики та напрямки стандартизації мереж та послуг. Варто зазначити, щоб заглянути у 2030 рік, необхідно проаналізувати основні тенденції у розвитку мереж зв'язку, які з'явилися сьогодні під час роботи над концепцією 5G/IMT-2020. Наприклад, вже неодноразово згадувався тип послуги «Тактильний Інтернет» (ТІ) з низки технічних причин, що потребує глибокого дослідження та доопрацювання до того, як ТІ стане в один ряд з іншими послугами. Нагадаємо, що для ТІ були висунуті вимоги щодо затримки, яка не повинна перевищувати 1мс і на даний момент розвитку технологій, у тому числі технологій фізичного рівня, є важкою, а в деяких сценаріях використання – нерозв'язним завданням. Переходячи до концепції мереж зв'язку 2030, яка на даний момент вже прийнята в МСЕ і описана в наступному документі - FG NET-2030 Technical Specification on Network 2030 Architecture Framework від червня 2020 року. Можна визначити такі фундаментальні зміни у розвитку мереж зв'язку:

Мережі зв'язку із ультрамалими затримками. Тактильний Інтернет призвів до ще більш значних змін у галузі побудови мереж зв'язку, тому що в цьому випадку потрібно було передавати дані із затримкою в 1мс, що на даний момент у 100 разів менше, ніж у існуючих мережах зв'язку. При цьому варто зазначити, що концепція ТІ призводить до такого процесу, як децентралізація мережі зв'язку, оскільки фундаментальні обмеження швидкості передачі світла – непереборні [8].

Надщільні мережі. Надщільність мереж є однією з ознак не тільки мереж 5G/IMT-2020, а й усіх наступних мереж. Як уже було зазначено, прогнозується близько 1 млн. пристроїв на 1 кв/м і відповідно до прогнозів, гранична кількість Інтернет Речів становить 50 трильйонів, що може бути досягнуто якраз ближче до 2030 року. Таким чином, поняття надщільності лише підтверджуватиметься в процесі розвитку мереж та послуг до 2030 року [8].

Інтернет навички. Однією з важливих концепцій послуг слід відзначити концепцію Інтернету навичок, яка з'явилася в 2017 році і також потребує характеристик мереж з ультрамалими затримками. Інтернет навичок, як концепція, дозволяє реалізувати у мережах із ультрамалими затримками нові види послуг. Ці послуги зможуть дозволити використовувати мережу для придбання людьми та робототехнічними пристроями нових навичок [9, 10].

Літаючі мережі.В арто зазначити, ще одна фундаментальна зміна у розвитку мереж зв'язку – об'єднання літаючого та наземного сегментів мереж у єдину мережу зв'язку. Варто відзначити, що при невеликій висоті польоту БПЛА в таких мережах, що вимірюється у мережах зв'язку з ультрамалими затримками.

Безпілотний транспорт.Однією з концепцій, що активно розвиваються в послугах мереж зв'язку є концепція безпілотного транспорту. Даний напрямок розвивається не лише фахівцями ІКТ, а й фахівцями автомобільної галузі. На момент 2021 року, у цьому напрямі, можна сказати, що виробництво «обганяє» рівень стандартизації, не кажучи вже про мережну та

зовнішню обчислювальну складову (поза бортом автономного транспорту). Тут можна відзначити компанію «Tesla», що швидко розвивається, яка, незважаючи на скептичні відгуки більшості за останні 10 років, досягла успіху і на зараз має найсучаснішу систему «автопілот». Однак, досвід застосування безпілотних зразків показав, що існують важкорозв'язні та частково неможливі для розрахунку сценарії. Так, наукове співтовариство дійшло висновку, що необхідно об'єднати безпілотні засоби пересування в єдину мережу з придорожніми обчислювальними потужностями, що підтримують цифрову модель дороги або частини дороги, з якою працює безпілотний транспорт. Таким чином, «безпілотник» може знати заздалегідь про те, що відбувається через 10 км, що знаходиться за фактом поза видимістю бортових систем.

На основі аналізу фундаментальних змін у розвитку мереж зв'язку, можна стверджувати, що мережі зв'язку 2030 будуть надщільними мережами з ультрамалими затримками, що прагнуть децентралізованої структури мережі, а також дане покоління мереж зв'язку набуде ряд нових характеристик за рахунок розвитку технологій у галузі мереж та систем зв'язку (наприклад, квантові комунікації) і навіть у суміжних галузях.

Варто також наголосити на наступних тенденціях мереж зв'язку 2030, які згадані в документі МСЕ:

Послуги Телеприсутності. Персоналізація мережі. Або інакше кажучи – присутність цифрових аватарів у мережі (двійників). Це одна з перспективних програм для послуг мереж 2030. При цьому передбачається можливість декількох аватарів однієї людини. Для реалізації цього типу мережі необхідна побудова мереж із ультрамалими затримками. При цьому послуги телеприсутності не обмежуються лише відтворенням дій користувача. При використанні голографічних застосунків та аватарів буде можливо, наприклад, дивитися футбольний матч не по телевізору, а як голографічну модель під будь-яким кутом [11].

Літаючі мережі. На даний момент розвиток мереж, що літають, вимагає активних досліджень для їх застосування в цивільних цілях. Тому, згідно трендам літаючі мережі можуть увійти в широку цивільну експлуатацію ближче до 2030 [9].

У 2030 році різноманітні застосування наномереж [9] і нановішої швидше за все вже зможуть бути широко поширеними. Як мінімум – у медичній галузі. Також одним із напрямків у наномережах є молекулярні мережі. Згідно з рекомендацією МСЕ "FG NET-2030 Technical Specification on Network 2030 Architecture Framework", мережа зв'язку 2030 буде підтримувати різні і дуже суворі функціональні та нефункціональні вимоги, включаючи суворі вимоги до низької затримки та великого обсягу обміну даними. Додаткові нові характеристики та можливості мережі 2030 [10]:

- детермінізм у затримках та передача без втрат;
- вбудована підтримка кількох типів послуг, своєчасна активація та доступність послуг;
- гнучкість налаштування мережних сервісів та мережних функцій;
- ефективний програмований мережний протокол;
- безпечні та довірчі мережі;
- вищий рівень стійкості перед відмовими;
- інтеграція великої кількості інтелектуальних методів (методи на основі ШІ, Машинного навчання та Великих даних) у мережну інфраструктуру, з метою контролю та керування;
- еволюція архітектури у бік розподіленого керування.

Архітектурні принципи мережі зв'язку та послуг – це проектні рішення, використовуються як основа для роботи системи. Кожен принцип застосовується до певного набору точок зору архітектуру. З погляду користувача, принципи системи розуміються як суттєві характеристики системи, що відбивають призначення системи та її ефективне функціонування [10]. У документі МСЕ пропонуються наступні архітектурні принципи, які відображені рисунку 1.4.

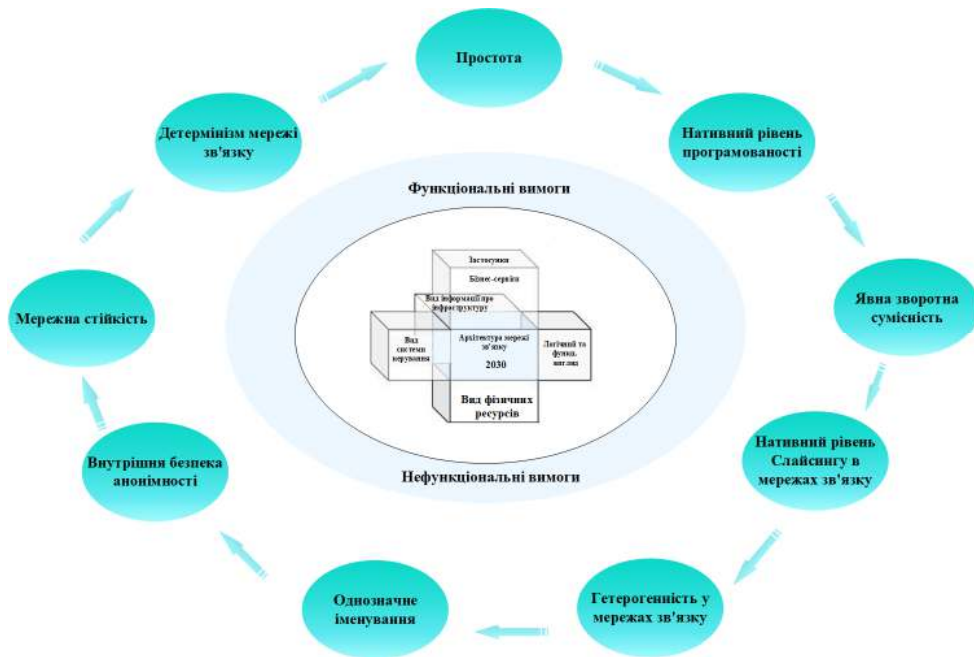


Рисунок 1.4 – Принципи архітектури мережі зв'язку 2030 [10]

Більшість характеристик мереж зв'язку 2030 року будуть визначатися новими технологіями, які знайдуть широке впровадження для реалізації цих мереж. ШІ (або перші його версії/прототипи) інтелектуально управлятимуть потоками трафіку, квантові комп'ютери дозволять терміналам користувача виконувати безліч нових трудомістких завдань, нанотехнології зможуть відкрити світ зв'язку в нановимірі і надати різні нові типи послуг зв'язку. Крім того, концепція Індустрії 4.0 вийде на новий рівень та інші зміни, які зараз ще складно оцінити [11].

1.3 Штучний інтелект у мережах зв'язку

Причиною великого інтересу застосування технологій ШІ в мережах зв'язку є надія на вирішення безлічі завдань, що важко вирішити перед мережами зв'язку 5G і наступних поколінь. У глобальному плані мережі зв'язку повинні реалізовувати вимоги наднадійних мереж з ультрамалими затримками (з англ. URLLC – Ultra Reliable Low Latency Communications) [12].

На рисунку 1.5 наведено концептуальну схему мережі з ШІ, побудовану на технологіях SDN/NFV з імплементацією структури граничних обчислень (з англ. MEC – Multi-access Edge Computing) та принципу слайсингу в мережах [13].

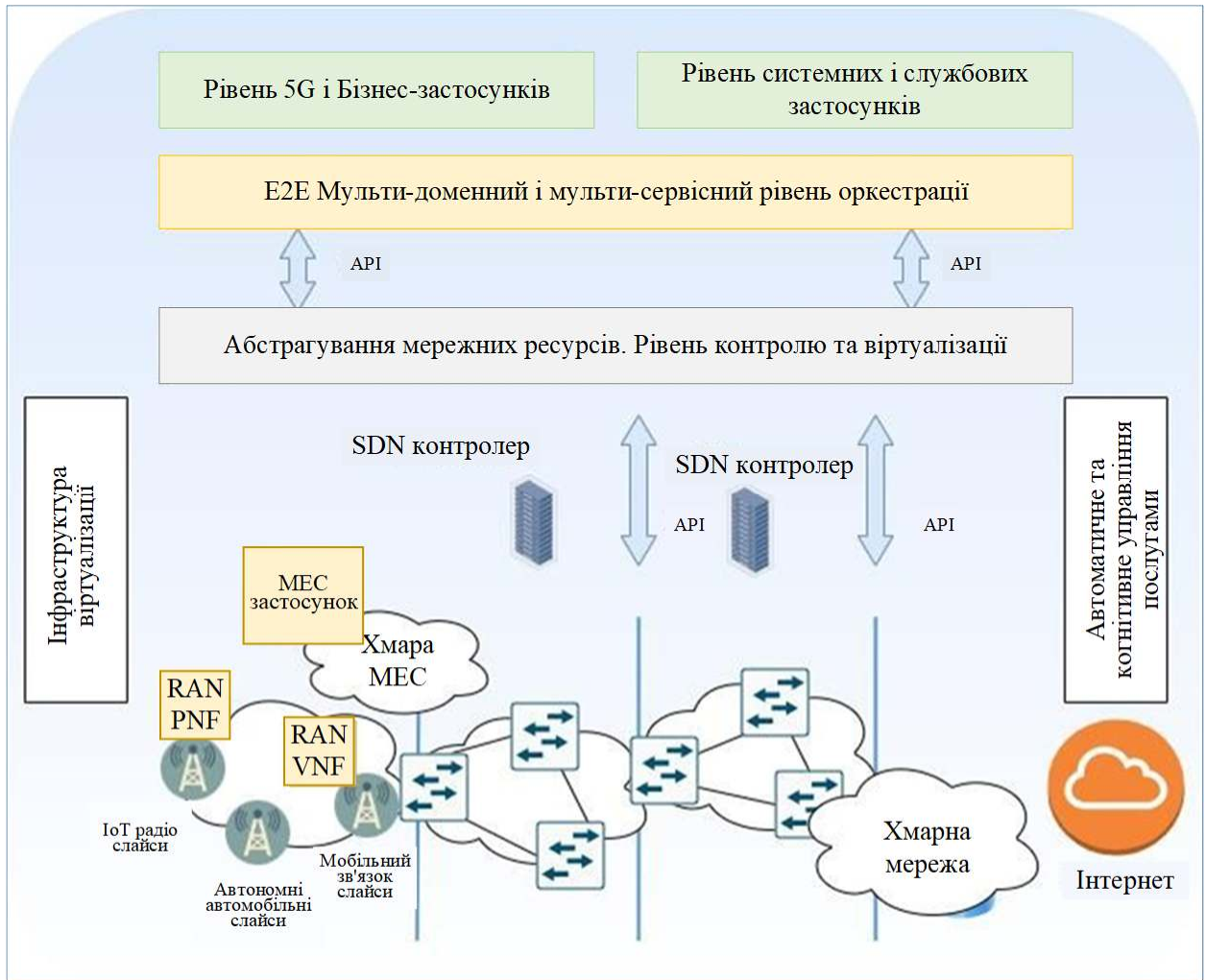


Рисунок 1.5 – Концептуальна схема мережі за допомогою ШІ

Останнім часом машинне навчання застосовується у багатьох додатках, наприклад, у віртуальних персональних помічниках, відеоспостереженні в соціальних мережах, фільтрації спаму та шкідливих програм електронною поштою, пошукових системах тощо.

