

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ «КИЇВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»**

Кваліфікаційна наукова

праця на правах рукопису

РОМАНОВА ТОНІ ОЛЕКСАНДРІВНА

УДК 621.39:004.72(656.7)

ДИСЕРТАЦІЯ

**МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ
МЕРЕЖІ ДЛЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПОВІТРЯНИМ
РУХОМ НА БАЗІ ТЕХНОЛОГІЙ SDN ТА NFV**

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Галузь знань 17 «Електроніка та телекомунікації»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____Т.О.Романова

Науковий керівник:

Конахович Георгій Філімонович,

доктор технічних наук , професор кафедри
телекомунікаційних та радіоелектронних систем ДУ «КАІ»

Київ – 2026

АНОТАЦІЯ

Романова Т.О. Підвищення ефективності функціонування мережі системи управління повітряним рухом на базі технологій SDN/NFV - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації» за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка». – Державний університет «Київський авіаційний інститут» Міністерства освіти і науки України. - Київ, 2026.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню та розв’язанню актуальної задачі підвищення ефективності функціонування мережі системи управління повітряним рухом на рівні аеропорту шляхом упровадження технологій програмно-керованих мереж SDN та віртуалізації мережевих функцій NFV, а також удосконалення методів передавання критичних даних у підсистемах повітряного спостереження типу SSR.

В рамках дослідження проведено аналіз сучасного стану системи управління повітряним рухом і типової СУПР на рівні аеропорту, зокрема її структури, архітектурних складових і ключових функціональних елементів; конкретизовано диспетчерські функції та взаємодію із суміжними центрами, сформульовано вимоги міжнародних стандартів до якості функціонування мережевих і комунікаційних сервісів. Традиційна телекомунікаційна мережа аеропорту історично формувалася як сукупність відокремлених підсистем із різними технологіями та різними підходами експлуатаційного керування, що ускладнює масштабування, централізоване застосування політик, оперативну оптимізацію QoS та швидке відновлення після інцидентів. Обґрунтовано, що пріоритетним напрямом модернізації є виокремлення рівня керування у централізований SDN-контролер і використання NFV для розгортання ключових сервісів на стандартній обчислювальній інфраструктурі з забезпеченням керованої сумісності з традиційними підходами TMN/OSS.

Запропоновано метод побудови мережі управління повітряним рухом аеропорту з використанням SDN/NFV та виконано оцінювання показників її функціонування. Проведено огляд архітектури SDN та обґрунтовано вибір відкритої

мережевої операційної системи ONOS як базового компонента керування SDN-мережею. З урахуванням вимог критичної інфраструктури формалізовано інтеграцію SDN-керування з TMN/OSS через відповідні функціональні блоки та модель стикування SDN-контролера з TMN-оточенням.

Розроблено пропозиції щодо підвищення ефективності локальних мереж доступу LAN_{ACCES} і базових мереж WAN_{CORE} за практично значущими критеріями (затримка та фактична швидкість передавання корисних даних) з урахуванням технологій побудови мережі та режимів навантаження.

Запропоновано удосконалені методи оцінювання та прогнозування часу затримки в обслуговуванні для локальних мереж LAN_{ACCES} на базі різновидів технології Ethernet (комутований режим, CSMA/CD, МЦУС), а також для мереж кільцевої структури типу FDDI. Передбачено використання SDN-контролера для оперативної зміни алгоритму обслуговування та політик маршрутизації залежно від поточної ситуації в мережі, що забезпечує гнучке реагування на перевантаження та відмови.

Розроблено модель ефективної швидкості передавання радіолокаційної інформації з урахуванням параметрів каналу, пакетизації та повторних запитів, отримано закономірності впливу групування помилок, потенційної швидкості та числа повторів на оптимум і сформульовано принципи узгодженого багатопараметричного адаптивного керування, яке може бути реалізоване як програмно-керована функція в модернізованій інфраструктурі СУПР.

Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності функціонування телекомунікаційної інфраструктури аеропорту в процесі управління повітряним рухом.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі вирішуються наступні завдання: аналіз сучасного стан системи управління повітряним рухом, принципів побудови структури сучасного аеропорту та вимоги міжнародних стандартів до якості функціонування; визначити обмеження традиційної телекомунікаційної архітектури і розробити пропозиції щодо підвищення якості функціонування телекомунікаційної мережі аеропорту на базі технологій SDN/NFV;

визначити можливу типову структуру локальних і базових мереж аеропорту та розробити пропозиції щодо підвищення якості функціонування за показниками часу затримки і пропускної спроможності; удосконалити алгоритм взаємодії радіолокаційних систем повітряного спостереження з повітряним транспортом з метою підвищення якості обслуговування і пропускної спроможності каналів.

У першому розділі виконано аналіз сучасного стану загальної системи управління повітряним рухом, типової СУПР на рівні аеропорту, зокрема її структури, архітектурних складових і ключових функціональних елементів; розглянуто типову мережу, систему зв'язку та телекомунікацій аеропорту, конкретизовано диспетчерські функції та взаємодію із суміжними центрами, сформульовано ключові вимоги до сервісів зв'язку та мережевих сервісів, визначено основні структурні обмеження й напрями модернізації, включно з потенціалом SDN/NFV.

У другому розділі запропоновано метод побудови мережі управління повітряним рухом аеропорту з використанням технологій SDN/NFV та виконано оцінку показників її функціонування; розглянуто архітектуру SDN і ONOS, а також обґрунтовано необхідність керованої інтеграції SDN-керування з TMN/OSS. На цій основі запропоновано метод підвищення ефективності функціонування мережі СУПРА за показником затримки даних, виконано формалізацію моделі телекомунікаційної системи, проаналізовано технології побудови LAN_{ACCES} та WAN_{CORE} і запропоновано удосконалений метод оцінювання часу затримки на рівні LAN_{ACCES} для подальшої верифікації результатів у наступних розділах.

Третій розділ присвячено розв'язанню задачі підвищення ефективності передавання критичних даних повітряного спостереження в допитних радіолокаційних системах спостереження SSR як складової модернізації СУПР на основі SDN/NFV. Запропоновано формалізацію допитної РЛС як асинхронної двоканальної системи, отримано модель ефективної швидкості передавання з урахуванням пакетизації та повторів, визначено умови оптимізації довжини інформаційного пакета та правила адаптивного налаштування параметрів для підвищення ефективної пропускної здатності та стійкості передавання.

Четвертий розділ присвячено імітаційному моделюванню та оцінці ефективності запропонованих рішень шляхом моделювання мережі аеропорту з використанням SDN/NFV у Mininet. Побудовано модель мережі з ONOS-кластером та OpenFlow-комутаторами, проведено серію експериментів у режимах нормального функціонування, відмов контролера, перевантаження і виходу з ладу мережевих елементів, отримані результати використано для порівняння з традиційною мережевою архітектурою і підтвердження коректності запропонованих моделей та методів.

У дисертаційній роботі здобуто такі нові наукові результати.

1. Вперше запропоновано метод управління обслуговуванням навантаження в базовій мережі WAN_{CORE} аеропорту з кільцевою топологією на основі SDN/NFV, який на відміну від існуючих підходів забезпечує оптимізацію співвідношення надійності та затримки обслуговування, передбачає формалізований метод оцінювання часу затримки в мережах типу FDDI залежно від рівня навантаження, реалізує прогнозування часу обслуговування в реальному масштабі часу та використовує SDN-контролер для динамічної адаптації алгоритмів обслуговування відповідно до поточного стану мережі.

2. Удосконалено метод обслуговування навантаження в локальних мережах LAN_{ACCES} аеропорту, побудованих на базі різновидів технології Ethernet із використанням SDN/NFV, який, на відміну від існуючих підходів, забезпечує адаптивне управління параметрами обслуговування шляхом оцінювання часу затримки в мережах різних типів (комутованих, CSMA/CD, МЦУС) залежно від рівня навантаження, реалізації прогнозування часу обслуговування та застосування SDN-контролера для оперативної зміни алгоритмів функціонування відповідно до поточного стану мережі.

3. Удосконалено метод адаптивного керування потоками даних у радіолокаційних каналах повітряного спостереження, який, на відміну від відомих рішень, базується на оптимізації довжини пакета, що визначається розробленою моделлю залежності оптимальної довжини пакета від параметрів каналу зв'язку в системах типу SSR, та передбачає прогнозування параметрів обслуговування і використання SDN-контролера для динамічної зміни алгоритмів керування залежно від ситуації в мережі.

4. Отримали подальший розвиток методи підвищення ефективності функціонування мереж аеропортового рівня, що ґрунтуються на інтеграції підходів адаптивного управління навантаженням, прогнозування параметрів обслуговування та використання технологій SDN/NFV для забезпечення гнучкості, масштабованості та надійності мережевої інфраструктури.

Практичне значення отриманих результатів Практичне значення роботи полягає у можливості використання її результатів під час проектування мережевої інфраструктури аеропортів і суміжної критичної інфраструктури. А також при побудові мереж з централізованим керуванням на основі SDN із застосуванням NFV в інших галузях економіки, здатних збільшити економічну ефективність підприємств.

Результати досліджень упроваджено в навчальний процес кафедри телекомунікаційних та радіоелектронних систем Факультету аеронавігації, електроніки та телекомунікацій Державного університету «Київський авіаційний інститут» (акт про впровадження від 24.03.2026).

Отримані в дисертаційній роботі наукові результати були використані в науково-дослідній роботі НДР № 0122U001804 «Методи підвищення експлуатаційної ефективності телекомунікаційних та радіоелектронних систем об'єктів критично важливої інфраструктури України»

Ключові слова: мережа управління повітряним рухом аеропорту, телекомунікаційна система, віртуалізація мережевих функцій, проєкти з відкритим вихідним кодом, програмно-керовані мережі, вейвлет-перетворення, SDN, контролер, ONOS, інтеграція з традиційними системами управління TMN/OSS, локальні мережі доступу LAN, базові мережі WAN, радіолокаційні системи повітряного спостереження, QoS, вторинний радар повітряного спостереження.

ABSTRACT

Romanova T.O. Enhancing the efficiency of the airport air-traffic management system network based on SDN/NFV technologies – qualifying scientific work, manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in the field of knowledge 17 “Electronics and Telecommunications”, specialty 172 “Telecommunications and Radio Engineering”. State University “Kyiv Aviation Institute” of the Ministry of Education and Science of Ukraine. – Kyiv, 2026.

The dissertation is devoted to researching and solving the pressing problem of improving the efficiency of the air-traffic management system ATMS network at the airport level through the implementation of Software-Defined Networking and Network Functions Virtualization technologies, as well as by improving methods for transmitting critical data in secondary surveillance radar subsystems.

As part of the research, the current state of the air-traffic management system and a typical airport-level ATMS were analyzed, including its structure, architectural components, and key functional elements; air-traffic controller functions and interaction with adjacent centers were specified; and the requirements of international standards for the quality of network and communication services were formulated. Historically, an airport telecommunication network was formed as a set of isolated subsystems built on different technologies and maintained using different operational-management approaches, which complicates scalability, centralized policy enforcement, prompt QoS optimization, and rapid recovery after incidents. It is substantiated that a priority direction of modernization is the separation of the control plane into a centralized SDN controller and the use of NFV to deploy key services on standard computing infrastructure while ensuring managed compatibility with traditional TMN/OSS approaches.

A method for building an airport air-traffic management network using SDN/NFV is proposed, and the performance indicators of its operation are evaluated. The SDN architecture is reviewed and the choice of the open Network Operating System (ONOS) as the core component for SDN network control is justified. Considering critical-infrastructure

requirements, the integration of SDN control with TMN/OSS is formalized through appropriate functional blocks and a model of interfacing the SDN controller with the TMN environment.

Proposals are developed to improve the efficiency of local access networks (LANACCES) and backbone/core networks (WANCORE) according to practically significant criteria (latency and effective useful-data throughput), taking into account network-building technologies and load regimes.

Improved methods are proposed for estimating and forecasting service delay time for LANACCES local networks based on variants of Ethernet technology (switched mode, CSMA/CD, and demand-priority access), as well as for ring networks of the FDDI-type. The use of an SDN controller is envisaged for promptly changing the service algorithm and routing policies depending on the current network situation, which ensures flexible response to congestion and failures.

A model of the effective transmission rate of radar information is developed, taking into account channel parameters, packetization, and retransmission requests; regularities of the influence of error burstiness, potential data rate, and the number of retransmissions on the optimum are obtained; and principles of coordinated multi-parameter adaptive control are formulated. Such control can be implemented as a software-defined function within a modernized ATMS infrastructure.

The thesis aims of the dissertation is to improve the efficiency of the airport telecommunication infrastructure in the air-traffic management process.

To achieve the set goal, the following tasks are solved in the thesis: to analyze the current state of the air-traffic management system, the principles of building the structure of a modern airport, and the requirements of international standards for the quality of operation; to identify the limitations of the traditional telecommunication architecture and develop proposals to improve the quality of operation of the airport telecommunication network based on SDN/NFV technologies; to determine a possible typical structure of the airport local and core networks and develop proposals to improve the quality of operation in terms of delay time and throughput; to improve the interaction algorithm of radar air-surveillance systems with air transport in order to enhance service quality and channel throughput.

In the first chapter, the current state of the overall air-traffic management system and a typical airport-level ATMS are analyzed, including its structure, architectural components, and key functional elements; the typical airport network and its communication and telecommunication systems are considered; controller functions and interaction with adjacent centers are specified; key requirements for communication and network services are formulated; and the main structural limitations and modernization directions are identified, including the potential of SDN/NFV.

In the second chapter, a method for building an airport air-traffic management network using SDN/NFV technologies is proposed and the performance indicators of its operation are assessed; the SDN architecture and ONOS are considered, and the need for managed integration of SDN control with TMN/OSS is justified. On this basis, a method is proposed to improve the efficiency of the ATMS network by reducing data latency; the model of the telecommunication system is formalized; LANACCES and WANCORE construction technologies are analyzed; and an improved method for estimating delay time at the LANACCES level is proposed for subsequent verification of the results in the following chapters.

The third chapter is devoted to solving the problem of improving the efficiency of transmitting critical air-surveillance data in interrogator SSR systems as part of ATMS modernization based on SDN/NFV. The formalization of an interrogator radar as an asynchronous two-channel system is proposed; a model of effective transmission rate considering packetization and retransmissions is obtained; conditions for optimizing the length of the information packet and rules for adaptive parameter tuning are determined to increase effective throughput and transmission robustness.

The fourth chapter is devoted to simulation modeling and evaluating the effectiveness of the proposed solutions by modeling an airport network using SDN/NFV in Mininet. A network model with an ONOS cluster and OpenFlow switches is built; a series of experiments is conducted under normal operation, controller failure, congestion, and network-element outages; the results are used for comparison with a traditional network architecture and for confirming the correctness of the proposed models and methods.

The dissertation obtains the following new scientific results.

1. For the first time, a method for managing traffic in the WANCORE core network of an airport with a ring topology based on SDN/NFV is proposed, unlike existing approaches, this method optimizes the trade-off between reliability and latency, provides a formalized method for estimating delay times in FDDI-type networks depending on the load level, implements real-time service time prediction, and uses an SDN controller to dynamically adapt service algorithms according to the current network state.

2. An improved method for load management in LANACCES local area networks at airports, built on variants of Ethernet technology using SDN/NFV, which, unlike existing approaches, ensures adaptive control of service parameters by evaluating latency in networks of various types depending on the load level, implementing service time prediction, and using an SDN controller to dynamically change operating algorithms in accordance with the current network state.

3. An improved method for adaptive data flow control in air surveillance radar channels has been developed, unlike existing solutions, this method is based on optimizing packet length, which is determined by a model describing the relationship between the optimal packet length and communication channel parameters in SSR-type systems, and involves predicting service parameters and using an SDN controller to dynamically change control algorithms depending on the network situation.

4. Methods for improving the efficiency of airport-level networks have been further developed, based on the integration of adaptive load management approaches, service parameter forecasting, and the use of SDN/NFV technologies to ensure the flexibility, scalability, and reliability of the network infrastructure.

The practical significance of the obtained results of this work lies in the possibility of applying its results when designing network infrastructure for airports and related critical infrastructure. It also applies to the construction of centrally managed networks based on SDN with the use of NFV in other sectors of the economy, which can enhance the economic efficiency of enterprises.

The research results have been implemented into the educational process of the Department of Telecommunications and Radio-Electronic Systems at the Faculty of Air

Navigation, Electronics, and Telecommunications of the State University “Kyiv Aviation Institute” (implementation act dated March 24, 2026).

The scientific results obtained in the dissertation were used in the scientific research work № 0122U001804, “Methods for Improving the Operational Efficiency of Telecommunications and Radio-Electronic Systems of Ukraine’s Critical Infrastructure Facilities.”

Keywords: airport air traffic management network, telecommunication system, network function virtualization, open-source projects, software-defined networking, wavelet transform, SDN controller, ONOS, integration with traditional TMN/OSS management systems, local area networks, wide area networks, air surveillance radar systems, QoS, secondary surveillance radar.

Список публікацій здобувача за темою дисертації

1. Г. Конахович, А.О. Романов. Модель взаємодії плоскості управління мережі SDN з системами управління мережами згідно концепції TMN. Наукоємні технології, Т.67, Вип. №3 2025, с.350-359. DOI: 10.18372/2310-5461.67.20243.
2. O. Romanov, V. Mankivskyi, A. Romanov, M. Nesterenko, O. Pidpaly. Performance Assessing of Dynamic Scaling of Containerized Applications When Using Kubernetes Cluster Autoscaler and Auto Scaling Group Together. International Scientific and Technical Conference - Modern Challenges in Telecommunications, MCT 2024. 29 July 2025. P.111-136. DOI: 10.1007/978-3-031-94799-5_7. ISSN: 2367-3370.
3. I. Svyd, I. Obod, A.O. Romanov, O. Vorgul M., Romanov A, Ashish Yadav & Haider T.H. Salim ALRikabi. A model for optimization packet length in airspace surveillance systems. International Conference on Applied Innovations in IT, Springer, Cham 12th, 18 April 2025, P. 501-518. DOI: 10.1007/978-3-031-89296-7_25. ISSN: 2367-3370.
4. I. Svyd, I. Obod, A.O. Romanov, O. Vorgul M., Romanov A, Ashish Yadav & Haider T.H. Salim ALRikabi. Using the interstage data processing method to improve the efficiency of airspace surveillance systems. International Conference on Applied Innovations in IT, Springer, Cham 12th, 18 April 2025, P. 519-535. DOI: 10.1007/978-3-031-89296-7_26. ISSN: 2367-3370.
5. Romanov O., Mankivskyi V., Skulysh M., Globa L, Romanov A. Enhancing Resource Availability: Indicators and Strategies for Optimizing the Kubernetes Network. 22nd International Scientific and practical conference information and communication technologies and sustainable development, 2023, P. 18-41. DOI: 10.1007/978-3-031-46880-3_2. ISSN 23673370. ISBN 978-303146879-7.
6. Романов О.І., Свид І.В., Корнієнко Н.І., Романов А.О. Управління оптичною мережею контролером SDN на базі ONOS. Радіотехніка. 2022. № 210. С.184-192. DOI:10.30837/rt.2022.3.210.16.

Матеріали доповідей, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

1. Романов А.О., Кравченко А.В. Дослідження швидкості навчання нейронних мереж в залежності від функції активації. Міжнародна науково-технічна конференція «ПТ-25», 26 червня 2025 р., С. 136-138.
2. Романов А.О., Бушинський Д. Проблеми впровадження технології Li-Fi В мережі IOT. Міжнародна науково-технічна конференція «ПТ-25», 26 червня 2025 р., С. 139-142.
3. Романов А.О., Бушинський Д. Проблеми аналізу трафіку в мережі IOT з технологією LI-FI. Міжнародна науково-технічна конференція «ПТ-24», С.68-70.
4. Маньківський В.Б., Конахович Г.Ф., Романов А.О. Додатковий механізм мережевої взаємодії в KUBERNETES. XVII міжнародна науково-технічна конференція «Перспективи телекомунікацій», Київ, 2023 р., С 109-111.
5. I. Svyd, I. Obod, O. Vorgul, A. Romanov. Optimization of Data Transmission Packet Length in Secondary Radar Systems IEEE International conference on information and telecommunication technologies and radio Electronics, Kyiv, 2023. P. 166-170. DOI:10.1109/UkrMiCo61577.2023.10380404. ISBN: 979-835034848-4.
6. Романов А., Корнієнко Н. Побудова інформаційної моделі транспортної мережі SDN з використанням інтерфейсу T-API. XVI міжнародна науково-технічна конференція «Перспективи телекомунікацій», Київ, 2022 р., С.91-93.
7. Конахович Г.Ф., Романов А.О., Романов М.О. Аналіз технологій віртуалізації в телекомунікаціях. Проблеми експлуатації та захисту інформаційно-комунікаційних систем, м. Київ, 7-9 червня 2022 р., НАУ, К. С.96-98.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	18
ВСТУП.....	20
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ПОБУДОВИ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПОВІТРЯНИМ РУХОМ.....	28
1.1 Аналіз глобальної системи управління повітряним рухом, її призначення, структура, та вимоги до неї.....	28
1.1.1 Аналіз процесу функціонування системи управління повітряним рухом.....	29
1.1.2 Загальна структура СУПР та її основні рівні.....	31
1.1.3 Основні елементи системи управління повітряним рухом.....	32
1.1.4 Основні вимоги до системи управління повітряним рухом.....	35
1.2 Аналіз типової системи управління повітряним рухом на рівні аеропорту, згідно міжнародної системи стандартів.....	37
1.2.1 Система УПР на рівні аеропорту.....	37
1.2.2 Структура диспетчерської служби в аеропорті.....	39
1.2.3 Основні елементи СУПРА, їх складові та взаємодія між ними.....	39
1.3 Аналіз сучасного стану типової системи телекомунікацій, як основи системи управління повітряним рухом на рівні аеропорту.....	41
1.3.1 Огляд системи телекомунікацій СУПР на рівні аеропорту.....	41
1.3.2 Архітектура та основні елементи системи телекомунікацій аеропорту.....	43
1.3.2.1 Аеродромна диспетчерська вежа управління польотами та комунікаційна система(ATC Tower, communication system.....	43
1.3.2.2 Підсистема радіозв'язку у структурі аеропортової системи управління повітряним рухом	45
1.3.2.3 Наземна станція обміну даних VDL/ACARS.....	47
1.3.2.4 Підсистема автоматичного аеродромного інформування ATIS.....	49
1.3.2.5 Автоматизована підсистема метеорологічних спостережень AWOS.....	50
1.3.2.6 Підсистема наземного службового зв'язку, телефонного зв'язку та передавання даних GCPN	52
1.3.2.7 Підсистема керування наземним рухом і контролю за ним A-SMGCS.....	53