До 2025 року, як впливає зі Звіту GIV 2025 [13] у світі налічуватиметься 40 млрд інтелектуальних пристроїв на базі штучного

інтелекту та 100 млрд мережних з'єднань, що сприяють переходу на цифрові технології у пріоритетних сферах – соціальній, виробничій та банківській. Ці два фактори серйозно скоротять потребу у використанні сховищ інформації, буде зроблено ставку на швидкий, безпечний та інтелектуальний обмін даними. Через війну щорічний обсяг світових даних сягне 180 млрд Тбайт, тобто. у 20 разів більше, ніж сьогодні (9 млрд. Тбайт). Середній обсяг використання даних у мережах мобільного зв'язку на користувача щодня зросте приблизно 30 раз – до 1 Гбайт.

2 МЕТОД ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТРАФІКУ ПОСЛУГ У МЕРЕЖАХ ЗВ'ЯЗКУ П'ЯТОГО ТА НАСТУПНИХ ПОКОЛІНЬ

Раніше, в аналізі сучасних і перспективних концепцій мереж зв'язку, було наведено три основні принципи, на основі яких будується мережа п'ятого покоління і які, відповідно, дотримуватимуться і в наступному поколінні:

- широкі міжмашинні взаємодії (з англ. MMC – Massive Machine type Communications);
- поліпшений мобільний широкопasmовий зв'язок (с англ. eMBB – Enhanced Mobile Broadband);
- наднадійний зв'язок з ультрамалими затримками (з англ. URLLC – Ultra-reliable and low latency communications).

На даний момент, URLLC висуває певні і при цьому жорсткі нові вимоги якості обслуговування (QoS), забезпечення яких дозволить існувати новим типам сервісів. Дані послуги реалізуються в таких напрямках: електронна медицина, автономний транспорт, небезпечні промислові виробництва формату 4.0 та інші.

Отже, за більшого впровадження технологій як мережних, і обчислювальних, необхідно переглянути принципи керування мережами. Враховуючи ті можливості програмованості, які були закладені в Програмно-конфігуровані мережі та системи оркестрації обчислювальних структур, необхідно їх реалізовувати, враховуючи технології Штучного Інтелекту. Сучасний обсяг трафіку, його гетерогенність та різноманітність сервісів Інтернету Речей (I), у тому числі тих, що належать до URLLC, диктує нові вимоги до оперативності прийнятих рішень щодо забезпечення якості обслуговування. Існуючі інструменти що неспроможні надати необхідний рівень [14]. І в даному випадку вже в більшості рішень потрібно мати прогнози навантажень на ті чи інші послуги, враховуючи географічні та

динамічні (пересування абонента), в тому числі на високих швидкостях. При цьому оператор має потребу в повноцінних системних прогнозах розвитку інфраструктури, враховуючи швидкість впровадження нових технологій сервісів в мережі Інтернет, зміни способу життя людей (децентралізація та збільшення кількості переміщень у просторі).

Варто також зауважити, що в процесі розробки рішень у мережах п'ятого покоління, розробки стандартів, проведення досліджень дійшли висновку, що вимоги URLLC складно здійснені, з точки зору широкомасштабного впровадження такого типу послуг. Вони можуть бути надані в обмеженому географічному просторі, виділених мережних каналах, і при інших обмеженнях. Однак очікується, що в рамках еволюціонування концепції п'ятого покоління до концепції мереж зв'язку 2030, цей вид послуг буде реалізований. Для реалізації розглядаються одночасно кілька напрямків дозволу на обмеження:

- зміна технологій фізичного рівня та перехід на так звані «Квантові комунікації», які реалізують інший фізичний принцип передачі інформації, заснований на принципі квантової запутаності. Однак цей метод знаходиться на стадії ранніх досліджень;

- децентралізація мереж зв'язку та децентралізація систем обчислень, гнучке їх керування з імплементацією Штучного Інтелекту як системи моніторингу та керування.

На даний момент можна помітити розвиток мережі у питанні наступного вектора: зміна інфраструктурних рішень на програмовані структури із спільною розробкою та покроковим впровадженням технологій ШІ від тривіальних завдань до складніших. Важливою епохою розвитку мереж зв'язку буде перехід на квантові комп'ютери та квантові комунікації. Однак керування даними системами вже буде немислимо без систем, що реалізують у замкнутому циклі всі функції ШІ в мережах зв'язку. І до цього часу дана система матиме достатню кількість статистичної інформації, де

вона навчиться і зможе сама плавно перейти на керування мережами зв'язку на основі квантових комунікацій.

Повертаючись до поточного рівня технологій та прилеглих завдань, в рамках завдань впровадження ШІ на мережі зв'язку є особливо актуальні завдання: однозначна ідентифікація трафіку з подальшим прогнозуванням, ефективний та динамічний розподіл обчислень на інфраструктурі розподілених обчислень, прогнозування та ідентифікація можливих перевантажень керуючих систем. При цьому завдання ідентифікації трафіку включає необхідність розпізнавання великої кількості типів (враховуючи URLLC) сервісів, не вносячи додаткових затримок у трафік, можливість розширення та підстроювання алгоритму під певне географічне розташування мережі та сервісів [14].

2.1 Завдання ідентифікації трафіку послуг у мережах зв'язку

Крім нових рішень на всіх рівнях мереж, а також нових рішень у галузі хмарних технологій, що дозволяють частково наблизитися до тих вимог, які пред'являють сервіси перед інфраструктурою, стоять не менш важливі завдання щодо модернізації логіки обробки трафіку. Так, наприклад, на даний момент якість обслуговування в мережах зв'язку надається за допомогою технологій DiffServ, а також інших TE (з англ. Traffic Engineering) рішень, наприклад MPLS-TE, що використовує в основі протокол резервування ресурсів RSVP-TE. Однак ці рішення мають ряд недоліків для їх застосування в ряді сервісів у мережах п'ятого та наступних поколінь. Основними недоліками є відсутність динамічного керування залежно від мінливості профілю трафіку в мережі, можливості швидкого переконфігурування політик обслуговування підконтрольного домену мережі, а також обмежений набір класифікаторів трафіку, що в умовах, що з'являються та відрізняються за вимогами до якості обслуговування сервісів Інтернету Речів та інших, є дуже критичним недоліком. У стандарті 3GPP TS

23.501 надається карта вимог QoS до різних видів послуг. У ній визначено основні 18, від голосу та відео, до eMBB та Доповненої реальності (AR, з англ. Augmented Reality). Також наводиться поняття Слайсинг, яке безпосередньо пов'язується з наданням QoS. Однак не всі можливі послуги визначені в цьому стандарті 3GPP. При цьому в кожному з напрямків можна визначити пріоритетність послуг. Так, наприклад, у Тактильному Інтернеті можна виділити медичну область основним пріоритетом, а решта сфер застосування – нижчою [15].

При цьому варто зазначити, що пакети у трафіку, яким потрібно надати певні якості обслуговування [16], мають бути заздалегідь позначені міткою – поле ToS у заголовку IP. В даний час поле ToS називається поле «differentiated services» і має 6 біт поля DiffServ Code Point (DSCP) і 2 біт поля «Explicit Congestion Notificatio». Існуючі механізми зручні для використання з метою забезпечення якості обслуговування в таких сферах, як: телефонія, відео, телебачення і т.п. Однак їх застосування для забезпечення якості обслуговування безлічі сервісів Інтернету Речів не зручне, а в деяких випадках неможливе. З урахуванням вищезазначених недоліків в даний момент, трафік Інтернету Речі змішаний із загальним потоком трафіку передачі даних [17]. Трафік IoT може йти разом із трафіком сервісу Video-on-Demand, серфінгу сторінок в Інтернеті та іншим. Усім давно відома проблема “big headers with small bodies” впливає працездатність пристроїв рівня передачі так, що буфери пристроїв переповнюються, що безпосередньо впливає рівень якості сервісу [18]. У багатьох роботах наводиться вражаюча статистика екстенсивного та інтенсивного зростання трафіку, що генерується різними смарт-пристроями. Неоднорідність трафіку, складність розрахунку його зростання, а також оперативного розрахунку зміни його профілю призводять до того, що існуючі «ручні» методи розрахунку втрачають свою актуальність. Для забезпечення оперативного реагування систем керування зростання трафіку (у тому числі періодичного), зміни його профілю, потрібно розглянути інші методи розрахунку і

керування. Для того, щоб забезпечити оперативне реагування, мережі зв'язку та відповідно пристрої комутації та маршрутизації трафіку повинні мати необхідний рівень абстрагування від «фізики» процесів. Необхідний рівень абстрагування від фізичних процесів [17] реалізують концепції SDN і NFV.

Для оперативного реагування систем керування, у разі концепцій SDN та NFV – контролера SDN та оркестратора, потрібно проводити високоточну ідентифікацію трафіку без безпосереднього втручання у потік на рівні передачі даних та відповідно, внесення зміни до його профілю, а також затримок. Варто зазначити, що для заздалегідь зареєстрованих потоків трафіку не стоїть завдання розпізнавання, наприклад – трафіку VoIP або IPTV. У роботі розглядається завдання виявлення трафіку Інтернету Речей у мережі SDN із загальних (заздалегідь не зареєстрованих) потоків. Для вирішення вищеописаного завдання було проведено комплексний аналіз математичних методів класифікації, представлений вище, з урахуванням особливостей вхідних даних про потоки, що аналізуються, а також особливості початкової вимоги – роботи системи в режимі «на льоту». Як результат проведеного аналізу було обрано підхід використання нейронних мереж певної архітектури. Відповідно до поставленої мети та особливостей вхідних наборів даних було обрано архітектуру нейронної мережі.

2.2. Архітектура модельної мережі

Проведення досліджень запропонованого методу включає розробку програмного забезпечення (застосунки контролера SDN), його тестування. Для цих робіт необхідно розробити лабораторний стенд Програмно-конфігурованих мереж з підтримкою північного програмного інтерфейсу, а також розгорнутих на ньому сервісів Інтернету Речів, який емулюватиме роботу однієї з програм Розумного міста, а також сервіс потокового відео. Наявність двох типів трафіку у мережі необхідне тестування методу. Як трафік генератора Інтернету Речей буде використовуватися рішення,

розроблене в даній роботі [18]. Варто зазначити, що інфраструктура лабораторії для цього завдання була також модернізована. Дана модельна мережа включає також інші дослідні лабораторії кафедри ССiПД: ІрTV, Інтернету Речів, Якості сприйняття, моделювання та оптимізації. Дана модельна мережа дозволяє проводити дослідження в галузі розробки та реалізації методів та алгоритмів ШІ для мереж зв'язку 5G/ІMT-2020 для частини Програмно-конфігурованої мережі. Архітектура використовуваної модельної мережі наведено рисунку 2.1.