1.3.2.8 Підсистема планування польотів та обробки повідомлень AFTN/AMHS.....	55
1.3.2.9 Суміжні органи управління повітряним рухом: диспетчерський орган підходу та районний диспетчерський центр APP/ACC.....	57
1.4 Цілі та постановка задачі дослідження	57
Висновки до першого розділу.....	60
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ПРОПОЗИЦІЙ ПОБУДОВИ МЕРЕЖІ УПРАВЛІННЯ ПОВІТРЯНИМ РУХОМ АЕРОПРОТУ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЙ SDN/NFV ТА ОЦІНКА ПОКАЗНИКІВ ЇЇ ФУНКЦІОНУВАННЯ.....	62
2.1 Аналіз архітектури мережі SDN та функціональних можливостей її елементів.....	62
2.1.1 Передумови переходу традиційної інфраструктури до SDN/NFV в мережі управління повітряним рухом аеропорту.....	62
2.1.2 Архітектура SDN та функції її елементів у процесі вирішення задач управління СУПРА.....	64
2.1.3 Функціональна структура модульної площини управління.....	68
2.1.4 Архітектура відкритої мережевої операційної системи ONOS для контролера SDN.....	73
2.1.5 Взаємодія SDN-мереж із традиційними системами управління TMN/OSS.....	79
2.2 Методи оцінки якості функціонування базових і локальних мереж системи управління повітряним рухом аеропорту по показнику затримки даних в мережі....	84
2.2.1 Перший етап, формалізація моделі системи телекомунікацій СУПРА.....	84
2.2.2 Аналіз побудови локальних мереж LAN _{ACCES} СУПРА.....	86
2.2.3 Аналіз технологій побудови локальних LAN _{ACCES} і базових мереж WAN _{CORE} СУПРА кільцевої структури.....	87
2.3 Методи оцінки часу затримки інформації на рівні LAN _{ACCES} локальних мереж СУПРА.....	88
2.3.1 Метод оцінки часу затримки інформації на рівні LAN _{ACCES} при використанні Ethernet в розподілюваному середовищі.....	88
2.3.2 Метод оцінки часу затримки інформації на рівні WAN _{CORE} і LAN _{ACCES} при використанні мережі кільцевої структури в розподілюваному середовищі.....	95
2.3.3 Метод оцінки часу затримки інформації на рівні LAN _{ACCES} при використанні швидкого комутованого Ethernet.....	99

2.3.4 Метод оцінки часу затримки інформації на рівні LAN _{ACCES} при використанні технології МЦУС.....	103
2.4 Порівняння характеристик технологій.....	107
Висновки до другого розділу.....	109
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЬ І МЕТОД КЕРУВАННЯ ПОТОКАМИ ДАНИХ В РАДІОЛОКАЦІЙНИХ КАНАЛАХ ПОВІТРЯНОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ.....	111
3.1 Формалізований опис функціонування ЗРЛС у вигляді системи масового обслуговування.....	112
3.1.1 Вимоги та характеристика ЗРЛС.....	112
3.1.2 Формалізований опис каналу взаємодії ЗРЛС з повітряним транспортом.....	116
3.1.3 Шляхи підвищення пропускної здатності та завадостійкості каналів повітряного спостереження.....	117
3.2 Розробка моделі ефективної швидкості передачі даних в каналі ЗРЛС.....	119
3.2.1 Модель і параметри каналу взаємодії ЗРЛС з повітряним.....	119
3.2.2 Метод оптимізації параметрів каналу взаємодії ЗРЛС з повітряним транспортом по показнику пропускної спроможності.....	124
3.2.3 Аналіз компоненти моделі та умови оптимізації.....	129
3.2.4 Метод підвищення пропускної спроможності каналу ЗРЛС на основі використання адаптивного алгоритму управління довжиною пакета даних.....	130
3.3 Результати моделювання і практичні рекомендації оптимізації довжини пакету в каналах ЗРЛС.....	132
3.3.1 Аналіз впливу параметрів.....	132
3.3.2 Аналіз впливу показника групування помилок та швидкості передачі пакетів в каналах ЗРЛС.....	133
3.3.3 Вплив кількості повторних запитів.....	136
3.3.4 Вплив швидкості кодування та вірогідність помилки на біт інформації.....	137
3.3.5 Практичні рекомендації.....	139
Висновки до третього розділу.....	141
РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЮВАННЯ МЕРЕЖІ СУПРА З ВИКОРИСТАННЯМ SDN-КОНТРОЛЕРА НА БАЗІ ОПЕРАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ONOS.....	144
4.1 Передумови побудови SDN-мережі СУПРА на базі ONOS.....	144

4.2 Налаштування архітектури мережі СУПРА.....	146
4.3 Побудова SDN-мережі СУПРА та перелік її елементів.....	148
4.4 Перевірка зв'язку між хостами з використанням додатку Reactive Forwarding.....	149
4.5 Рішення завдань управління трафіком з використанням підсистеми Intent.....	150
4.6 Віртуалізація та моніторинг трафіку в SDN-мережі.....	154
4.7 Аналіз можливостей балансування трафіку в мережі SDN СУПРА в умовах виходу з ладу мережевих вузлів.....	157
Висновки до четвертого розділу.....	159
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	161
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	164
ДОДАТКИ.....	175

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

СУПР	– система управління повітряним рухом
СУПРА	– система управління повітряним рухом на рівні аеропроту
ACC	- Area Control Centre
AFTN	– Aeronautical Fixed Telecommunication Network
AIM	– Aeronautical Information Management
AMHS	– Aeronautical Message Handling System
ANSP	– Air Navigation Service Provider
APP	– Approach Control
A-SMGCS	– Advanced Surface Movement Guidance and Control System
ATC	– Air Traffic Control
ATIS	– Automatic Terminal Information
ATM	– Air Traffic Management
ATS	– Air Traffic Services
AWOS	– Automatic Weather Observing System
BER	– Bit Error Rate
DCN	– Data Communication Network
LAN	– Local Area Network
LAN _{ACCES}	– локальні мережі доступу (сегменти доступу диспетчерів)
WAN	– Wide Area Network
WAN _{CORE}	– базові мережі, що об'єднують LAN _{ACCES}
NBI	– Northbound Interface
SBI	– Southbound Interface
NFV	– Network Functions Virtualization
VNF	– Virtual Network Function
SDN	– Software–Defined Networking
ONOS	– Open Network Operating System
OpenFlow	– протокол взаємодії SDN-контролера з мережевими пристроями
OF-CONFIG	– протокол/інтерфейс конфігурування (SDN-середовище)
P4	– мова програмування площини даних мережевих пристроїв
T-API	– Transport API

TMN – Telecommunications Management Network

OSS – Operations Support Systems

FIFO – First-In, First-Out

СМО – система масового обслуговування

M/G/1 – модель СМО з пуассонівським вхідним потоком, довільним розподілом часу обслуговування та одним каналом обслуговування

ACARS – Aircraft Communications Addressing and Reporting System

VDL – VHF Data Link

VHF – Very High Frequency

UHF – Ultra High Frequency

УПР – управління повітряним рухом

ЗПС – злітно-посадкова смуга

ЗРЛС – запитальні радіолокаційні системи

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний аеропорт є високонавантаженою критичною інфраструктурою, де ефективність наземних операцій і безпека польотів прямо залежать від надійності та керованості телекомунікаційних мереж і сервісів. На рівні аеропорту функціонує велика кількість взаємопов'язаних підсистем зв'язку, навігації та спостереження, а також засобів управління повітряним рухом. Ці підсистеми працюють паралельно з інформаційними сервісами аеропорту, мережами технологічних служб, системами безпеки, відеоспостереження, контролю доступу та корпоративною ІТ-інфраструктурою. Зростання кількості цифрових сервісів і обсягів даних посилює вимоги до пропускної здатності, затримок, пріоритизації трафіку, відмовостійкості та швидкості відновлення після збоїв.

Зростання та нерівномірність навантаження на аеропортові процеси в операційні періоди підвищеного навантаження, сезонність, метеоумови та обмеження інфраструктури призводять до затримок на землі, збільшення часу руління та неефективного використання ресурсів. Водночас вузьким місцем часто стає не лише фізична інфраструктура, а й мережа, яка забезпечує обмін критичними даними між службами. Для диспетчерських і аеродромних систем важливі детерміновані затримки, гарантована доставка, пріоритетність критичних потоків (наприклад, голос і дані спостереження), а також безперервність роботи під час перемикань і відмов. Традиційні мережі зі статичною конфігурацією та розподіленою логікою керування складні в оперативній реконфігурації й більш чутливі до помилок під час змін, що безпосередньо впливає на ефективність та безпеку.

Історично в багатьох аеропортах формуються відокремлені сегменти під різні задачі: підсистеми спостереження й наведення, голосові сервіси, передавання повідомлень, мережі служб аеропорту та корпоративні ІТ-сервіси. Як приклад, на рівні поверхні можуть використовуватися системи наведення та контролю руху на поверхні, датчики та радары спостереження наземного руху, багатопозиційне визначення координат, автоматичне залежне спостереження-

радіомовлення. Паралельно працюють системи обміну авіаційними повідомленнями, авіаційна фіксована телекомунікаційна мережа сучасні інформаційні сервіси інтеграції й обміну даними, а також процеси координації рішень в аеропорту. Така різноманітність часто призводить до дублювання обладнання, складності супроводу, високих витрат модернізації та обмеженої гнучкості при впровадженні нових сервісів. Звідси випливають вимоги до сегментації, централізованого контролю політик доступу, моніторингу та можливості швидко ізолювати інцидент без зупинки критичних сервісів.

Перспективним підходом вирішення та модернізації мереж завдяку та телекомунікацій на рівні аеропорту є поєднання віртуалізація мережевих функцій NFV та програмно-керовані мережі SDN. NFV передбачає перенесення частини мережевих функцій зі спеціалізованого апаратного обладнання у програмну форму (віртуальні або контейнеризовані функції) на стандартній обчислювальній інфраструктурі. Це дає змогу швидко розгортати, масштабувати та резервувати функції, спрощувати оновлення, зменшувати кількість унікального «заліза» та скорочувати капітальні та операційні витрати. Для аеропорту це означає потенційну можливість швидше вводити нові сервіси, підвищувати доступність за рахунок кластеризації та автоматичного відновлення, а також стандартизувати конфігурації з меншим ризиком помилок при ручному налаштуванні.