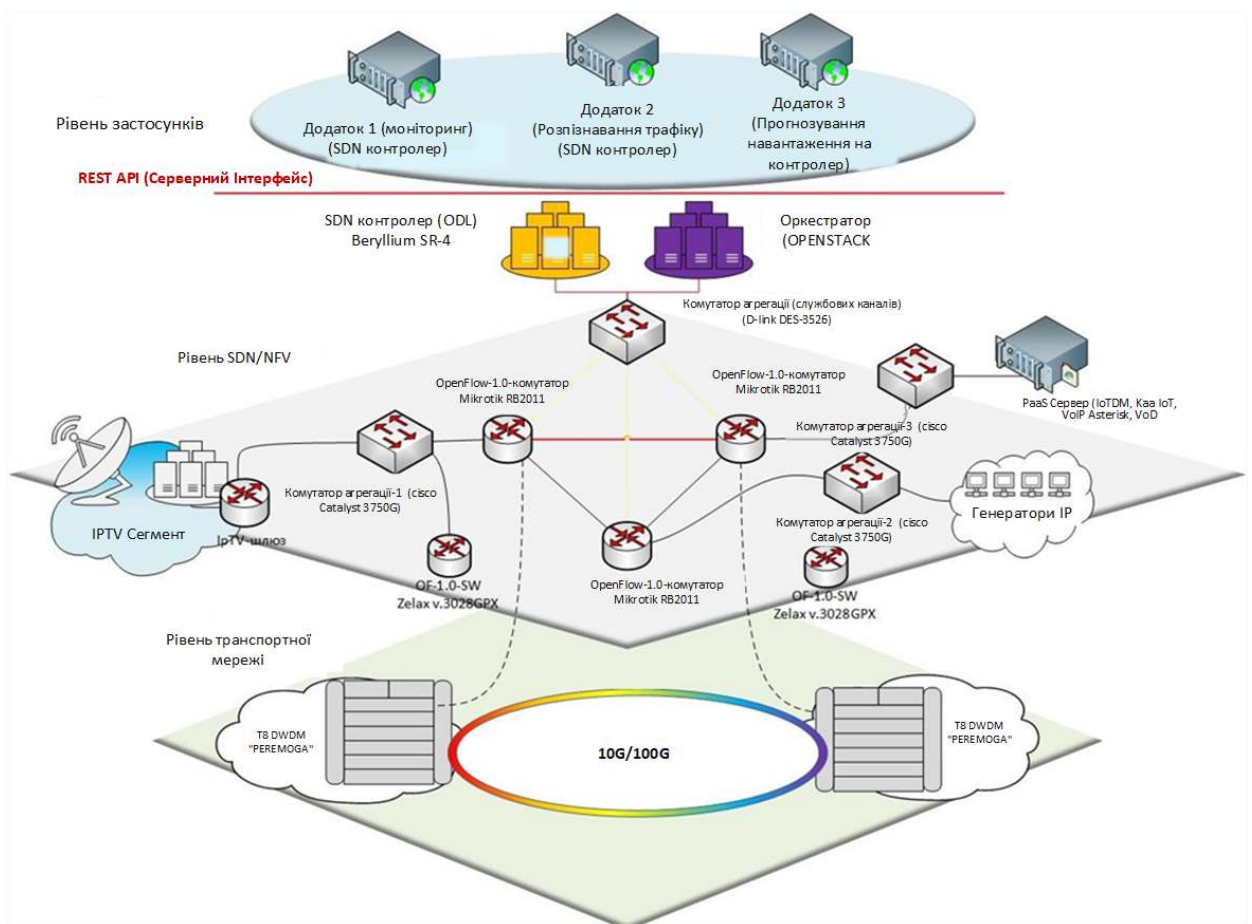


Рисунок 2.1 – Архітектура моделі лабораторії, що використовується

Лабораторний стенд являє собою з'єднані в кільце три програмно-керовані комутатори SDN, що реалізують протокол OpenFlow версії 1.0. Вибраний контролер з відкритим вихідним кодом OpenDaylight програмно-

конфігурованої мережі реалізує розподіл навантаження по мережі спочатку за промовчанням [18]. Так як цей стенд був зібраний в першу чергу з метою проведення досліджень, рівень керування був інтегрований звичайний комутатор Ethernet, який агрегував всі службові потоки і забезпечував доступність контролера SDN. Також в мережі даного комутатора було реалізовано доступ до північного рівня контролера SDN.

Таким чином, програми мережі можуть бути розроблені та розгорнуті на інших серверах, які працюють з контролером або оркестратором мережі через цей комутатор. Комутатор на цьому рівні дозволяє масштабувати мережу шляхом збільшення кількості підключених комутаторів до одного контролера в мережі. Для розширення кількості можливих підключень до кожного комутатора SDN був послідовно підключений простий Ethernet-комутатор, що виконує роль агрегації в даній топології.

Варто звернути увагу на контролер OpenDaylight. Дане рішення є одним з найкращих на ринку відкритого ПЗ контролерів Програмно-конфігурованих мереж з погляду наступних критеріїв: технічна підтримка, відкритість, архітектурне рішення контролера, широка функціональність, масштабованість та швидкість обробки потоків OpenFlow.

В основі програмного забезпечення даного контролера лежить модульна архітектура Java Karaf, тим самим забезпечуючи необхідну розширюваність контролера шляхом встановлення необхідних додаткових модулів або власної розробки модулів з подальшою інтеграцією до програмної шини контролера. Також у даного контролера реалізовано досить зручний та добре задокументований програмний інтерфейс (з англ. API – Application Programming Interface) формату REST для додатків, що працюють поверх північного інтерфейсу.

Варто зазначити, що завдяки модульній архітектурі цього контролера існує можливість встановлювати необхідні програмні модулі (OSGi-контейнери) у поточній конфігурації. При цьому не потрібно повне встановлення додаткових модулів, що також знижує навантаження на

апаратну частину контролера. Варто зазначити, що підключення власних розроблених програмних модулів добре відображено у документації розробника, яка також знаходиться на офіційному сайті проекту OpenDaylight у вільному доступі. Як оркестратор мережі використовується також відкрите рішення – OpenStack, який інтегрується також із рішенням OpenDaylight через програмний модуль «OpenStack Neutron».

Для реалізації трафік-генератора типового сервісу IP було розгорнуто сервер із операційною системою Linux Ubuntu версії LTS із встановленим та налаштованим сервісом IoTDM (Internet of Things Data Management), розроблений також спільноту OpenDaylight консорціуму The Linux Foundation. Цей сервер реалізує специфікації OneM2M по міжмашинному взаємодії. Використання рішень від OpenDaylight обумовлено тим, що в цю спільноту входить досить велика кількість міжнародних іменитих компаній, які переймають дані розробки до своїх пропрієтарних продуктів.

Варто звернути увагу на контролер OpenDaylight. Дане рішення є одним з найкращих на ринку відкритого ПЗ контролерів Програмно-конфігурованих мереж з погляду наступних критеріїв: технічна підтримка, відкритість, архітектурне рішення контролера, широка функціональність, масштабованість та швидкість обробки потоків OpenFlow

На рисунку 2.1 можна помітити на сервісному рівні мережі кілька додатків, які реалізують розроблені та представлені у цій дисертації методи. Дані програми розроблені мовою програмування Python з відповідними фреймворками та бібліотеками, та взаємодіють з контролером SDN логічно за північним інтерфейсом REST, а фізично – через прошарок мережі керування.

Основне обладнання, яке використовувалося під час побудови лабораторного стенду для проведення досліджень, відображено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Параметри використаного обладнання

№ .	Архітектура моделі лабораторії, що використовується	Технічний опис
1	SDN-контролер (ODL) Beryllium SR-4	ЦПУ: Intel Xeon® E3-1220V2 ОЗУ: 16 Гб ОС: Linux Ubuntu 14.04 LTS Версія ПЗ: Opendaylight Beryllium SR4
2	OpenFlow 1.0 комутатор Mikrotik RB 201 1UI AS-RM	Mikrotik RB 201 1UI AS-RM Версія ПЗ: OpenFlow 1.0
3	Комутатор агрегації №1	Cisco Catalyst 3750G series PoE-24
4	Комутатор агрегації №2	D-Link DES 3526
5	Комутатор агрегації №3	Cisco Catalyst 3750G series PoE-24
6	Комутатор агрегації (службових каналів)	D-Link DES 3526
7	PaaS Сервер (IoTDM – сервер)	ЦПУ: Intel Xeon(R) E3-1220V2 ОЗУ: 12 Гб ОС: Linux Ubuntu 14.04 LTS Версія: Opendaylight Boron SR2
8	Застосунок 1 (моніторингу) Застосунок 2 (Розпізнавання трафіку) Застосунок 3 (Прогнозування навантаження на контролер)	ЦПУ: Intel Core i5 ОЗУ: 8 Гб ОС: Linux Ubuntu 16.04 LTS

Всі програми розгорталися однією фізичному сервері. У процесі розробки роль сервера виконував персональний ноутбук, у процесі тестування стаціонарний ПК.

Оскільки модельна мережа в даній роботі є реальною програмно-конфігурованою мережею, для проведення розробки та тестування необхідно

відтворити трафік додатків як на рівні передачі даних, так і на рівні керування мережею. Справжній трафік в модельній мережі, реалізованій у форматі стенду можна відтворити або діючими пристроями IP, або генератором трафіку, що емулює роботу пристроїв IP. У рамках даної роботи було обрано шлях використання трафік-генератора, що емулює роботу пристроїв Інтернету Речей, який був розроблений у цій роботі [49]. У роботі [49] трафік-генератор використовувався для тестування платформи IP IoTDM та дослідження взаємодії трафіку IB у Програмно-конфігурованих мережах, у тому числі дослідження роботи динамічного автобалансування навантаження у підконтрольній мережі. Для вищезазначеного дослідження з метою наближення роботи емулятора до реального масштабу було розроблено модель на основі одного з тривіальних сервісів Розумного міста – система моніторингу екологічних параметрів трьома видами датчиків.

Реалізована модель у трафік-генераторі працювала так:

- відповідно до закладеної архітектури – побудова логічного дерева ресурсів;
- ініціалізація пристроїв IP, де кожен пристрій під час ініціалізації до дерева ресурсів платформи надсилає відповідний запит на API REST з інформацією про готовність датчиків.
- генерація трафіку IP. У процесі роботи кожен пристрій посилає запити щосекунди до дерева ресурсів, наповнюючи його.

В результаті вийшла модель, що імітує роботу 960 пристроїв IB. При цьому, одночасно працювало з платформою 240 пристроїв IP. Для проведення досліджень у роботі принцип розгортання трафік-генератора був модифікований. Якщо раніше, даний трафік-генератор розгортався в кожному агрегаційному сегменті, то для робіт в рамках даної роботи, трафік генератор був розгорнутий тільки в одному сегменті, що агрегує, а сама платформа IP розташовувалася в іншому агрегаційному сегменті. Також варто відзначити, що в даній роботі не потрібно проводити тестування на різних протоколах IP, тому був обраний трафік-генератор, що працює з

платформою за протоколом HTTP 2.0, який містить дані у форматі JSON. На додаток, для роботи з ідентифікації трафіку не був потрібний такий інтенсивний потік і для експерименту емулювалися роботи всього 240 пристроїв.

Використовувана платформа на GUI (від англ. Graphical User Interface) відображає дерево ресурсів, яке представлено на рисунку 2.2

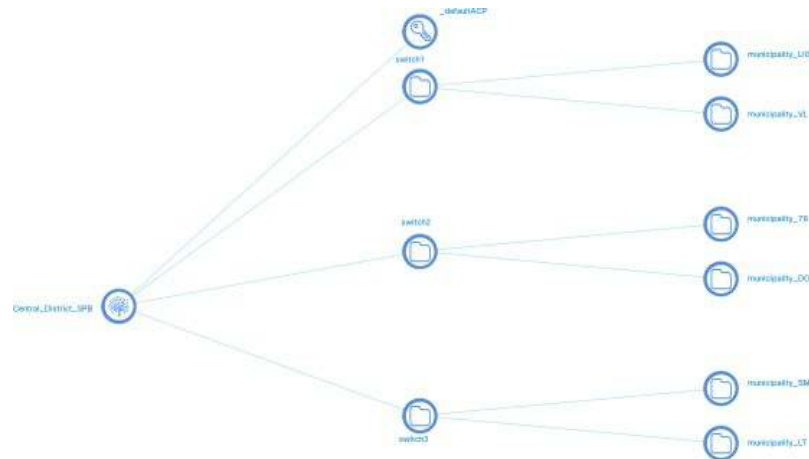


Рисунок 2.2 – Структура дерева ресурсів

Дерево ресурсів виходить при його побудові програмним способом і наступним заповненням даними, що передаються з пристроїв (в даному випадку – емульованими пристроями).

2.3 Розробка методу моніторингу та ідентифікації трафіку послуг у мережах зв'язку п'ятого та наступного поколінь

На даний момент існує чимало робіт, спрямованих на розпізнавання трафіку в мережах зв'язку. Підходи, що пропонуються більшою мірою засновані на періодичному захопленні трафіку та аналізі його заголовків. Такий метод має низку недоліків, а саме: внесення затримки в потік, реалізація аналітичного модуля у вигляді додаткового апаратно-програмного рішення рівня передачі даних (з англ. Data Plane), складність такого

пристрою [19]. Також варто відзначити недолік у масштабуванні такого пристрою. Для глибокого вивчення вмісту трафіку використовують системи глибокої інспекції пакетів (з англ. DPI – Deep Packet Inspection). У цій роботі пропонується реалізація аналітичної системи на сервісному рівні інфраструктури Програмно-конфігурованих мереж. Зрештою система може бути представлена як апаратно-програмний комплекс, так і програмне рішення (у вигляді програми мережі). Принципова архітектура запропонованого рішення представлена на рисунку 2.3.