SDN забезпечує логічне відокремлення площини керування від площини передавання даних і підтримує централізоване керування політиками на рівні всієї мережі. Практично це дозволяє реалізувати керування якістю сервіс, пріоритизацію критичного трафіку, швидку реконфігурацію маршрутів, автоматизацію сегментації та узгоджене застосування політик безпеки. Для аеропортових систем це означає зменшення часу простоїв, прискорення локалізації відмов, скорочення часу впровадження змін і можливість динамічно виділяти ресурси під пікові режими роботи.

Таким чином підвищення ефективності функціонування системи управління повітряним транспортом на рівні аеропорту шляхом віртуалізації мережевих функцій і впровадження SDN є актуальною як з практичної, так і з

наукової точок зору. Задача спрямована на розв'язання комплексу сучасних проблем - від технологічної складності та вартості володіння інфраструктурою до забезпечення вимог реального часу, надійності та масштабованості. Результати дослідження можуть стати основою для поетапної модернізації аеропортових мереж і сервісів, підвищуючи керованість, гнучкість та безперервність роботи критичних підсистем, що безпосередньо впливає на якість наземного обслуговування, пунктуальність та загальну ефективність авіаційних перевезень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Тема дисертаційної роботи пов'язана з пріоритетними напрямками розвитку науки і техніки, наведеними в «Переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок та середньострокових пріоритетних напрямків інноваційної діяльності загальнодержавного та галузевого рівнів», затвердженому Постановою Кабінету міністрів України № 942 від 7 вересня 2011, зі змінами згідно Постанови № 782 від 12 липня 2022р.

Основні наукові результати отримано в рамках науково-дослідної роботи: НДР № 0122U001804 «Методи підвищення експлуатаційної ефективності телекомунікаційних та радіоелектронних систем об'єктів критично важливої інфраструктури України»

Мета роботи. Метою роботи є підвищення ефективності функціонування телекомунікаційної інфраструктури аеропорту в процесі управління повітряним рухом.

Завдання дослідження

Відповідно до поставленої мети, в дисертаційній роботі ставилися і вирішувалися такі взаємозалежні *завдання дослідження*:

Основні завдання досліджень:

1. Проаналізувати сучасний стан системи управління повітряним рухом, принципів побудови структури сучасного аеропорту і вимоги міжнародних стандартів до якості функціонування.

2. Визначити обмеження традиційної телекомунікаційної архітектури і розробити пропозиції щодо підвищення якості функціонування телекомунікаційної мережі аеропорту на базі технологій SDN/NFV.

3. Визначити можливу типову структуру локальних і базових мереж аеропорту. Розробити пропозиції щодо підвищення якості функціонування по показникам часу затримки і пропускної спроможності.

4. Вдосконалити алгоритм взаємодії радіолокаційних систем повітряного спостереження з повітряним транспортом з метою підвищення якості обслуговування і пропускної спроможності каналів.

5. Проаналізувати технології передачі даних в локальних мережах аеропорту і вдосконалити процес обміну інформацією з метою мінімізації часу затримки.

6. Оцінити ефективність запропонованих рішень методами аналітичного та імітаційного моделювання.

Об’єкт досліджень – процес функціонування мережі СУПРА із застосуванням телекомунікаційних технологій SDN/NFV.

Предмет досліджень – методи підвищення якості функціонування мережі СУПРА по показникам якості обслуговування, часу затримки, пропускної спроможності і часу відновлення нормального режиму функціонування в умовах виходу з ладу елементів.

Методи дослідження. При вирішенні сформульованої наукової задачі в дисертаційній роботі були використані методи систем масового обслуговування (при розрахунку часу затримки в локальних і базових мережах), теорії телекомунікаційних мереж (при розрахунку пропускної здатності в радіоканалах РЛС із літаком), методи теорії графів (при дослідженні структурних моделей локальних і базових мереж), методи, моделі програмного і бібліотеки програмного комплексу MININET.

Достовірність результатів. Достовірність одержаних результатів і обґрунтованість наукових положень і висновків, сформульованих у дисертації, забезпечується математичною строгістю та коректністю використання апробованого математичного апарату, системного аналізу, теорії

телекомунікаційних мереж, а також підтверджується збігом результатів теоретичних досліджень та моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів. До нових наукових результатів, отриманих в дисертаційній роботі, відносяться.

1. Вперше розроблений метод обслуговування навантаження в базовій мережі WAN_{CORE} аеропорту з кільцевою структурою **на базі SDN/NFV**, який забезпечує оптимальне співвідношення надійності та часу затримки.

Відмінність вдосконаленого методу, що визначає його новизну є:

- розроблено метод оцінки часу затримки в обслуговуванні в мережі кільцевої структури типу FDDI в залежності від навантаження.

- прогнозування часу обслуговування і використання контролера мережі SDN для оперативної зміни алгоритму обслуговування в залежності від ситуації в мережі кільцевої структури типу FDDI

2. Вдосконалений метод обслуговування навантаження в локальних мережах LAN_{ACCES} аеропорту, які побудовані на базі різновидів технології Ethernet на базі SDN/NFV

Відмінність вдосконаленого методу, що визначає його новизну є:

- розроблено методи оцінки часу затримки в обслуговуванні в мережах LAN_{ACCES} Ethernet різних технологій (комутований, CSMA/CD, МЦУС) в залежності від навантаження.

- прогнозування часу обслуговування і використання контролера мережі SDN для оперативної зміни алгоритму обслуговування в залежності від ситуації в мережі.

3. Вдосконалений метод адаптивного керування потоками даних в радіолокаційних каналах повітряного спостереження за рахунок оптимізації довжини пакету.

Відмінність вдосконаленого методу, що визначає його новизну є:

- розроблено модель, яка дозволяє визначити оптимальну довжину пакета від параметрів каналу зв'язку в радіолокаційних системах повітряного спостереження типу SSR.

- прогнозування оптимальних параметрів обслуговування і використання

контролера мережі SDN для оперативної зміни алгоритму в залежності від ситуації в мережі.

Теоретичне та практичне значення результатів роботи, впровадження:

Теоретичне значення отриманих в дисертаційній роботі наукових результатів полягає в розвитку наукового і методичного апарату принципів побудови та прогнозування мережевої інфраструктури СУПР аеропорту АТС з використанням технологій SDN/NFV. У роботі проаналізовано вимоги міжнародних документів до системи управління повітряним рухом. Виконано аналіз сучасного стану типової СУПР на рівні аеропорту, зокрема її структури і ключових функціональних елементів. Розглянуто типову мережу, систему зв'язку та телекомунікацій аеропорту. Конкретизовано структуру системи управління на рівні аеропорту, а саме диспетчерських функцій та взаємодія з суміжними центрами і сформульовано ключові вимоги до сервісів зв'язку та мережевих сервісів. Визначено основні структурні обмеження, напрями модернізації та підвищення ефективності роботи СУПР. Показано, що пріоритетним напрямом підвищення ефективності функціонування СУПР на рівні аеропорту є впровадження віртуалізації мережевих функцій та програмно-конфігурованих мереж. Проаналізовано проблеми традиційних мереж аеропорту та показано, що необхідно впровадження технології NFV/SDN. При цьому потрібно мати сумісність із традиційними підходами експлуатаційного керування TMN/OSS.

Розроблені пропозиції до підвищення ефективності мережевих локальних та магістральних сегментів за практично значущими критеріями (затримка та фактична швидкість передавання корисних даних) з урахуванням технологій побудови мережі та режимів навантаження. Також отримано теоретично обґрунтовані залежності для оптимізації параметрів пакетизації та адаптивного керування передаванням даних у радіолокаційних системах повітряного спостереження типу SSR, що дозволяє формалізувати умови підвищення ефективної швидкості та стійкості передавання

Практичне значення результатів роботи полягає у можливості їх використання під час проектування та модернізації диспетчерських мереж

аеропортів і суміжної критичної інфраструктури. Запропоновані підходи дають змогу модернізувати аеропортову мережу управління повітряним рухом АТС на базі SDN/NFV і планувати еволюційний перехід без порушення безперервності сервісів. Методики оцінювання затримок і пропускну здатності можуть застосовуватися для вибору технологічних рішень та параметрів мережі як на етапі проєктування, так і під час експлуатаційної оптимізації. Рекомендації щодо адаптивного керування параметрами передавання даних SSR зокрема вибору довжини інформаційного пакета та правил налаштувань за зміни завадової обстановки можуть бути використані для підвищення ефективної пропускну здатності й стійкості критичних потоків спостереження.

Отримані в дисертації наукові і практичні результати можуть бути впроваджені у процесах проєктування та модернізації аеропортових мереж передавання даних та переходу до централізованого керування мережею на основі SDN із застосування віртуалізації мережевих функцій для розгортання ключових сервісів в підрозділах аеропорту або провайдера критичних сервісів для автоматизації керування політиками, контролю якості обслуговування, оперативного перемаршрутизування трафіку та скорочення часу відновлення під час інцидентів, адаптивного налаштування параметрів радіолокаційних трактів з метою підвищення стабільності видачі інформації спостереження за умов зміни навантаження та якості мережі, а також у навчальному процесі закладів вищої освіти під час викладання дисциплін з телекомунікацій, програмно-керованих мереж, віртуалізації та систем CNS/ATM як приклад практичного SDN/NFV в мережевій інфраструктурі аеропорту.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота узагальнює результати теоретичних та експериментальних досліджень, проведених автором самостійно. Основні результати, отримані автором особисто. Зроблено аналітичний огляд структури та функціонування СУПР на рівні аеропорту, визначено склад ключових підсистем CNS/ATM та їх інформаційні взаємодії, сформульовано вимоги до аеропортової мережевої інфраструктури АТС. Ці матеріали використані в роботах для визначення місця впровадження, створення моделі системи і алгоритму взаємодії РЛС з повітряним транспортом.

В роботі обґрунтовано необхідність модернізації системи телекомунікацій аеропорту на базі технологій SDN/NFV, визначені ключові елементи системи і показники, по яким необхідно провести оптимізацію. Ці питання опубліковані в роботі. Визначено можливість вирішення ряд задач управління мережею на базі відкритої мережевої операційної системи ONOS. На базі цього матеріалу розроблені методи оптимізації рішення задач передачі інформації в локальних і базової мережах аеропорту по показнику часу затримки пакетів.

Обґрунтовано необхідність забезпечення взаємодії відкритої мережевої операційної системи ONOS з традиційними системами TMN/OSS. Розглянуто вимоги і запропоновано метод рішення цих завдань. Результати дослідження використані і опубліковані в роботі.

Віртуалізація мережевих ресурсів дає великі переваги при побудові телекомунікаційних мереж. В дисертаційній роботі надано аналіз місць, форм і можливих методів використання NFV в структурі аеропорту. Ці матеріали використані в при опису пропозицій по віртуалізації мережевих функцій NFV з використанням технології Kubernetes.