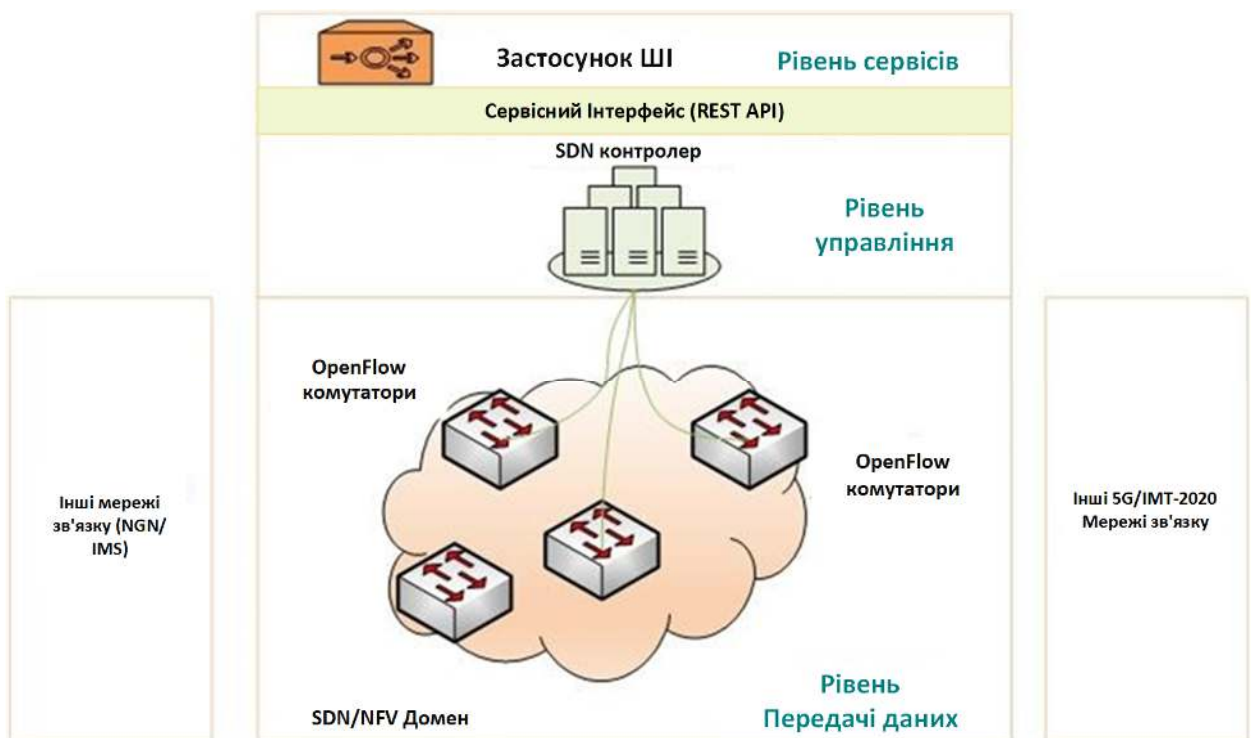


Рисунок 2.3 – Принципова архітектура

Таким чином, з'являється можливість переносимості системи, незалежності середовища передачі даних і тим більше інтеграції з рівнем передачі даних. Для аналітичної системи всі пристрої та потоки є «цифровим об'єктом», що має ряд параметрів та функцій (дій над параметрами), представленим набором методів [19]. Такий рівень абстракції дозволяє реалізувати систему аналітики, яка працюватиме з даними про потоки

(метадані) у режимі «На льоту». Таким чином, дана система дозволить не вносити додаткових затримок у трафік, а також будь-яким чином змінювати його активність (зміни законів розподілу, інтенсивність тощо). Можна сказати, що система «спостерігає» за активністю потоків і складає «загальну картину» зв'язку, що відбувається в підконтрольній мережі.

З урахуванням принципової архітектури запропонованого рішення, а саме реалізації програми, що працює на сервісному рівні з контролером SDN за інтерфейсом REST, вхідні дані формуються на основі тих даних, які система може отримати через північний інтерфейс контролера і оркестратора мережі. Оскільки у цій роботі розглядається аналітика активності потоків і виявлення потоків ІВ лише на рівні передачі, аналітична система має можливість запросити дані таблиць потоків (з англ. Flow Tables) з усіх підконтрольних комутаторів SDN у контролера. Якщо проаналізувати дані, що відображаються у двох глобальних частинах таблиці: Match Field і Actions, можна дійти висновку, що з їхньої основи можна скласти метамодель потоків. Скорочену структуру таблиці потоків комутатора відображено на рисунку 2.4.

Match Field					Action
#	In Port	TimeStamp	Flow Statistics		
			Byte Count	Packet Count	
1			B_count_1	P_count_1	




Рисунок 2.4 – Структура таблиці потоків комутатора SDN

На рисунку 2.4 жовтими колами виділено ті дані, які будуть використовуватися для формування метамоделі про досліджуваний потік у мережі. Однією з важливих особливостей цих даних є те, що на основі

лічильників «Byte Count» і «Packet Count» не можна точно визначити точну довжину пакета в потоці. Оскільки як за один момент часу лічильники можуть дорівнювати: «Byte Count» – 1500, «Packet Count» – 2. Відповідно, на основі цих даних не можна точно визначити довжину кожного з пакетів, зареєстрованих у потоці за проміжок часу: $\Delta T = 1$ [с].

Розрахунок сумарних значень параметрів за встановлений проміжок часу проводиться за такими формулами.

$$ByteCount_{\Delta t} = \sum_{N=1}^{N=\Delta t/TS} BC_{delta_{N2}}, \quad (2.1)$$

$$PacketCount_{\Delta t} = \sum_{N=1}^{N=\Delta t/TS} PC_{delta_{N2}}. \quad (2.2)$$

Як уже було сказано вище, для розв'язання вищеописаної задачі було проведено комплексний аналіз математичних методів класифікації з урахуванням особливостей вхідних, аналізованих даних про потоки, а також особливості початкової вимоги - роботи системи в режимі «на льоту». У результаті проведеного аналізу було обрано підхід використання нейронних мереж [45]. Відповідно до поставленої мети й особливостей вхідних даних $DataSet_{ML}$ було обрано відповідну архітектуру нейронної мережі.

2.4 Нейронна мережа та Deep Learning

На даний момент існує великий різновид нейронних мереж. Однією з типових завдань є класифікація. Один із найпоширеніших способів класифікації – спосіб на основі описів об'єктів з використанням ознак, у якому кожен об'єкт характеризується набором числових чи нечислових ознак [20]. Однак для деяких типів даних відкриті ознаки не дають точності класифікації, наприклад, кольору точок зображень або цифрового звукового сигналу. Причина полягає в тому, що ці дані містять приховані ознаки. Deep

Learning є набором алгоритмів машинного навчання, які дозволяють моделювати високорівневі абстракції в даних, іншими словами, виділяти з даних приховані ознаки, при цьому нейронні мережі містять більше, ніж 2 прихованих шари. Тому, враховуючи особливості об'єкта (трафік) та його ознак (числові – статистичні ряди, що є метаданими) було обрано нейронну мережу з Deep Learning.

Розробка та навчання нейронної мережі проводилися на основі високорівневої мови програмування Python з його різними бібліотеками та фреймворками. Як штучну нейронну мережу було обрано рекурентну нейронну мережу з додатковими шарами LSTM (Long Short-Term Memory, з англ. – довготривалою короткостроковою пам'яттю). Мережа LSTM є універсальною тому, що з достатньою кількістю нейронів вона має можливість виконувати будь-які обчислення, які може виконувати звичайний комп'ютер. У цій роботі глибинний модуль LSTM, як частина штучної нейронної мережі (ШНМ) дозволяє виявляти закономірності впливу даних попередніх відліків на поточні з урахуванням великого розкиду значень між ними. Тобто, наприклад, періодичність, що може виявляється у трафіку IP, самоподібність характеру якого наводиться у багатьох роботах.

Оскільки обрана архітектура нейронної мережі реалізує принцип «навчання із залученням вчителя», потрібно скласти навчальні набори даних із маркованими даними, після чого зберегти стан навченої мережі. Для навчання нейронної мережі вхідний $DataSet_{ML}$ було перетворено на $DataSet_{MLtrain}$ шляхом додавання нового стовпця даних, у кожному рядку якого стояв ідентифікатор статистичної вибірки. Відповідно, для навчання розпізнавання більшого типу трафіку цей навчальний набір даних потрібно розширити, позначивши відповідну статистичну вибірку міткою трафіку, наприклад – IoT. Таким чином, структура навчального $DataSet_{MLtrain}$ має такий вигляд:

$$\begin{array}{cccc}
 [TypeOfTraffic] & [TimeStamp] & [ByteCount] & [PacketCount] \\
 IoT & TS & BC_{\Delta_{12}} & BC_{\Delta_{13}} \\
 IoT & TS & BC_{\Delta_{22}} & BC_{\Delta_{23}} \\
 Video & TS & BC_{\Delta_{N2}} & BC_{\Delta_{N3}} \\
 others & TS & BC_{\Delta_{(N+1)2}} & BC_{\Delta_{(N+1)3}}
 \end{array}
 \quad (2.3)$$

Мережа LSTM отримує дані фіксованої довжини, тому дані діляться сегменти по 200 рядків чи 10 секунд.

Теги типу трафіку перетворюються на унітарний код за допомогою вбудованих у бібліотеку Python відповідних функцій. Дані поділяються на тренувальні та тестові набори щодо 8:2.

Архітектура мережі містить 2 повнопов'язані глибинні рівні LSTM і 2 пов'язані глибинні рівні RNN (Recurrent Neural Network, з англ. Рекурентна нейронна мережа), кожен з яких містить 7 прихованих нейронів.

Параметри тренування ШНМ:

- оптимізатор: Adam;
- кількість епох навчання: 40;
- кількість зразків на ітерацію: 1024;
- швидкість навчання: 0,0025.

На рисунку 2.5 відображено вхідний шар, що складається з трьох нейронів, на вхід яких подавалися відповідні дані $DataSet_{MLtrain}$. Вхідні три нейрони з першим вкладеним рівнем, що складається з нейронів типу LSTM. Другий вкладений рівень складається з нейронів типу LSTM і пов'язаний як з першим, так і з третім пов'язаним принципом. Третій та четвертий вкладені рівні штучної нейронної мережі будуються на пов'язаних нейронах типу RNN.

Вихідними нейронами на даний момент є два нейрони, які відображають результат роботи нейронної мережі. Відповідно, якщо скласти $DataSet_{MLtrain}$ з великою кількістю типів позначеної статистики трафіку, то кількість вихідних нейронів збільшуватиметься.

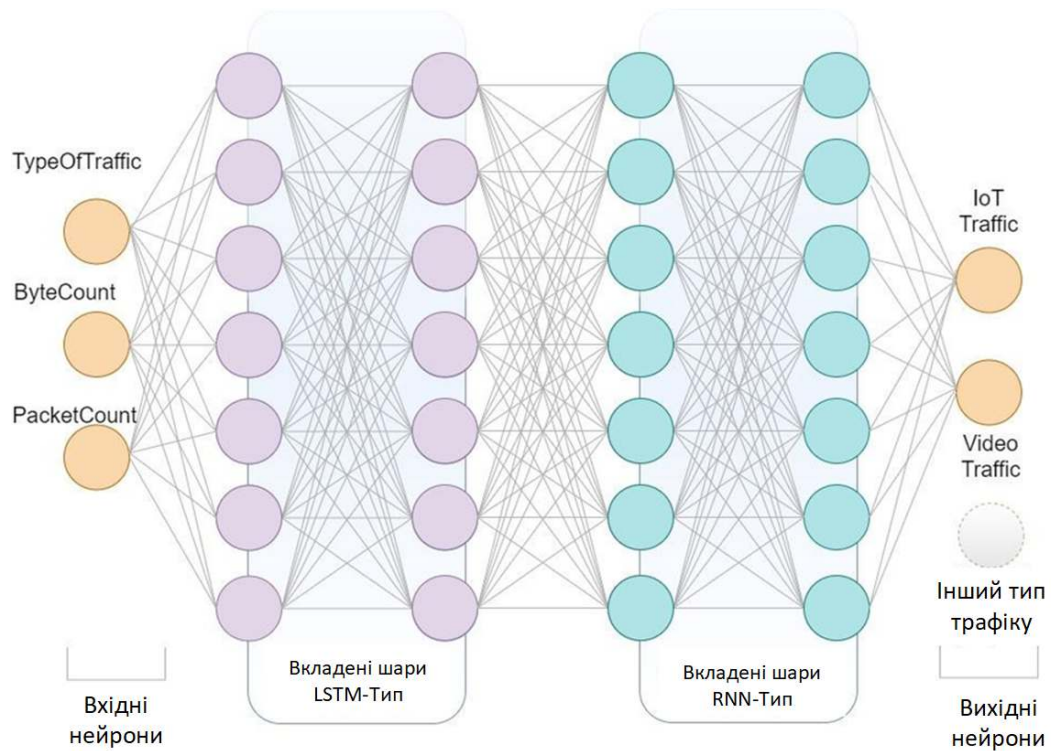


Рисунок 2.5 – Архітектура ШНМ

Існує певний поріг, перевищуючи який, для навчання нейронної мережі потрібно збільшувати кількість нейронів у кожному вкладеному шарі.

Для формування навчальних для Штучної Нейронної Мережі наборів даних було визначено спеціальні умови:

- увесь будь-який інший трафік, що не належить до проведеного дослідження, має бути вимкнений і не проходити в SDN-сегмент;
- мережа має бути модифікована так, щоб була можливість однозначно ідентифікувати потік із трафіком, що генерується, у таблиці потоків комутаторів.

Після збору необхідних даних з сегмента Програмно-конфігурованої мережі, аналітичний програмний модуль запуслав відповідний алгоритм первинної обробки даних для підготовки їх як навчального набору ШНМ. Після успішного навчання розроблена ШНМ зберігала свій стан (вийшла архітектура, ваги, та інші параметри). На наступній стадії, при «бойовому» розпізнаванні трафіку, збережений стан може бути використане іншим ПЗ,

яке формує тестовий набір даних після вказівки номера досліджуваного потоку в таблиці потоків. Загальна архітектура сегмента та досліджуваний сценарій відображені на рисунку 2.6.