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 13 наукових праць, у тому числі 2 статті у наукових фахових виданнях України за спеціальністю 172 – Телекомунікації та радіотехніка, 5 статей проіндексованих у базах даних Scopus, 6 тез виступів на наукових конференціях;

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації двома мовами, змісту, переліку умовних позначень, вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 178 сторінки друкованого тексту, основна частина займає 134 сторінки. Основний текст містить 59 рисунків та 2 таблиці. Список використаних джерел містить 98 найменувань.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ПОБУДОВИ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПОВІТРЯНИМ РУХОМ

1.1 Аналіз глобальної системи управління повітряним рухом, її призначення, структура, та вимоги до неї

Система управління повітряним рухом - це комплексна соціотехнічна система, що поєднує організаційні структури й правила, технічні засоби CNS та інформаційно-обчислювальні комплекси для планування, організації й тактичного керування потоками повітряного руху в межах зон відповідальності. Її головна мета - це безпека польотів, запобігання зіткнень у повітрі та на землі на ЗПС шляхом ешелонування, процедур розведення й попередження небезпечних зближень, що забезпечує централізований контроль траєкторій і прийнятний рівень ризику.

СУПР підвищує ефективність використання повітряного простору й аеродромів, виконує планування, узгоджує маршрути та оптимізує прибуття та відправлення, зменшуючи затримки й перевантаження секторів, що підтримує регулярність, дотримання розкладів через координацію між органами управління та механізми керування потоками, поєднуючи реагування на збої з превентивним плануванням. Також СУПР має на меті підвищення економічності функціонування повітряних перевезень, а саме оптимізації маршрутів, висот і процедур, знижує витрати палива та часу і скорочує витрати та підвищує ефективність та рентабельність повітряного руху.

У практичному циклі система обробляє плани польотів до вильоту, а під час польоту отримує дані спостереження й підтримує зв'язок із екіпажем, на основі чого диспетчер ухвалює тактичні рішення та координує дії із суміжними органами. Інтеграція CNS з автоматизованими комплексами формує єдину інформаційну картину: плани, траєкторії, метео, стан аеродрому, тому СУПР фактично є «нервовою системою» авіації, що забезпечує безпечні, регулярні, ефективні та економічно доцільні польоти.

1.1.1 Аналіз процесу функціонування системи управління повітряним рухом

Функціонування системи управління повітряним рухом доцільно розглядати як замкнений цикл керування із зворотним зв'язком - спочатку система збирає інформацію про стан повітряного простору та об'єктів у ньому, далі обробляє й інтегрує ці дані, на основі результатів аналізу диспетчер ухвалює рішення, передає відповідні вказівки екіпажам, після чого контролює виконання команд і, за потреби, цикл коригується. Такий цикл працює безперервно одночасно для великої кількості повітряних суден. Роботу СУПР можна описати як безперервний цикл отримання інформації, її обробки, прийняття рішень та передачі команд:

1. Збір інформації.

На початковому етапі керування повітряним рухом формується первинна інформаційна база інтегрована картина повітряної обстановки. Основою є системи спостереження: первинні радарі радіолокаційного спостереження, [22, 23, 24] що виявляють цілі та їхні орієнтовні координати навіть без транспондера, а вторинні радарі радіолокаційного спостереження працюють у режимі «запит-відповідь»[22, 23, 24], отримуючи від борта ідентифікацію, висоту та додаткові параметри. Точність і повноту доповнюють незалежні засоби: ADS-B передає координати й параметри, розраховані бортом за супутниковою навігацією, а MLAT визначає положення за різницею часу приходу сигналу на кілька приймачів, що корисно при слабкому радіолокаційному покритті. У сукупності це дає диспетчеру актуальні дані про положення та рух ПС у реальному часі[13].

Паралельно використовуються навігаційні засоби: наземні DME створюють опорні точки для визначення пеленга і дальності, GNSS забезпечує високоточні координати на борту та підтримує роботу систем такі як ADS-B[6]. Важливим джерелом є плани польотів, які містять маршрут, заплановані ешелони та часові параметри, тому диспетчер заздалегідь знає очікуваний профіль і час появи борта. Окремий блок - метеоінформація, включно з небезпечними явищами та профілями вітру, температури за ешелонами, що безпосередньо впливають на планування та тактичні рішення. Додатково

враховуються аеронавігаційні й оперативні повідомлення NOTAM [10, 11] про обмеження повітряного простору, закриття смуг, активність тимчасових зон тощо. У підсумку диспетчер отримує не лише геометрію розташування літаків, а повний контекст умов і обмежень польоту - де знаходяться повітряні судна, куди вони прямують, за яких метеоумов і в межах яких обмежень виконується політ.

2. Обробка та інтеграція даних:

Уся зібрана інформація надходить до центрів управління повітряним рухом різних рівнів: диспетчерських органів підходу та районних диспетчерських центрів та аеродромних диспетчерських веж управління польотами. У середині цих центрів працюють автоматизовані АТМ-системи [4, 28] що об'єднують дані з різних джерел і будують радіолокаційну картину повітряної обстановки. Система порівнює фактичний рух повітряних суден із планами польоту і контролює дотримання мінімальних інтервалів між літаками.

3. Прийняття рішень

Центральною ланкою СУПР залишається диспетчер. На основі даних АТМ-системи та встановлених процедур він ухвалює рішення для кожного повітряного судна - призначає ешелон і маршрут, за потреби змінює курс, висоту чи швидкість, організовує обхід небезпечних метеоявищ. Оцінюючи обстановку, диспетчер аналізує взаємне розташування бортів, їхні курси й висоти, швидкості. Рішення диспетчера є багатокритеріальними: потрібно одночасно забезпечити безпечне ешелонування, мінімізувати затримки, уникати зайвих відхилень від оптимального профілю польоту та дотриматися нормативних обмежень. Після ухвалення рішення диспетчер має оперативно й однозначно передати вказівки екіпажу. Основний канал - голосовий радіозв'язок VHF у цивільній авіації та HF для віддалених районів [8]. Критичні команди підтверджуються процедурою: пілот повторює інструкцію, а диспетчер перевіряє коректність і за потреби виправляє. Додатково широко впроваджується CPDLC цифровий канал «диспетчер-пілот» [20, 22, 26] зі стандартизованими текстовими повідомленнями, особливо корисний у завантажених районах, де голосовий зв'язок перевантажений.

1.1.2 Загальна структура СУПР та її основні рівні

У загальному вигляді СУПР має багаторівневу структуру [1, 2, 3, 4, 18], що відповідає трьом основним рівням (таблиця 1.1):

Таблиця 1.1

Організаційні рівні СУПР

Глобальний рівень	Регіональний рівень	Аеропортовий рівень
Національні органи організації повітряного руху	Центри районного диспетчерського обслуговування	Аеродромна диспетчерська вежа управління польотами - рух на ЗПС, руліжних доріжках, у районі аеродрому
Провайдер аеронавігаційного обслуговування	Районний диспетчерський центр	Диспетчерський орган підходу - управління прибуттям і відльотом бортів у зоні підходу
—	—	Локальні системи зв'язку, радіонавігації, посадки (ILS, MLS, PBN)

Аналіз даних та завдань дає можливість визначити наступну ієрархічно-організаційну структуру СУПР (рис.1.1), яка наведена нижчі.

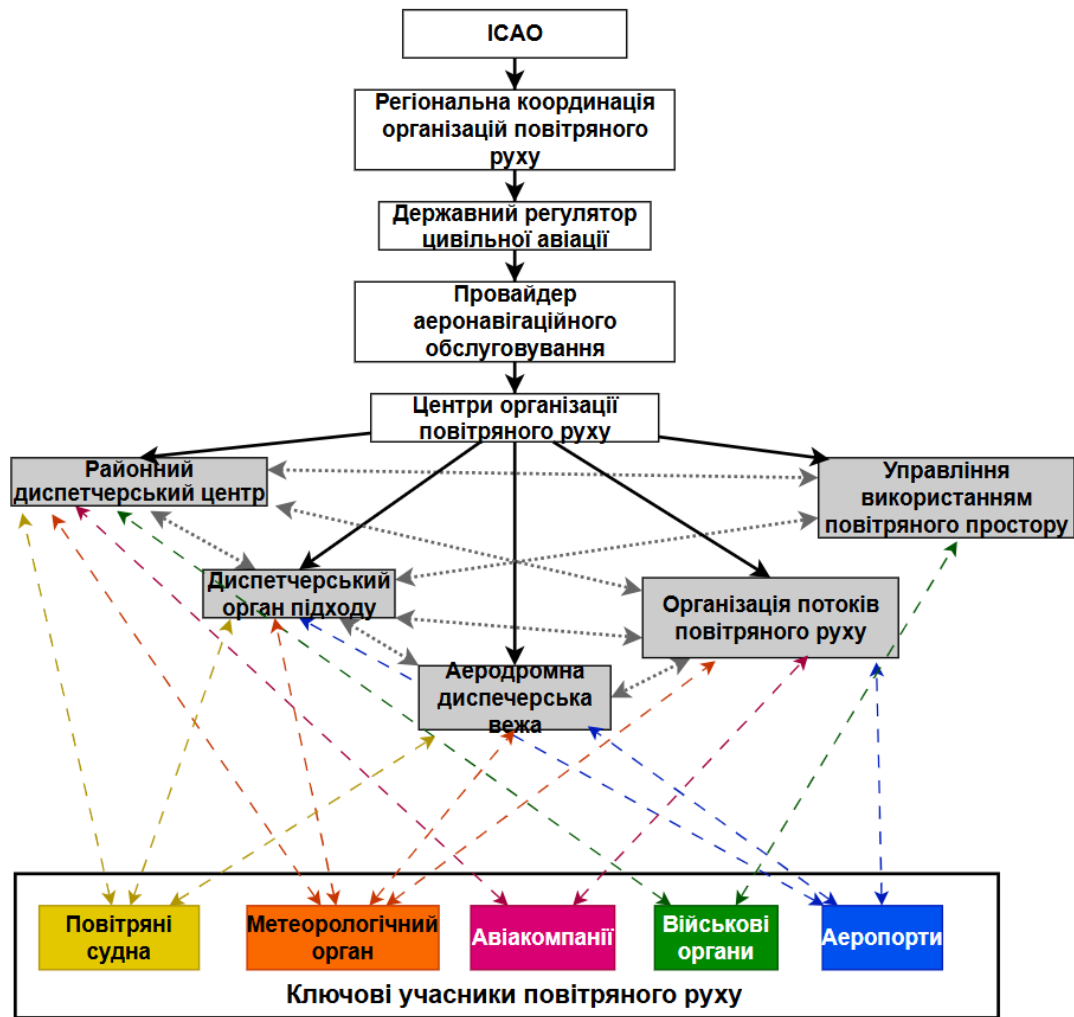


Рис. 1.1. Ієрархічна багаторівнева організаційна структура СУПР

1.1.3 Основні елементи системи управління повітряним рухом

СУПР складається з кількох категорій елементів. Система управління повітряним рухом є комплексною соціотехнічною системою, тому її не можна звести лише до роботи авіадиспетчера за радіолокаційним екраном. Вона включає організаційні структури, технічні засоби зв'язку, навігації та спостереження, а також потужні інформаційно-обчислювальні комплекси, які забезпечують планування, контроль, аналіз і документування процесів управління. Узагальнено елементи СУПР доцільно поділити на три великі категорії: організаційні, технічні та інформаційно-обчислювальні [5, 28].