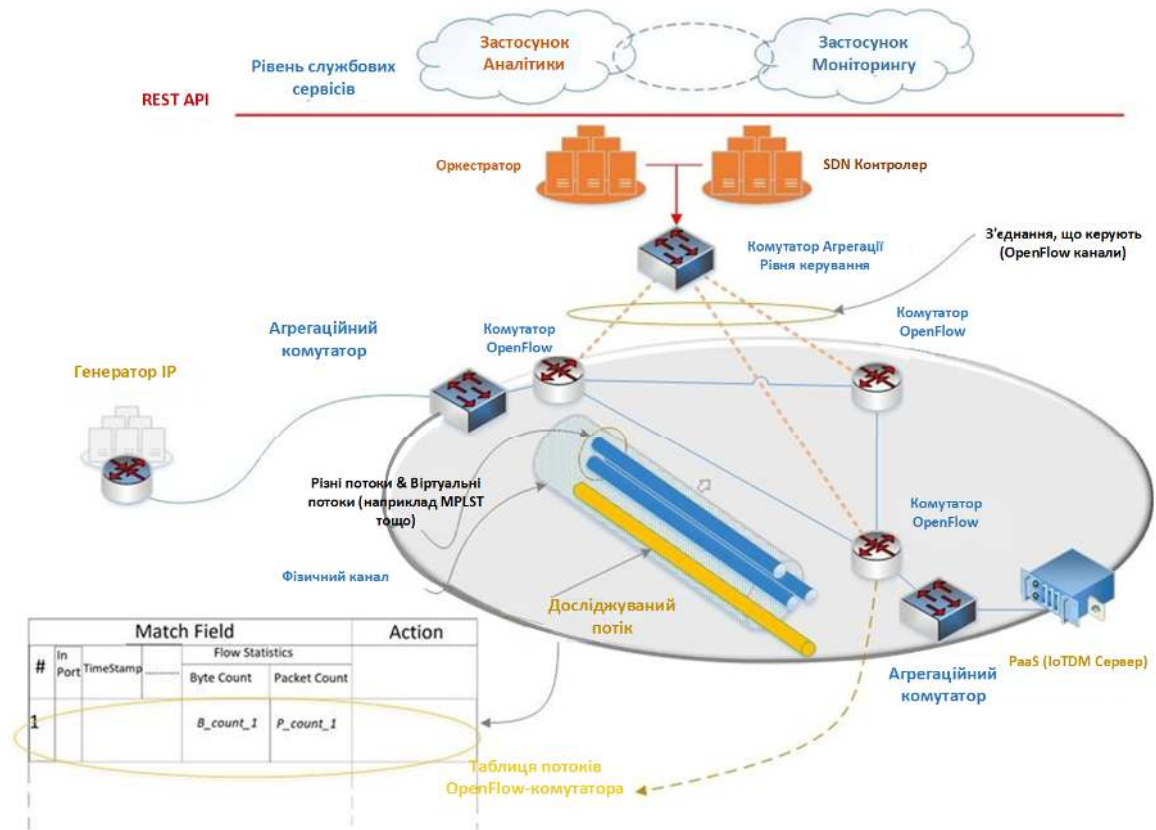


Рисунок 2.6 – Загальна архітектура сегмента з досліджуваним сценарієм

На рисунку 2.6 відображено всі головні елементи модельного стенду програмно-конфігурованої мережі з серверами (генерації трафіку, платформи ВВ), у тому числі відображено досліджуваний сценарій з об'єктом дослідження та параметрами.

Як вже зазначалося раніше, для проведення навчання ШНМ було дотримано певних умов: весь сторонній трафік був вимкнений (дезактивований), мережа модифікована таким чином, щоб була можливість однозначно детектувати В результаті було отримано $DataSet_{MLtrain}$, який був сформований з двох маркованих наборів даних (IoT, Video). Далі

`DataSetMLtrain` подавався на вхід нейронної мережі, конфігурація якої відображена вище.

За отриманим `DataSetMLtrain` була побудована діаграма розкиду значень. Діаграма наведена на рисунку 2.7. На цій діаграмі візуально можна виділити кілька кластерів розподілу точок, в області яких переважає відповідне значення середнього значення довжини пакета в потоці. Наприклад, в потоці IP, в більшості випадків (щільна область точок), середня довжина пакета становить приблизно 400 байт, при цьому параметр може змінюватись. Також варто помітити викид значення середньої довжини пакета 470 байт.

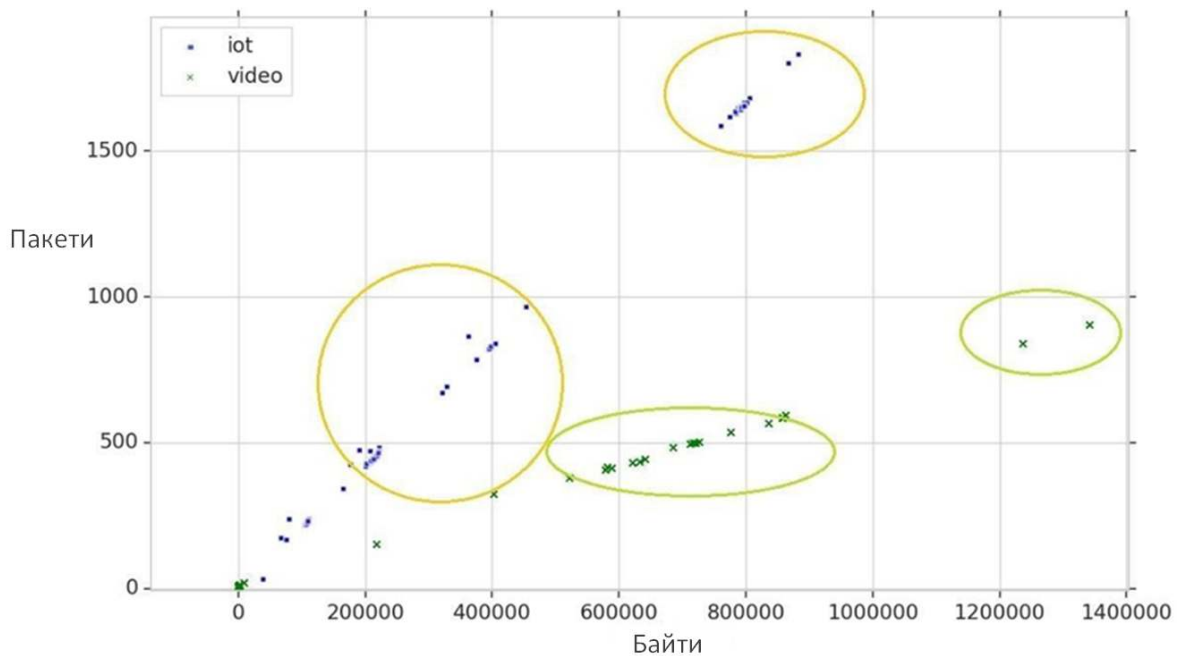


Рисунок 2.7 – Діаграма розкиду значень `DataSetMLtrain`

На додаток, помітний викид значень у статистичному ряді метаданих відео потоку, причому в більшості випадків середня довжина пакета (у щільній області точок) становить приблизно 1450 байт, при цьому даний критерій також варіюється, але незначно.

Протягом процесу навчання нейронної мережі додатково спостерігалися такі параметри:

- train accuracy (точність навчання);
- test accuracy (точність проходження тесту ШНМ);
- train loss (помилки під час навчання);
- test loss (помилки під час проходження тесту ШНМ).

Графік, що відображає дані параметри у процесі проходження епох навчання, наведено на рисунку 2.8. Додатково, на рисунку 2.9 – наведено наближення (збільшено масштаб частини графіка на малюнку 2.8) для детальнішого відображення різниці між графіками.

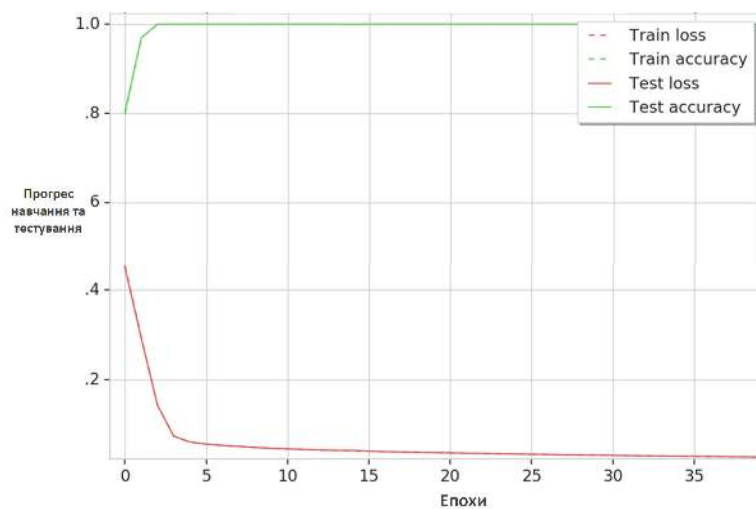


Рисунок 2.8 – Графік навчання та тестування ШНМ

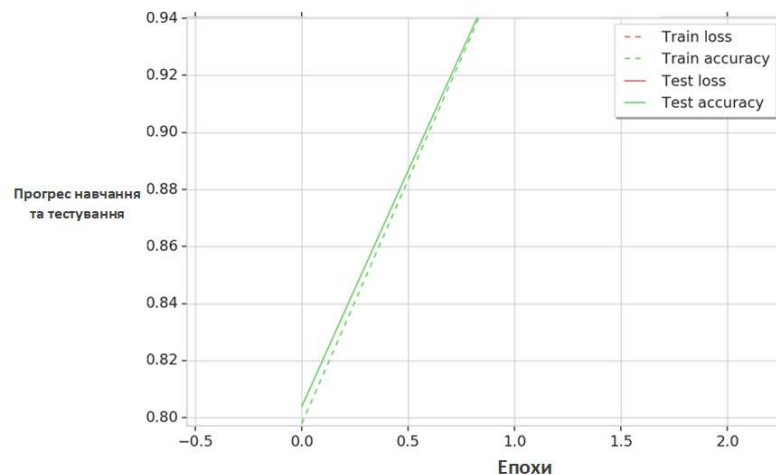


Рисунок 2.9 – Графік навчання та тестування ШНМ в масштабуванні

Крім вище наведених графіків, було розраховано матрицю протиріч навчання штучної нейронної мережі. Матриця, що вийшла, наведена на рисунку 2.10

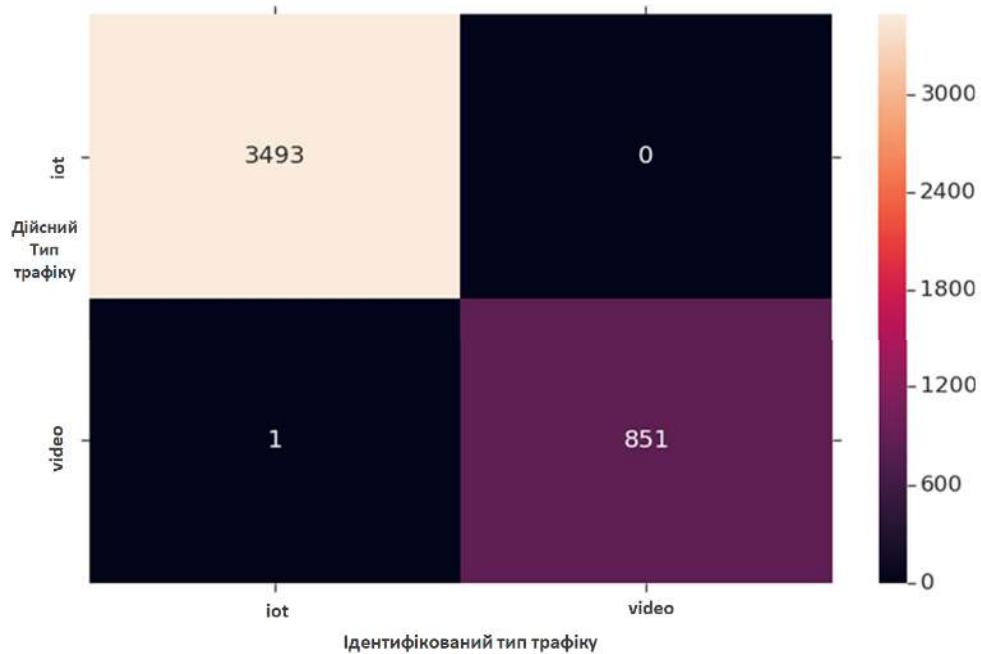


Рисунок 2.10 – Матриця протиріч (Confusion Matrix)

На рисунках 2.8 та 2.9, де відображено процес навчання мережі, добре видно, що для поставленого завдання розроблена штучна нейронна мережа успішно пройшла процес навчання. В результаті процесу навчання нейронної мережі та перевірки її роботи на тестових наборах даних у навченому стані розроблена нейронна мережа може ідентифікувати потік Інтернету Речей, що генерується, з ймовірністю 99,7 %. А також відповідно і потік, що генерується відео. За допомогою матриці протиріч (рисунок 2.10) можна помітити, що мережа один раз помилилася, ідентифікувавши Відео потік, як потік Інтернету Речей. Варто також зазначити, що обрана архітектура виявилася ефективною для вирішення поставленого завдання. При меншому значенні нейронів у вкладених рівнях, нейронна мережа працює не стабільно, тобто робить багато помилок, у тому числі в процесі навчання, а не тільки

кінцевої роботи. При більшому значенні нейронів – мережа не ефективна, оскільки потребує більшого значення обчислювальних ресурсів. Варто зазначити, що з перебільшенні певного значення нейронів у складеному шарі – нейронна мережу перетворюється на режим «перенавченості». На додачу варто зазначити, що отримана ймовірність розпізнавання потоків даних (ІВ та Відео) вийшла досить високою і при збільшенні кількості типів трафіку, що розпізнається (при збільшенні – формується новий, розширений набір даних для навчання ШНМ) дана ймовірність може знизитися, проте перебуває у допустимих межах (80-90%).