Ключову роль у СУПР відіграють органи обслуговування повітряного руху, які безпосередньо взаємодіють з екіпажами. Основу становить служба АТС [18, 28], що включає аеродромну диспетчерську вежу яка здійснює керування рухом на ЗПС; диспетчерський орган підходу виконує функцію організації

прибуттів та вильотів у зоні підходу, послідовність заходів і схеми очікування; районний диспетчерський центр - управління на маршруті між аеропортами, розподіл ешелонів і запобігання конфліктам. Разом АТС формує операційний каркас рішень щодо конкретних бортів.

Паралельно працює служба польотної інформації FIS, яка забезпечує екіпажі актуальними відомостями, що особливо важливо в неконтрольованому повітряному просторі[10]. Служба оповіщення відповідає за реагування на ознаки лиха та залучення пошуково-рятувальних служб і відповідних органів.

Інституційно систему підтримує провайдер аеронавігаційного обслуговування - він експлуатує та розвиває диспетчерські центри, радіотехнічні об'єкти, мережі зв'язку, РЛС та інформаційні системи, забезпечує безперервність послуг, техобслуговування, модернізацію, процедури й підготовку персоналу відповідно до міжнародних стандартів [28]. Авіакомпанії та інші експлуатанти подають плани польотів, узгоджують слоти, маршрути й ешелони, а також беруть участь у стратегічних узгодженнях щодо пропускну здатності й правил організації трафіку, формуючи вимоги до СУПР.

Технічну основу СУПР становлять засоби зв'язку, навігації та спостереження CNS, які забезпечують обмін інформацією між диспетчером і екіпажем, точне визначення положення повітряних суден і їх безперервний контроль, від їхньої надійності залежить рівень безпеки та пропускну здатність повітряного простору. Зв'язок передає команди, дозволи та оперативні повідомлення між пілотами, диспетчерами й наземними органами. Базою є голосовий радіозв'язок VHF/HF, а в завантажених районах дедалі активніше застосовуються канали даних CPDLC [8, 21, 28]. Органи навігації забезпечують точне дотримання маршрутів та процедур, включно із заходом на посадку. Використовуються наземні датчики дальності видимості на злітно-посадковій смузі і переважно, супутникова навігація GNSS. На базі GNSS реалізуються процедури для гнучких, ефективних маршрутів із меншою залежністю від маяків.

Системи спостереження надають диспетчеру дані про фактичне положення, висоту, курс і швидкість. Первинний радар радіолокаційного

спостереження виявляє цілі незалежно від транспондера, вторинний радар радіолокаційного спостереження отримує від борта ідентифікацію, висоту та розширені параметри. Комбіноване використання цих технологій підвищує точність і стійкість спостереження, що дозволяє зменшувати інтервали ешелонування та підвищувати пропускну спроможність без втрати безпеки.

Табл. 1.2.

Складові інформаційно-обчислювальної рівня

Інформаційні системи організації повітряного руху	Системи управління повітряним простором	Метеорологічні інформаційні системи
Радіолокаційні дисплейні комплекси ситуаційної обстановки	Інструменти планування повітряного простору	Інструменти аналізу METAR, TAF, SIGMET
Модулі обробки планів польоту, прогнозу траєкторій, виявлення можливих конфліктів	Інструменти координатії з військовими та забороненими зонами	Доставка метеорологічної інформації в центри управління екіпажам

Інформаційно-обчислювальні системи (таблиця 1.2) забезпечують збирання, зберігання, обробку та відображення всіх даних, потрібних для управління повітряним рухом, і підтримують планування та аналіз. Центральним елементом є інформаційні системи організації повітряного руху, що інтегрують диспетчерське обслуговування повітряного руху, управління використанням повітряного простору і організацію потоків повітряного руху [1, 2, 3, 5]. Вони формують робоче середовище диспетчера: радіолокаційні, ситуаційні дисплеї показують положення повітряних суден, їхні параметри, маршрути, межі секторів і зони обмежень, а програмні модулі обробляють плани польотів, ведуть базу рейсів, розраховують прогнозні траєкторії та підтримують передачу бортів між секторами. Важливою частиною є модулі виявлення конфліктів і мережі безпеки, які аналізують взаємне положення та прогноз руху, попереджаючи про небезпечні зближення або порушення мінімальної висоти. Також системи забезпечують запис радіообміну та радарних даних для розслідувань, навчання й вдосконалення процедур. Окремо працюють системи управління повітряним

простором, що підтримують стратегічне й передтактичне планування - структурування повітряного простору, конфігурацію секторів, узгодження тимчасових зон та моделювання сценаріїв навантаження і пропускної спроможності. Метеоінформаційні системи інтегрують дані станцій, погодніх радарів, супутників і моделей прогнозу, щоб диспетчери могли обґрунтовано коригувати маршрути, ешелони й процедури заходу.

У підсумку організаційні елементи задають управління, CNS дає вимірювання та зв'язок, а інформаційно-обчислювальні системи об'єднують усе в єдине операційне середовище для досягнення безпечного, впорядкованого та ефективного використання повітряного простору. На основі проведеного аналізу можливо запропонувати наступну функціональну схему СУПР (рис. 1.2)

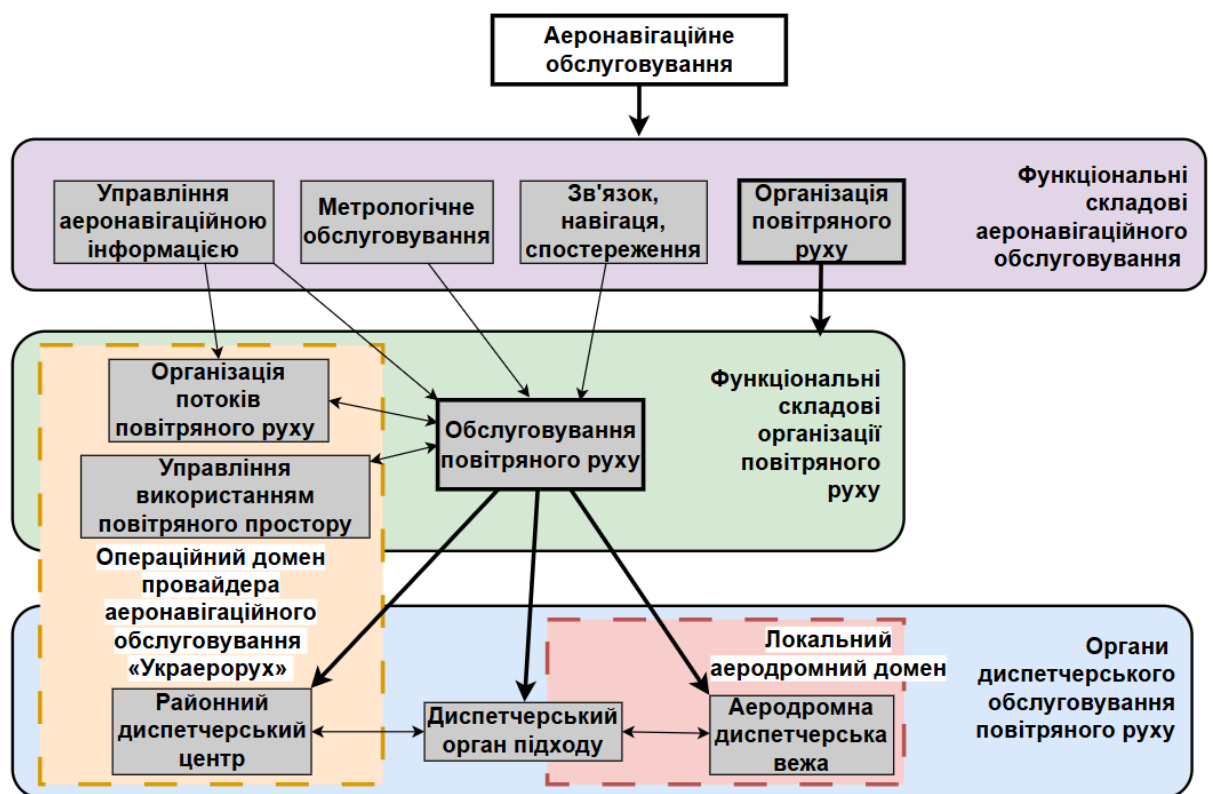


Рис. 1.2. Функціональна схема взаємодії складових СУПР

1.1.4 Основні вимоги до системи управління повітряним рухом

До системи управління повітряним рухом висувається комплекс жорстких вимог, оскільки будь-який збій у її роботі потенційно може призвести до катастрофічних наслідків для людських життів, а також до суттєвих економічних

втрат. Ці вимоги охоплюють як технічні параметри - надійність, точність, пропускну здатність, так і організаційні аспекти - підготовка персоналу, процедури дій у нестандартних ситуаціях, взаємодія з іншими органами. У сукупності вони формують рамки, в яких СУПР має функціонувати для забезпечення прийняттого рівня ризику та сталого розвитку авіаційної системи [4, 18, 28]:

1. Безпека:

- Мінімізація ризику зіткнення повітряних суден між собою та з перешкодами.
- Дотримання мінімальних вертикальних та горизонтальних інтервалів.
- Наявність процедур на випадок відмов (втрата зв'язку, відмова радарів, відмова навігаційних засобів).

2. Надійність та живучість:

- Резервування каналів зв'язку, радіолокаційних станцій, джерел живлення.
- Можливість швидкого відновлення роботи після відмови окремих елементів.
- Доступність системи 24/7.

3. Безперервність обслуговування:

- Цілодобова робота без перерв.
- Організація змін диспетчерів, технічного персоналу, чергових служб.

4. Точність та актуальність інформації:

- Висока точність визначення координат повітряних суден.
- Оперативне оновлення планів польоту й метеоінформації.
- Синхронізація годинників та часових міток.

5. Пропускна здатність та ефективність:

- Здатність системи обслуговувати зростаючий обсяг трафіку без зниження рівня безпеки.

- Оптимізація маршрутів, ешелонів, схем вильоту та прибуття для економії палива та часу.

6. Сумісність та інтероперабельність:

- Відповідність міжнародним стандартам (ІКАО та іншим організаціям).

- Можливість взаємодії з сусідніми країнами, регіональними центрами, військовими органами.

- Узгоджені формати обміну даними, спільні процедури.

7. Людський фактор та ергономіка:

- Зручні та зрозумілі робочі місця диспетчерів.
- Обмеження навантаження на диспетчера, чіткі процедури зміни, відпочинку.

- Постійна підготовка, тренажерні заняття, відпрацювання аварійних ситуацій.

8. Захист інформації:

- Захист від несанкціонованого доступу, кіберзагроз.
- Забезпечення цілісності й конфіденційності обміну даними між центрами та іншими учасниками.

1.2 Аналіз типової системи управління повітряним рухом на рівні аеропорту згідно міжнародної системи стандартів.

1.2.1 Система УПР на рівні аеропорту

Система управління повітряним рухом в аеропорту забезпечує безпечний і впорядкований рух повітряних суден у зоні аеродрому та на поверхні летовища. Центральним елементом є диспетчерська вежа АТС Tower, звідки диспетчери контролюють злітно-посадкові смуги, руліжні доріжки, перони та повітряний простір поблизу.