3 МЕТОД ПРОГНОЗУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ НА КОНТРОЛЕРИ ПРОГРАМНО-КОНФІГУРУЮЧИХ МЕРЕЖ

3.1 Проблема моніторингу контролерів програмно-конфігурованої мережі

З метою забезпечення досить високих вимог щодо якості послуг, у тому числі в такому класі мереж як мережі зв'язку з ультранизкими затримками та наднадійністю, необхідно забезпечити стійкість систем керування в мережах зв'язку 5G/IMT-2020 та наступного покоління. Як уже раніше в Главі 1 цієї дисертації було наведено, основними мережевими технологіями опорних мереж, згідно з рекомендаціями Міжнародного Союзу Електрозв'язку, є технології Програмно-конфігурованих мереж (SDN) та віртуалізації мережних функцій (NFV). У SDN головним функціональним елементом, що управляє, є контролер, що реалізує логіку і протоколи взаємодії. У тому числі такі протоколи, як OF-Config та OpenFlow для керування SDN-комутаторами. У системах віртуалізації функцій мережі таким елементом є оркестратор NFV [21]. У рамках цієї роботи було особливо досліджено питання моніторингу та прогнозування навантаження на контролери Програмно-конфігурованих мереж.

Варто відзначити низку недоліків такої архітектури рішення:

- залежність від апаратної частини контролера SDN;
- залежність від типу та версії ОС, так звана «вендорська голка» від виробника ПЗ та залежних бібліотек та фреймворків;
- залежність від оновлень системних утиліт, які досить часто оновлюються розробниками ОС з метою забезпечення безпеки, стійкості тощо;
- внесення додаткових процесів для процесора АПК контролера SDN;

- складність у переносимості на інші рішення та швидкого розгортання даного моніторингового ПЗ;

- у разі стороннього ПЗ (типу Zabbix і так далі) існує залежність від його функцій в першу чергу, а по-друге, це ПЗ не враховує специфіку роботи контролера SDN. А також, враховуючи вектор розвитку технологій ШІ в системах керування мережами зв'язку, моніторингове ПЗ повинно виконувати вимоги до модулів такого класу службових додатків мереж зв'язку і, зокрема, SDN;

- варто також відзначити, підвищення ймовірності виведення контролера Програмно-конфігурованої мережі з ладу при некоректній роботі даного моніторингового програмного забезпечення, у разі його розміщення на одному рівні з ОС контролера.

В результаті, враховуючи наведені вище недоліки такого методу організації моніторингу контролера Програмно-конфігурованої мережі, існує завдання з розробки нового методу з аналізу та прогнозування навантаження на контролери програмно-конфігурованої мережі. У цій роботі пропонується новий метод моніторингу та прогнозування навантаження на контролер SDN, заснований на проведенні аналітики метаданих лише суми службових потоків, що надходять від комутаторів OpenFlow на контролер Програмно-конфігурованої мережі. Такий метод дозволить вирішити вище озвучені проблеми/недоліки і в тому числі проблему залежності від апаратної частини та операційної системи, на яких розгорнуть контролер програмно-конфігурованої мережі.

Враховуючи особливості одержуваних статистичних даних протоколу OpenFlow, у цій роботі було проведено аналіз існуючих математичних методів прогнозування даних, також проведено багатопараметричний кореляційний аналіз, результат якого показує наявність залежності активності службових потоків протоколу OpenFlow та навантаження апаратної частини контролера SDN. У процесі цієї роботи було також розроблено додатковий програмний модуль до сервера моніторингу та

передиктивного аналізу службових потоків у програмно-конфігурованій мережі, на основі мови програмування Python та відповідних бібліотек обробки даних типу Pandas, NumPy та бібліотек Штучних Нейронних Мереж, типу Tensorflow. Отримані результати підтверджують реалізованість запропонованого методу прогнозування навантаження контролера SDN в мережах зв'язку 5G/IMT-2020 і наступних поколінь мереж зв'язку 2030

3.2 Розробка методу прогнозування навантаження на контролери програмно-конфігурованих мереж на основі технологій штучного інтелекту

До поточного моменту розвитку технологій Програмно-конфігурованих мереж існує чимало робіт, спрямованих на дослідження та розробку різних методів тестування контролера, у тому числі так зване стресове тестування. Як уже було зазначено вище, в даній дисертаційній роботі розглядається можливість реалізації моніторингу навантаження контролера SDN за допомогою моніторингу та інтелектуальної аналітики метаданих лише групи службових потоків OpenFlow. Для перевірки працездатності запропонованого підходу використовувалася модельна програмно-конфігурована мережа, архітектура якої наводилася в першому розділі, з сервісом «Video-on-Demand» на рівні передачі даних мережі SDN.

Аналітична система (далі – службова програма мережі), частиною якої є модуль прогнозування активності службових потоків OpenFlow, розроблена мовою програмування Python у вигляді WEB-сервера, що працює на основі моделі проектування MVC (Model-View-Controller). Дане програмне забезпечення працює поверх північного програмного інтерфейсу API контролера SDN модельної мережі лабораторії.

Як контролер мережі SDN, у даній модельній мережі використовується OpenDaylight Beryllium SR4. Рівень передачі побудований на основі комутаторів Mikrotik з підтримкою протоколу OpenFlow версії 1.0. Загальна архітектура сегмента відображена на рисунку 3.1. На цьому рисунку також, крім

головних елементів модельної мережі, відображені об'єкти дослідження та їх параметри (метадані на основі структури OpenFlow – таблиць).

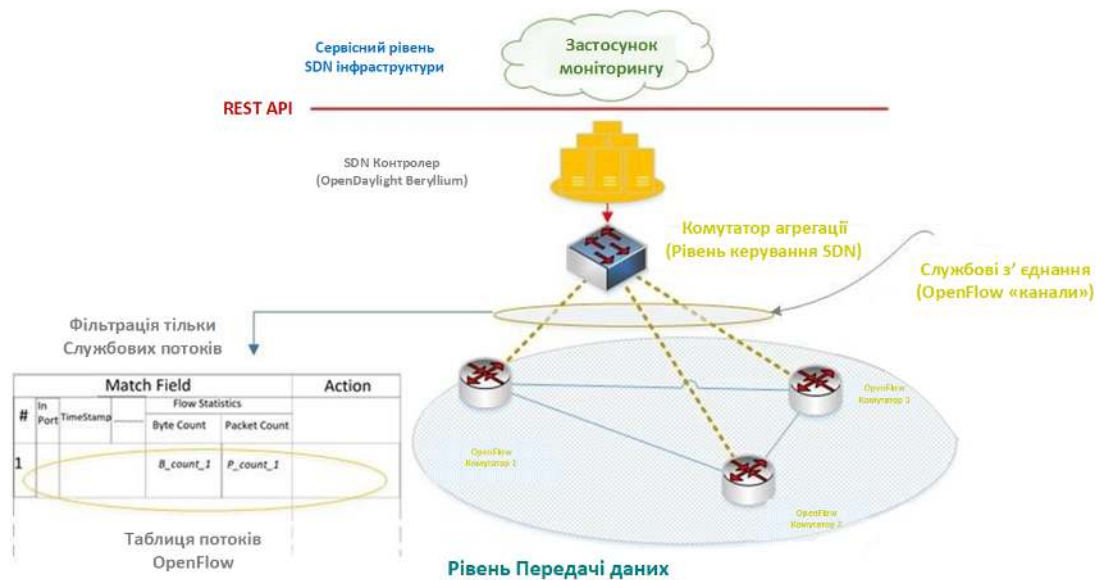


Рисунок 3.1 – Архітектура сегмента з об'єктами дослідження

Для формування досліджуваних наборів даних (з англ. – Data Sets), застосунок моніторингу надсилав REST-запити щосекунди на контролер програмно-конфігурованої мережі через північний API. Наступною стадією була додаткова фільтрація отриманих таблиць потоків таким чином, щоб далі на опрацювання надсилалися дані тільки за службовими потоками OpenFlow. Далі оброблений набір даних проходив необхідну додаткову обробку для формування наборів даних з метою побудови аналітичних моделей, опис яких наведено далі в цій дисертації. яких наведено далі в цій роботі.

В рамках даних досліджень необхідно було спочатку перевірити наявність залежності між активністю потоків OpenFlow (зміни метаданих) та зміною навантаження апаратної частини контролера SDN.

На рисунку 3.2 відображено принципову схему стенду.

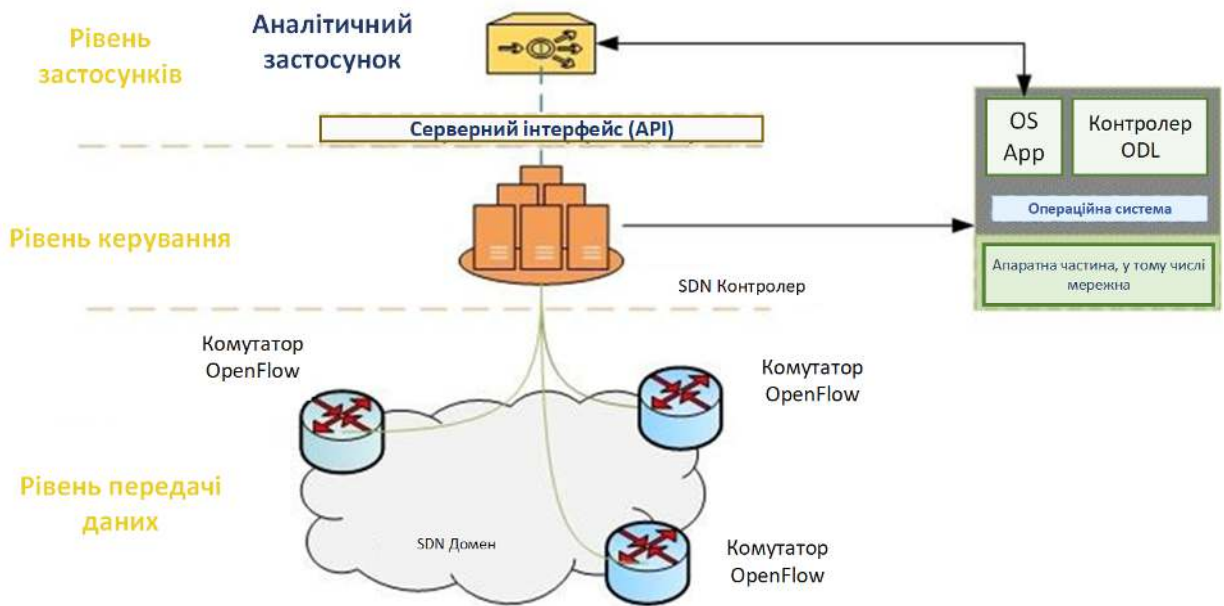


Рисунок 3.2 – Принципова схема стенду

Для перевірки залежності між зміною активності службових потоків OpenFlow (зміни метаданих) та навантаження апаратної частини SDN контролера було розроблено дві програми «OS App» та «Аналітичний додаток». «OS App» – програма-сервер для операційної системи Linux, на якій розгорнуть SDN-контролер OpenDaylight Beryllium SR4. Ця програма запитує значення параметрів апаратної частини (ядра процесора, оперативна пам'ять) в операційній системі Linux Ubuntu через системну утиліту.

Значення показників доступні через REST API цієї програми стороннім програмам по службовій мережі. «Аналітичний додаток» – цей додаток розроблено також у вигляді сервера, але вже працюючого поверх північного інтерфейсу контролера REST API. Ця програма в тому числі запитує значення параметрів у «OS App» через його API по службовій мережі рівня керування, і в кінцевому підсумку формує набір даних параметрів для оцінки їхньої залежності.

Провівши аналіз існуючих математичних методів з метою оцінки залежності між параметрами, було запропоновано використовувати багатопараметричний кореляційний аналіз.

Таким чином, об'єктом дослідження у багатовимірному аналізі є багатовимірна випадкова величина, представлена вибіркою кінцевого обсягу. Варто також відзначити, що параметри, що характеризують об'єкт дослідження, мають різний фізичний зміст, і матриця даних суттєво змінюється, якщо змінюються шкали, в яких вимірюються вибрані параметри. Відповідно, матриця даних приводиться до стандартного вигляду, тобто стандартизуються значення параметрів (варіант). Як зазначалося раніше, стандартизовану матрицю позначатимемо через U .