Під час вильоту літак спершу отримує маршрутний дозвіл із підтвердженням маршруту та початкових висот, далі наземний диспетчер керує буксируванням і рулінням до точки очікування перед ЗПС. Коли смуга вільна й

витримані інтервали, диспетчер дає дозвіл на зліт, а після відриву управління передається диспетчеру підходу, який веде борт у подальший політ [6, 28].

Посадка відбувається у зворотній логіці - диспетчер підходу формує чергу та задає курс, висоту, швидкість для виходу на посадковий курс, після чого ближче до аеродрому управління переходить до диспетчеру вежі, який контролює смугу та надає дозвіл на посадку з актуальною інформацією. Після звільнення ЗПС літак передають наземному диспетчеру, який веде його руліжними доріжками до стоянки, контролюючи перетини активних смуг і безпеку руху на пероні. У сучасних аеропортах цьому допомагають радары, та системи огляду поверхні, що дають повну картину наземного трафіку в реальному часі.

Таким чином, система УПР охоплює весь цикл переміщення повітряного судна від старту руління на виліт до моменту вильоту з контрольованої зони, а також від заходу на посадку до зарулювання на стоянку після приземлення. На кожному етапі за рух відповідає свій диспетчер, який передає керування наступному по ланцюжку. Це гарантує безперервність і координованість управління повітряним рухом в межах аеропорту. На основі проведеного аналізу можна запропонувати наступну структуру і принцип взаємодії елементів СУПР аеропорту (рис. 1.3).

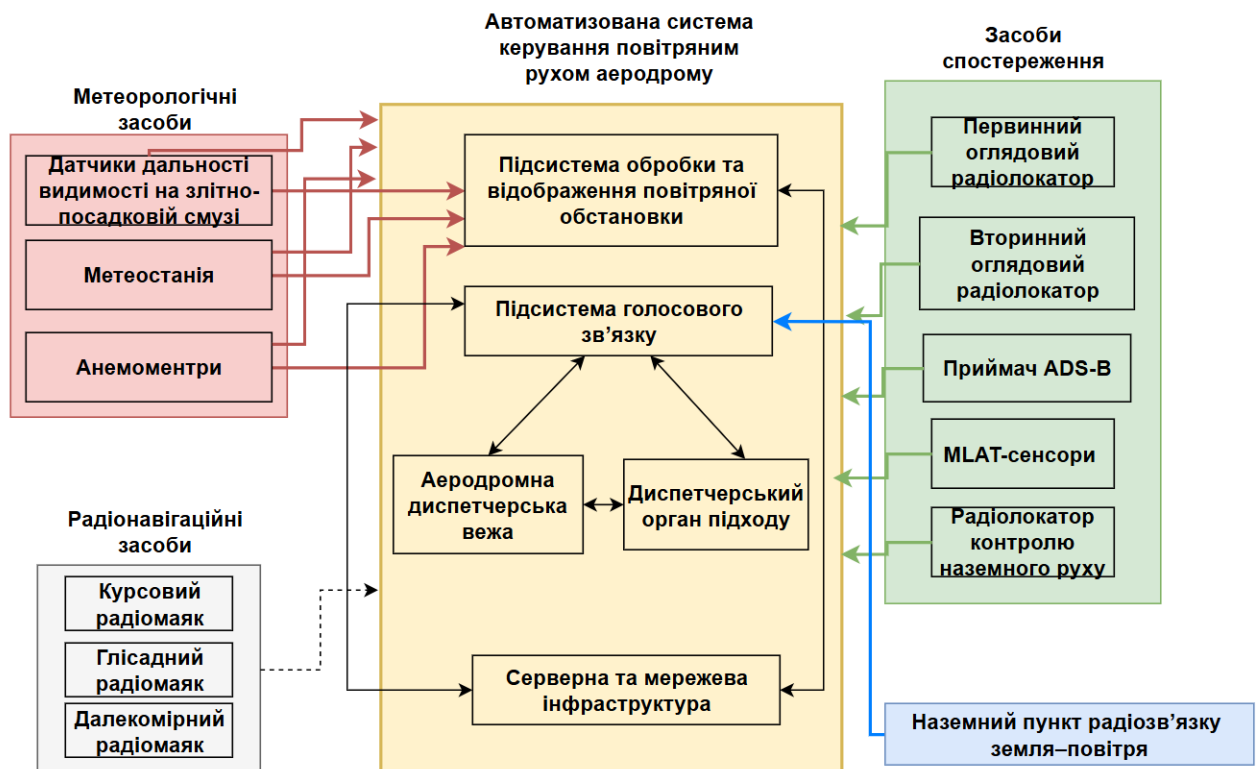


Рис. 1.3. Структура та взаємодія складових СУПР аеропорту

1.2.2 Структура диспетчерської служби в аеропорті

Організаційно служба УПР на рівні аеропорту поділяється щонайменше на диспетчерські служби різних рівнів - у малих аеропортах ці функції може виконувати один диспетчер, а у великих ролі деталізуються, додаються функції видача дозволів на виліт та керування рухом на стоянках. Керування є послідовним – диспетчер підходу веде повітряний рух перед посадкою та після зльоту й узгоджує дії з вежею, аеродромний диспетчер відповідає за зліти та посадки, інтервали та рух у контрольній зоні аеродрому[6, 28], наземний диспетчер керує всіма переміщеннями на руліжних доріжках і пероні, координуючи перетини і вихід на ЗПС. Усі рішення ухвалюються на основі даних систем спостереження й зв'язку, а взаємодія з екіпажами ведеться по радіо. Служба ОПР також тісно координується з іншими підрозділами аеропорту: будь-який виїзд техніки на ЗПС, руліжні доріжки, прилеглі зони потребує дозволу диспетчера, а в разі потреби вежа оперативно звільняє смугу й залучає аварійно-рятувальні служби; планові роботи такі як - ремонт, прибирання, закриття ділянок, завчасно узгоджуються, щоб забезпечити безперервну та безпечну роботу летовища.

1.2.3 Основні елементи СУПРА, її складові та взаємодія між ними

Головним елементом системи УПР є авіадиспетчери, від кваліфікації та швидкості реакції яких залежить безпека. Диспетчери вежі переважно контролюють рух візуально й локальними засобами, тоді як диспетчери підходу/району працюють за радарними екранами, відстежуючи повітряну обстановку. Взаємодія з екіпажами ведеться стандартною фразеологією ІКАО[1-8] з обов'язковими підтвердженнями команд, у разі відмови зв'язку існують резервні процедури, але в нормі управління здійснюється голосом по радіо.

Для роботи СУПР потрібні надійні системи зв'язку. Основний канал - VHF радіообмін повітря–земля, де кожен сектор має свою частоту. Для координації між підрозділами використовують канали «земля–земля», а також зв'язок з

службами аеропорту для оперативних питань. Додатково працює ATIS - автоматичне інформування екіпажів про погоду, активну смугу та важливі повідомлення; цифровий зв'язок застосовується як доповнення [5, 10, 11], але в аеропорту домінує голосовий радіозв'язок через його оперативність диспетчери відстежують літаки й наземну техніку за допомогою радарів і сенсорів: первинного оглядового радара аеропорту ASR для контролю трафіку в районі летовища, вторинного радара повітряного спостереження з даними транспондерів та радара контролю наземного руху для контролю руху на льотному полі, особливо за низької видимості. Додатково використовують ADS-B і MLAT. Весь об'єм інформації зводиться в єдину ситуаційну картину на робочих місцях диспетчерів. Безпеку й впорядкованість руху додатково підтримують світлосигнальні системи аеродрому, більшість світлотехніки керується з аеродромної диспетчерської вежі - диспетчери вмикають потрібні групи та регулюють яскравість залежно від умов, окремо застосовують стоп-бари, які візуально забороняють виїзд на смугу й доповнюють команди диспетчера, допомагаючи екіпажам краще орієнтуватися.

Підсистема керування наземним рухом аеропорту і контролю за ним A-SMGCS забезпечує маршрутизацію, наведення й контроль переміщень літаків і транспортних засобів на поверхні аеродрому, підтримуючи необхідну інтенсивність руху за будь-яких погодних умов при збереженні рівня безпеки [15]. Вона інтегрує підсистеми спостереження (радары, ADS-B, камери тощо) для точної картини позицій усіх об'єктів і підтримки безпеки з автоматичними попередженнями про небезпечні ситуації, A-SMGCS підвищує ситуаційну обізнаність диспетчерів і допомагає збільшити безпеку та пропускну спроможність аеропорту, особливо за низької видимості.

Взаємодія диспетчера з екіпажем здійснюється за суворими правилами радіообміну та стандартизованою термінологією. Команди формулюються з позивним і чіткою інструкцією, а пілот зобов'язаний їх підтвердити лише після цього команда вважається прийнятою. Це зменшує ризик помилок через шум, акцент або перевантаження ефіру, а також забезпечує спільну ситуаційну обізнаність. У штатних умовах екіпажі дотримуються розпоряджень УПР,

оскільки диспетчер має повну картину трафіку, однак остаточна відповідальність за безпеку залишається за командиром повітряного судна, який може відхилитися від вказівок у разі загрози аварії

1.3 Аналіз сучасного стану типової системи телекомунікацій, як основи системи управління повітряним рухом на рівні аеропорту

1.3.1 Огляд системи телекомунікацій СУПР на рівні аеропорту.

Сучасний аеропорт потребує надійної телекомунікаційної інфраструктури, яка забезпечує безперервний обмін інформацією між диспетчерами, екіпажами та наземними службами для безпеки й ефективності УПР. Система зв'язку в межах аеропорту обслуговує диспетчерів та екіпажі повітряних суден, забезпечуючи безперервний обмін інформацією, необхідний для безпеки і ефективності польотів. На рівні летовища така система охоплює кілька взаємопов'язаних підсистем: радіозв'язок повітря-земля, внутрішній диспетчерський зв'язок, цифрові канали передачі даних, служби автоматизованого інформування та системи обміну даними CPDLC і ACARS [6, 9, 17]. Кожна з цих складових відіграє свою роль, але разом вони утворюють єдину архітектуру телекомунікацій, побудовану з урахуванням строгих вимог до безпеки, надійності та швидкодії. На основі проведеного аналізу можна запропонувати наступну типову систему зв'язку СУПР аеропорту (рис. 1.4)