Матриця X , згідно з рядом параметрів, побудована на основі матриці $DataSet_{ML}$, виглядає так:

$$\begin{array}{cccc}
 & \textit{ByteCount} & \textit{PacketCount} & \textit{CPU} & \textit{RAM} \\
 X = & \begin{array}{c} x_{11} \\ x_{21} \\ x_{31} \\ x_{i1} \end{array} & \begin{array}{c} x_{12} \\ x_{22} \\ x_{32} \\ x_{i2} \end{array} & \begin{array}{c} x_{13} \\ x_{23} \\ x_{33} \\ x_{i3} \end{array} & \begin{array}{c} x_{14} \\ x_{24} \\ x_{34} \\ x_{i4} \end{array} \cdot
 \end{array} \quad (3.1)$$

Перетворення матриці X , сформованої на основі вибраних параметрів (3.1) потоку та додаткових даних про навантаження контролера у відсотковому значенні кожного, до стандартизованої матриці U відбувається так:

За кожним досліджуваним параметром $j = 1, 2, \dots, 4$ обчислюються зважені оцінки за такою формулою:

$$u_{ij} = \frac{(x_{ij} - \mu_1(x_j))}{\sigma(x_j)}, \text{ при } i=1,2, \dots, n; j=1,2, \dots, 4. \quad (3.2)$$

У формулі (3.2) використовуються наступні два параметри, а саме математичне очікування $\mu_1(x_j)$ та дисперсія $\delta^2(x_j)$, які розраховуються за такими формулами:

$$\mu_1(x_j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij}, \quad (3.3)$$

$$\mu_2(x_j) = \sigma^2(x_j) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \mu_1(x_j))^2. \quad (3.4)$$

Таким чином розрахувавши елементи « u_{ij} » складається матриця- U , яка стає наступним об'єктом обробки.

Таким чином, кореляційна залежність визначається різними параметрами, серед яких найбільшого поширення набули показники, що характеризують взаємозв'язок двох випадкових величин (так звані – парні показники):

- кореляційний момент,
- коефіцієнт кореляції.

Оцінка кореляційного моменту (коефіцієнта коваріації) двох варіантів x_j і x_k обчислюється за вихідною матрицею- X :

$$\xi_{jk} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \mu_1(x_j)) - (x_{ik} - \mu_1(x_k)). \quad (3.5)$$

Раніше була згадана так звана функціональна залежність, яка, по суті, відображає зв'язок аналізованої величини з однією або безліччю інших величин, якщо ця величина залежить тільки від цієї множини факторів.

3.3 Застосування штучної нейронної мережі для прогнозування навантаження на контролер SDN

Аналіз актуальності застосування інструментів Штучного Інтелекту в сучасних та перспективних мережах зв'язку був наведений раніше. При

цьому штучна нейронна мережа була запропонована в розробленому методі ідентифікації трафіку в мережах зв'язку на основі метаданих потоків на рівні передачі даних. Останнім часом штучні нейронні мережі досить широко використовуються на вирішення різних завдань із різних галузей життєдіяльності людини. Наприклад, такі завдання, як розпізнавання тексту, мови, прогнозування складних моделей здебільшого на даний момент вирішують за допомогою штучних нейронних мереж, досягаючи при цьому високих результатів.

Широко в побуті використовуються і голосові помічники, які почали становити новий вид інтерфейсу між людиною та ІТ-системою. На даний момент існує великий різновид нейронних мереж. У цій задачі використовується нейронна мережа для прогнозування навантаження.

Архітектура розробленої ШНМ продемонстровано рисунку 3.3.

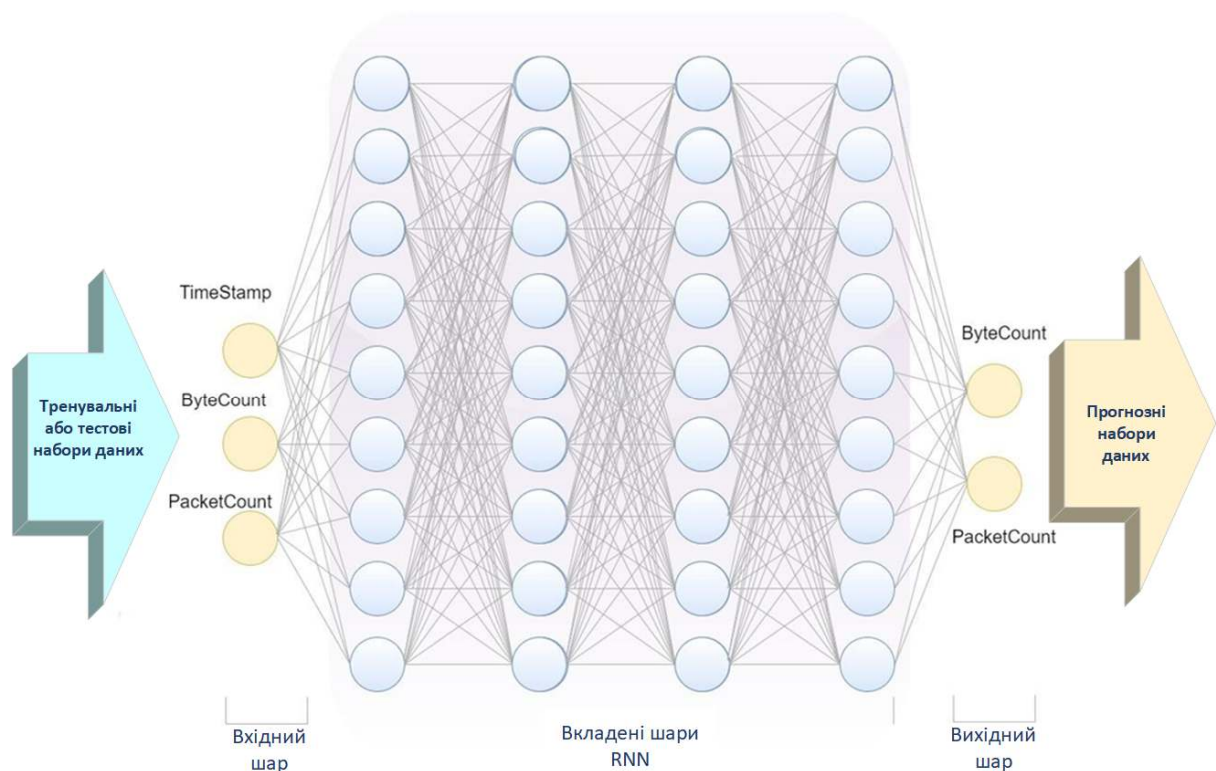


Рисунок 3.3 – Архітектура ШНМ

Робота ШНМ: на вхідний шар нейронів (так звані плейсхолдери) подається потік даних із сформованого $DataSet_{ML}$. Плейсхолдери пов'язані з першим шаром нейронної мережі пов'язаною структурою. Вихідними є два нейрони, які генерують ряд (набір даних) передбачених значень.

Нейронна мережа отримує на вхід дані фіксованої довжини, при цьому початковий набір даних ділиться на сегменти по 200 рядків. Також вихідний набір даних поділяється на два набори даних: навчальний та практичний (тестовий) у співвідношенні 8:2. Архітектура нейронної мережі є повністю рекурентною і містить 4 пов'язаних вкладених рівня нейронів, кожен з яких складається з 10 нейронів.

Практичні випробування запропонованого методу моніторингу та прогнозування навантаження на контролер програмно-конфігурованої мережі розділені на дві стадії.

Першою стадією є проведення дослідження з метою підтвердження встановленої гіпотези щодо прямого впливу активності потоку (зміни метаданих) службових повідомлень OpenFlow на контролер від комутаторів SDN і відповідно на його апаратну частину.

Другою частиною практичних випробувань, при отриманих позитивних результатах першої частини, є розробка та навчання штучної нейронної мережі з метою моніторингу та побудови прогнозів активності службових потоків OpenFlow.

Для розрахунку показників залежності між досліджуваними параметрами було розроблено програмне забезпечення (ПЗ) мовою програмування Python. Дане ПЗ спочатку формує набір даних, структура, після чого здійснює розрахунок відповідних показників.

Як вже було зазначено раніше при обґрунтуванні вибору даного математичного методу, кореляційний момент має певну особливість, а саме залежить від одиниць виміру незалежних величин, що не дає повною мірою оцінити рівень кореляції двох величин.

Для цього початкова матриця приводиться до виду нормованої за формулами, вказаними вище. На основі даної матриці було побудовано також точковий графік розподілу зважених оцінок щодо один одного. Отриманий графік будувався за вибіркою 100 значень із загального набору даних та відображено на рисунку 3.4

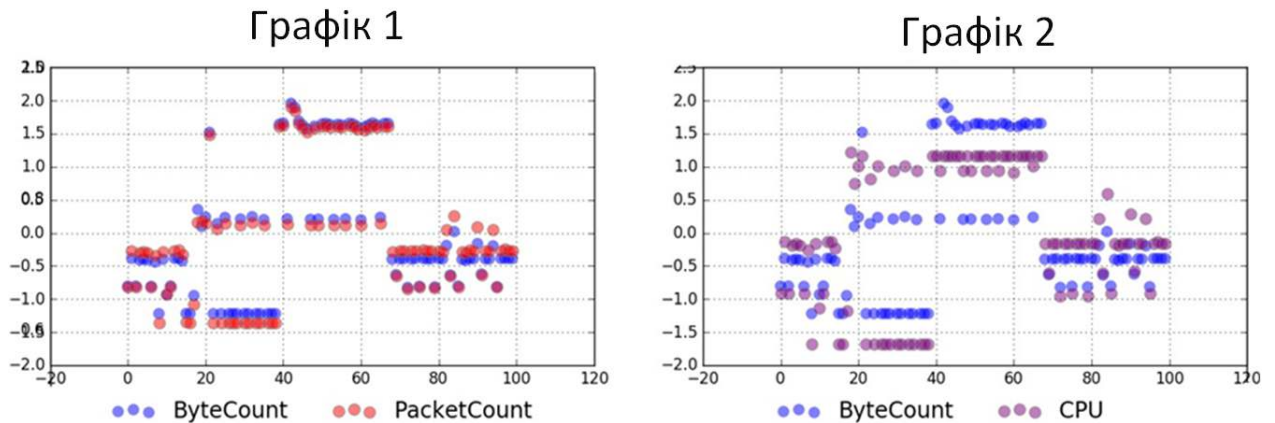


Рисунок 3.4 – Точковий графік розподілу завислих оцінок

На рисунку 3.4 відображені найцікавіші результати щодо взаємозв'язку ByteCount та навантаження CPU. На графіку 1 відображено природну залежність між двома параметрами, які безпосередньо пов'язані, для прикладу оцінки параметрів. На графіку 2 рисунка 3.4 відображено розподіл зважених оцінок вже різних параметрів, які необхідно оцінити з точки зору залежності змін і можна зробити висновок, що згідно з графіком 2 існує залежність між змінами параметра ByteCount суми службових потоків та навантаження на центральний процесор контролера Програмно - мережі, що конфігурується.

Протягом навчання штучної нейронної мережі (оцінки точності прогнозування нейронної мережі), як параметр оцінки роботи, спостерігався параметр MSE – Mean Square Error (з англ. середньоквадратична помилка). Зміна значення параметра MSE наведена на рисунку 3.5.

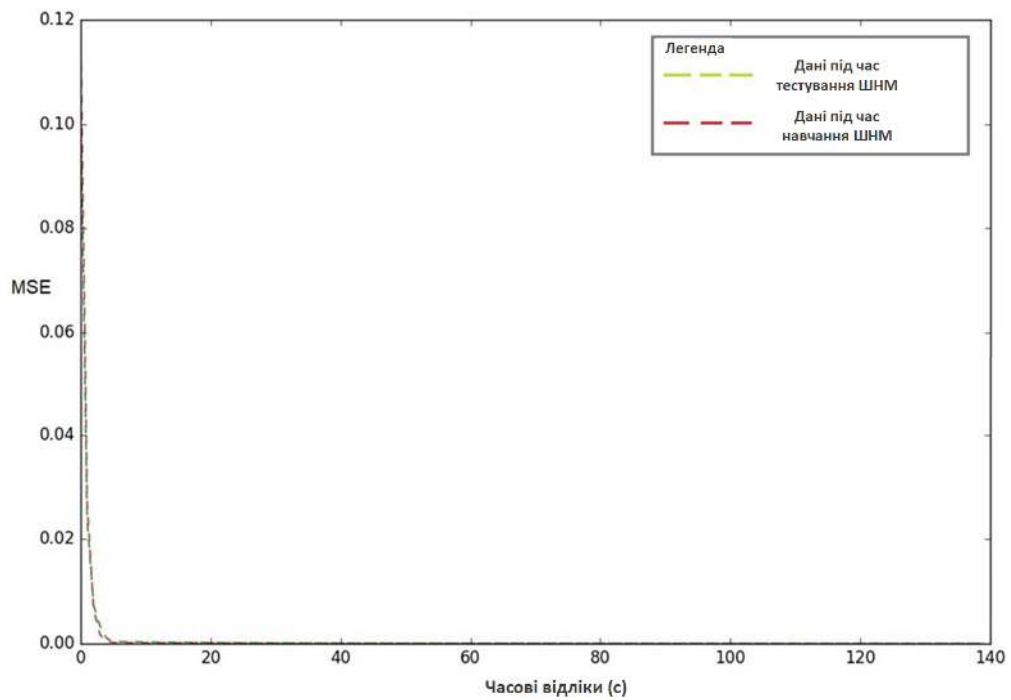


Рисунок 3.5 – Процес навчання та тестування ШНМ

На графіку рисунку 3.5 наведено два графіки, які йдуть близько один до одного. Червоною пунктирною лінією відображається зміна параметра MSE під час роботи мережі на навчальному наборі даних, зеленим відображається зміна параметра MSE на робочому (реальному) наборі даних.

За графіком видно, що обрана архітектура та параметри нейронної мережі задовольняють формування прогнозування навантаження.

Також, у процесі навчання нейронної мережі, відстежувався процес навчання на формування прогнозів. Для наочності процесу будувався графік реальних і спрогнозованих значень нейронної мережі на проміжку даних у 20 тис. відліків. На рисунку 3.6 наведено кілька знімків екрана в процесі навчання нейронної мережі, що відображають її прогрес.

У кожній з областей (графіки №1,2,3,4), наведених на рисунку 3.6, є два графіки синього та зеленого кольору, що відображають реальні значення та спрогнозовані.

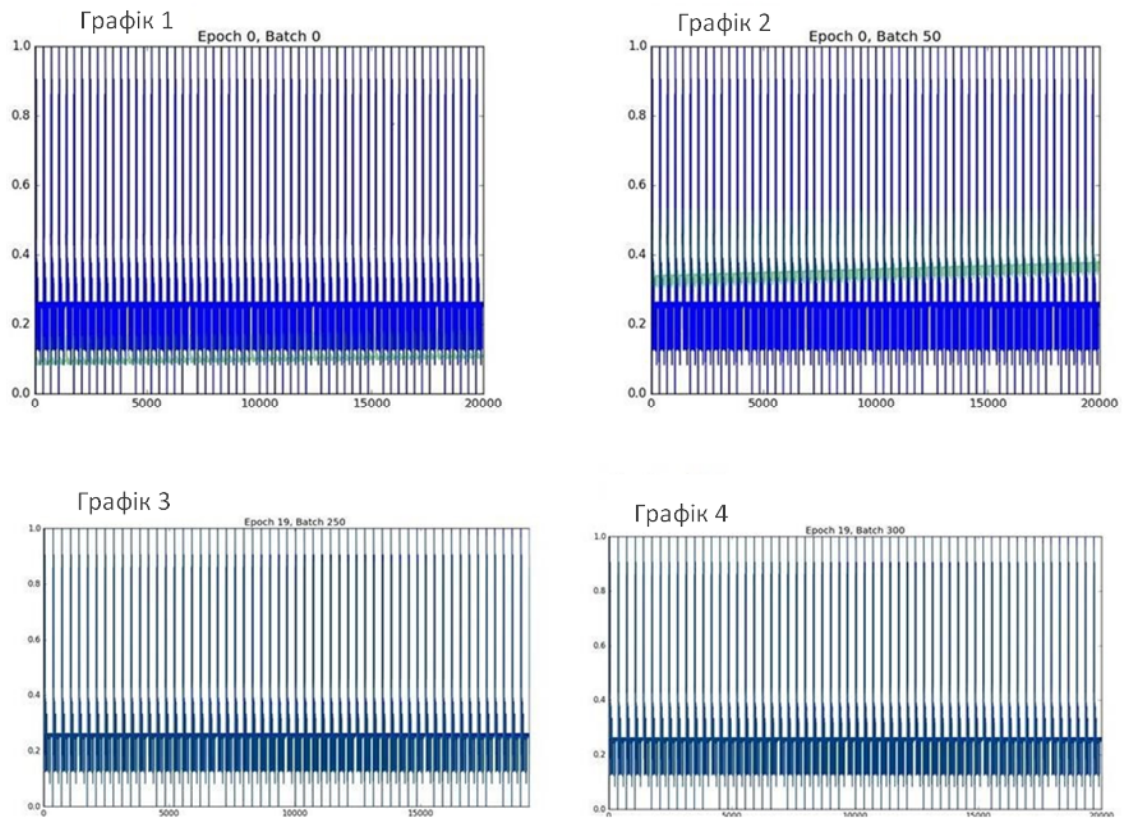


Рисунок 3.6 – Процес навчання штучної нейронної мережі

Графік №1 на першій лінії рисунку 3.6 з підписом (Epoch 0, Batch 0) відображає реальний та перший прогноз. На графіку видно, що спрогнозовані значення дуже відрізняються від реальних. Тобто графік зеленого кольору сильно нижчий від основного – синього графіка.

Правий графік №2 на першій лінії рисунку 3.6 з підписом (Epoch 0, Batch 50) відображає наступний прогноз нейронної мережі після першого (графік №1). За графіком видно (зелений), що тепер спрогнозовані значення перевищують реальні, при цьому графік досить завищений.

Нижні два графіки (графік №3 та графік №4), з підписами (Epoch 19, Batch 250), (Epoch 19, Batch 300) відповідно відображають останні кроки навчання мережі. За даними графіками видно, що Штучна Нейронна Мережа навчилася і тепер може коректно прогнозувати активність суми службових потоків OpenFlow в реальній програмно-конфігурованій мережі на рівні

керування. Видно, що на останньому (нижньому правому графіку №4) реальний графік візуально збігається з прогнозованим.

В результаті після того, як штучна нейронна мережа навчилася, програмне забезпечення зберігає її стан архітектури та параметрів так, щоб з іншого програмного модуля сервера «Аналітична програма» було можливо завантажити її стан. Далі, програмний модуль, який завантажить стан навченої нейронної мережі зможе формувати прогнозні дані на тестові дані, що надходять, які ШНМ отримує на вхідні нейрони (плейсхолдери).

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі було отримано такі основні результати.

Було проведено аналіз концепцій сучасних та перспективних мереж зв'язку, у тому числі з огляду на довгострокові до 2030 року перспективи. Було встановлено, що мережі 5G/IMT-2020 та наступного покоління – мережі зв'язку 2030, мають такі нові характеристики, як «ультрамалі затримки», «Наднадійний зв'язок», «Надщільні мережі», що потребує розробки нових методів їх побудови.

Так як визначено необхідність забезпечення в характеристиках, потрібно розглянути нові технології та методи побудови мереж зв'язку та надання послуг, таких як: Програмно-конфігуровані мережі, Віртуалізація мережних функцій, граничні обчислення з множинним доступом (MEC). підхід.

Методи та технології побудови мереж зв'язку п'ятого та наступних поколінь, потрібна зміна принципів керування мережею та послугами через застосування технологій Штучного Інтелекту. У цьому напрямку встановлено, що особливо актуальними питаннями є: однозначна ідентифікація трафіку на рівні передачі даних, прогнозування даного трафіку, прогнозування навантаження на контролери Програмно-конфігурованих мереж, та ефективний розподіл обчислень на рівні глибоко інтегрованої туманної інфраструктури та прикордонних обчислень з множинним доступом. У цій роботі запропоновано методи з ідентифікації трафіку на основі метаданих потоків у SDN-мережах, прогнозування навантаження на контролери, ґрунтуючись на принципі аналітики метаданих та інструментів ШІ, а також запропоновано структуру взаємодії інтегрованих туманних та граничних обчислень за допомогою мікросервісних послуг.

Було встановлено, що мережі зв'язку з ультрамалими затримками та вимоги до них формують вектор розвитку мереж та послуг у бік їхньої децентралізації.

У роботі на основі можливостей програмованості SDN-мереж та функціональних можливостей протоколу OpenFlow був розроблений та запропонований метод ідентифікації трафіку в мережах зв'язку на основі метаданих потоків та інструменту ШІ – штучної нейронної мережі.

Для запропонованого методу на базі модельної SDN мережі лабораторії «Програмно-конфігурованих мереж» було проведено навчання ШІМ та подальше тестування. Результат тестування показав працездатність розробленого методу факту ідентифікації трафіку, що дозволяє виключити внесення додаткових затримок і зміна структури потоків лише на рівні передачі.

Було запропоновано структуру/фреймворк взаємодії розподілених туманних обчислень та прикордонних обчислень за допомогою мікросервісних послуг.

В результаті було запропоновано метод моніторингу та навантаження контролерів Програмно-конфігурованих мереж шляхом аналітики метаданих суми службових потоків OpenFlow рівня керування. З метою підтвердження гіпотези щодо можливості прогнозування навантаження на основі принципу аналітики метаданих було запропоновано метод перевірки через застосування багатопараметричного кореляційного аналізу.

Було порушено питання впровадження технологій Штучного Інтелекту, з метою забезпечення нових вимог до сучасних та перспективних послуг зв'язку, що з'явилися свого часу на основі технологій Інтернету Речей. Особливо було звернено увагу на мережі зв'язку з ультрамалими затримками, які на даний момент задають вектор розвитку мереж зв'язку, і можливість реалізації через планомірне впровадження функцій Штучного Інтелекту в мережі зв'язку. В результаті можна зробити висновок, що в процесі вирішення завдань моніторингу та керування в сучасних та перспективних

мережах зв'язку можна дійти єдиного, інтелектуального ядру мережі, яке, у свою чергу, підлаштовуватиметься та змінюватись самостійно, без втручання адміністраторів, для відповідного трафіку, послуги. Варто також звернути увагу на необхідність вибудовувати розподілений Штучний Інтелект у мережах зв'язку для забезпечення більш ефективного використання обчислювальних ресурсів та забезпечення стійкості керуючих систем.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Draft ITU-T Recommendation: Framework for IMT-2020 network architecture (O-043).
2. Mah Daniel C.H. Role of Satellite in 5G. SAS, Satellite Connectivity Workshop, Nadi, Fuji, 24 April 2017.
3. Zeng, Q.A.; Agrawal, D. P. Modeling of handoffs and performance analysis of wireless data networks, International Conference on Parallel Processing Workshops.2011.P.491-496.
4. Rejeba, S. B.; Nasser, N.; Tabbane, S/ A novel resource allocation scheme for LTE network in the presence of mobility, Journal of Network and Computer Applications, Elsevier.2014.Vol 46.P.352-361
5. Recommendation M.2083-0 IMT-Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond. ITU-R, Geneva. – 2015
6. Recommendation Y.3300 Framework of Software-defined networking. ITU-T, Geneva. – June 2014.
7. Kirsal-Ever, and all. Analytical Modelling and Performability Evaluation of Multi-Channel WLANs with Global Failures, International Journal of Computers Communications and Control. 2015.Vol.10. P.551-566.
8. Ghosh, A.; Paranthaman, V.; Mapp, G.; Gemikonakli, O.; Loo, J Enabling Seamless V2I Communications: Towards Developing Cooperative Automotive Applications in VANET Systems, IEEE Communications Magazine, Special Issue on Towards Autonomous Driving: Advances in V2X Connectivity, 2015. Vol.5. P.80-86
9. Recommendation Y.2060/Y.4000. Overview of Internet of Things. ITU-T, Geneva. – February 2012.
10. Остапчук, Владислав, et al. " Методи машинного навчання у хмарних платформах для забезпечення ефективної передачі даних." InterConf

(2023): 108-117.

11. Trivedi, K.S.; Dharmaraja, S.; Ma, X.. Analytic modelling of handoffs in wireless cellular networks, *Information Sciences*. 2002. Vol.148. P.155-166.

12. Technical Specification ETSI TS 123 01 v16.6.0 Release 16. 5G. System architecture for the 5G System (5GS). ETSI, France. – October 2020.

13. Russell, S., Norvig, P.: ‘Artificial Intelligence (A Modern Approach)’. 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall, 1995. 1152 p

14. Huawei’s Global Industry Vision (Report GIV 2025).

15. Mohammadi, M., Al-Fuqaha, A., Sorour, S. Guizani, M.: ‘Deep Learning for IoT Big Data and Streaming Analytics: A Survey’, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2020.

16. Tang, T., Zaidi, S.A.R., McLernon, D., Mhamdi, L. Ghogho, M.: ‘Deep Recurrent Neural Network for Intrusion Detection in SDN-based Networks’. In 2018 IEEE International Conference on Network Softwarization. Montreal, Canada, Jun 2018.

17. Fan, Z., Xiao, Y., Nayak, A., Tan, C.: ‘An improved network security situation assessment approach in software defined networks’, *Peer-to-Peer Networking and Applications*, 2017.

18. . Tran T.X. Collaborative mobile edge computing in 5G networks: New paradigms, scenarios, and challenges. Hajisami, A., Pompili, D. *IEEE Communications Magazine*. 2017. P.54–61. doi:10.1109/MCOM.2017.1600863

19. Khan, S.S., Ahmad, A.: ‘Cluster center initialization algorithm for K-means clustering’, *Pattern recognition letters*. 2004. Vol 25. P. 1293-1302.

20. Watkins, C.J., Dayan, P.: ‘Q-learning’, *Machine learning*. 1992. Vol.8. P. 279-292.

21. S. Zhongfu and Y.S.D. Keming, Development Trend of Internet of Things and Perspective of Its Application in Agriculture, *Agriculture Network Information*,. 2010. Vol. 5.P. 5-8.