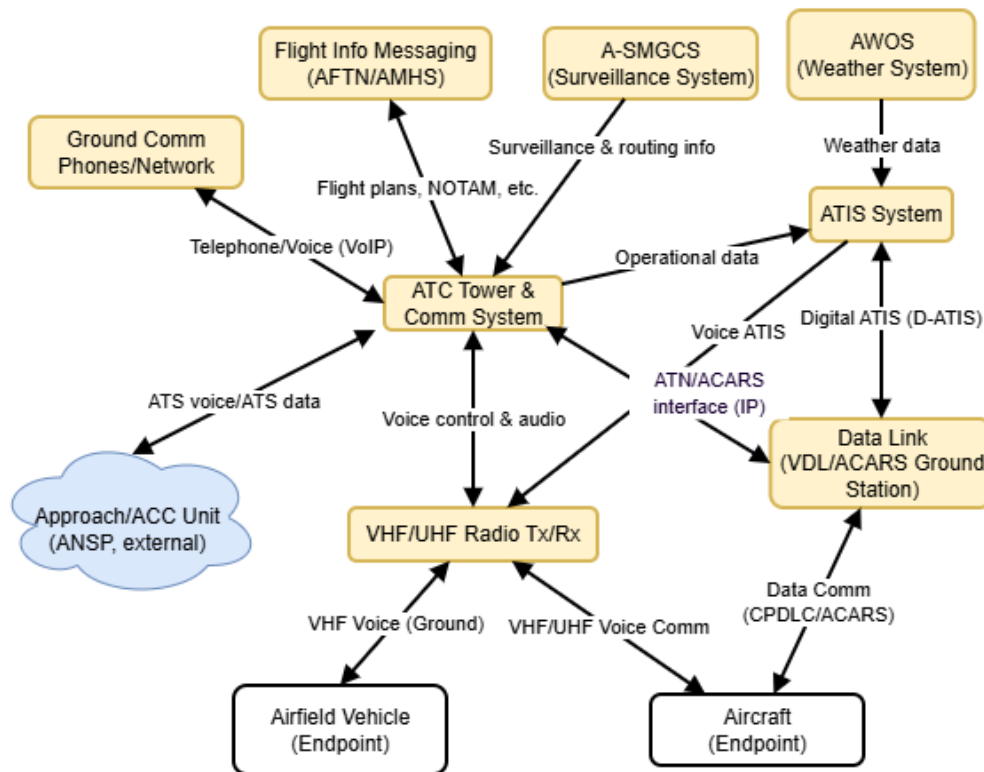


Рис. 1.4. Запропонований варіант блок-схеми типової телекомунікаційної системи в межах аеропорту.

На рис. 1.4 представлено спрощену блок-схему типової телекомунікаційної системи в межах аеропорту, що забезпечує УПР. Центральним елементом є вузол зв'язку аеродромної диспетчерської вишки (ATC Tower, communication system), який об'єднує радіозв'язок, телефонні мережі та канали передачі даних. Літаки підтримують зв'язок з диспетчерами як через радіостанції VHF/UHF, так і через станції передачі даних VDL/ACARS. Автоматизована система ATIS отримує оперативні дані від диспетчера та метеосистеми AWOS, після чого передає інформацію пілотам двома шляхами: у вигляді голосового повідомлення на окремій радіочастоті та в цифровому форматі D-ATIS [1-8, 11, 13, 18]. Показано також лінії зв'язку між наземними підрозділами – зокрема, телефонна мережа зв'язує вишку аеродрому з диспетчерським центром підходу для координації. Система інтегрується з підсистемою керування наземним рухом аеропорту і контролю A-SMGCS та мережею AFTN/AMHS [10, 11, 15, 17]. Усі ці елементи поєднані для забезпечення безперервного і надійного потоку інформації.

1.3.2 Архітектура та основні елементи системи телекомунікацій аеропорту

Телекомунікаційна система аеропорту зазвичай має модульну архітектуру, де центром є вузол зв'язку аеродромної диспетчерської вежі [20-23]. Цей вузол інтегрує різні засоби комунікації: радіопередавачі та приймачі для повітряного зв'язку, комутаційну систему для внутрішніх телефонних ліній та інтеркомів, а також сервери і шлюзи для обробки цифрових повідомлень. Вежа керування обладнана голосовою комунікаційною системою, сучасною системою керування голосовим зв'язком, що об'єднує різні канали радіо та телефонні, тощо в єдиний інтерфейс для диспетчера. Це дозволяє диспетчеру з одного робочого місця керувати усіма необхідними видами зв'язку. Окремі функціональні підсистеми, як радіозв'язок, телефонія, обмін даними можуть фізично розміщуватися у різних частинах летовища, але всі вони пов'язані між собою високошвидкісними наземними каналами кабельними або оптоволоконними мережами. В подальших розділах ми розберемо детально кожную систему та службу з якої складається ядро СУПРА.

1.3.2.1 Аеродромна диспетчерська вежа управління польотами та комунікаційна система (ATC Tower, communication system)

Аеродромна диспетчерська вежа управління повітряним рухом на аеродромному рівні є центральним вузлом оперативного управління повітряним та наземним рухом (рис. 1.6), оскільки забезпечує диспетчерам гарантований доступ до основних голосових каналів координації: радіозв'язку «повітря–земля», «гарячих ліній» зі службами аеродрому та суміжними органами УПР, а також телефонії [4, 16, 18, 29]. Функціонально система поєднує робочі місця диспетчерів із голосовою комутацією, телефонною підсистемою, підсистемою реєстрації переговорів та транспортною мережею, що гарантує якість і безперервність сервісу. У контексті СУПР аеропорту саме цей комплекс виступає центром прийняття рішень - диспетчер маючи дані про обстановку доводить команди до екіпажів і наземних служб через стандартизовані голосові канали.

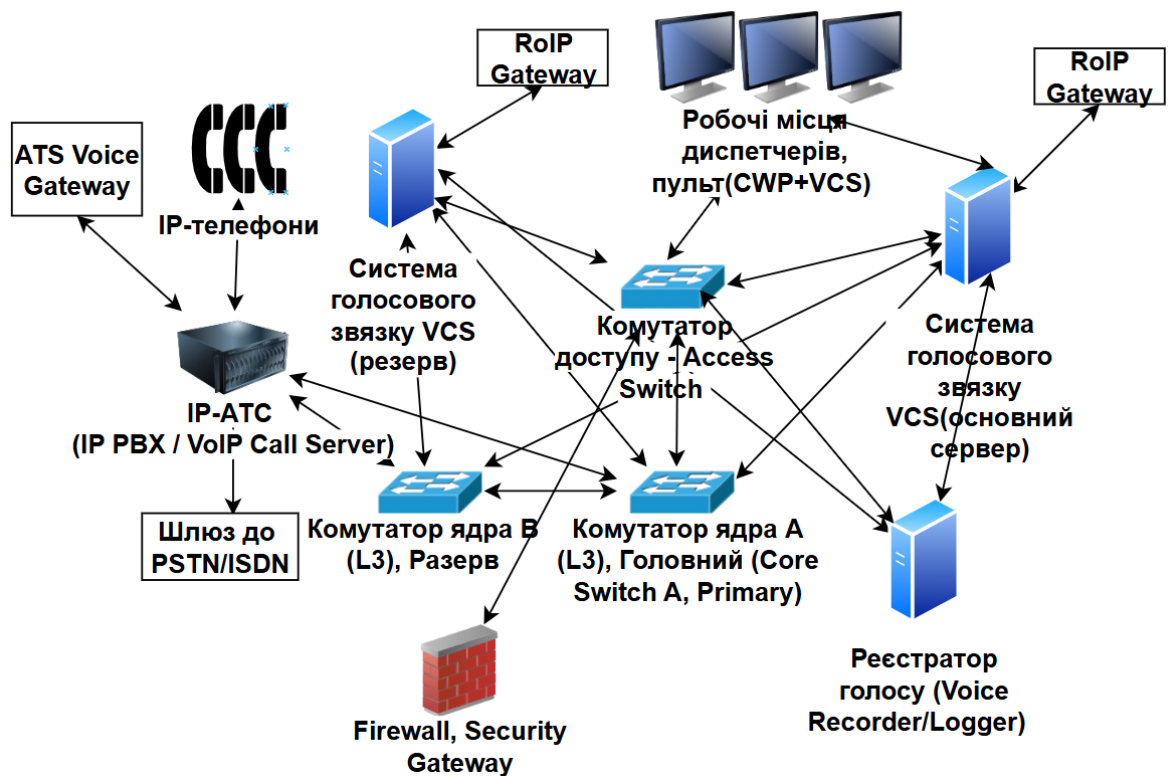


Рис. 1.6. Структурна-мережева схема диспетчерської вежа управління польотами та комунікацій

У типовій структурі робота починається з робочого місця диспетчера, яке забезпечує візуалізацію та доступ до прикладних функцій робочого процесу, а також підключене до локальної мережі. Для оперативного керування зв'язком використовується пульт VCS диспетчера, що надає вибір радіоканалів, керування передачею радіозв'язку, пріоритети, гучність, та швидкий виклик координаційних ліній. Аудіо та сигнали керування з пульта надходять у центр управління голосової системи, яке реалізується як два взаєморезервовані вузли основний та резервний. Ці вузли виконують комутацію голосових трактів і керування ресурсами зв'язку: підключають диспетчера до потрібного каналу, забезпечують паралельне прослуховування, блокування конфліктів, пріоритетність службових ліній, а також автоматичне перемикання при відмові для збереження безперервності керування повітряним рухом. Важливим елементом є реєстратор голосу, який отримує потоки запису з VCS, а також, за потреби, з телефонної підсистеми і забезпечує фіксацію переговорів. Записи зберігаються у сервері-сховищі записів відповідно до процедур та нормативних

вимог. Для координаційних дзвінків і внутрішнього зв'язку використовується АТС або IP-АТС, яка маршрутизує виклики до телефонів та, за потреби, через шлюз до PSTN забезпечує вихід у зовнішні телефонні мережі. Інтеграція VCS із IP-телефонією дозволяє реалізувати єдиний голосовий простір координації: диспетчер може працювати з телефонними лініями з того ж пульта, що і з радіоканалами. Транспортна основа комплексу – мережа аеродромної диспетчерської вежі. Кінцеві пристрої та серверні вузли підключаються до комутатора доступу, а далі трафік агрегується на комутаторах ядра. Між центральними вузлами організовується резервований зв'язок, який забезпечує відмовостійкість і безперервність у разі виходу з ладу одного з елементів. Для ізоляції критичної голосової інфраструктури та контролю доступу застосовується фаєрвол-сегментація, що обмежує взаємодію з іншими доменами аеропортової мережі та знижує кіберризики. У підсумку аеродромна диспетчерська вежа забезпечує диспетчерам гарантований, керований і відмовостійкий голосовий зв'язок, який є базовим механізмом реалізації команд і координації в СУПР аеропорту [4, 16, 18, 28, 29].

1.3.2.2 Підсистема радіозв'язку у структурі аеропортової системи управління повітряним рухом

На аеродромному рівні підсистема радіозв'язку(рис. 1.7) є базовим каналом оперативного голосового обміну між органами СУПР та користувачами аеродрому, екіпажами повітряних суден і службами на пероні. Основне призначення системи забезпечити безперервний, керований та завадостійкий голосовий зв'язок для видачі диспетчерських дозволів і команд, підтвердження їх виконання, а також передачі критично важливої інформації щодо безпеки руху, стану смуги, руліжних доріжок і обстановки в зоні маневрування. Типова структурна реалізація системи включає кілька функціонально пов'язаних елементів. У диспетчерському пункті знаходяться робочі місця диспетчерів та система голосового керування або комутаційно-керувальний вузол [8, 20, 25, 30, 34]. Саме тут формується голосовий тракт, аудіосигнал з гарнітури диспетчера надходить у VCS, де здійснюється вибір радіоканалу, встановлення пріоритетів,

керування передаванням, комутація на необхідний радіоресурс і, за потреби, запис переговорів. VCS також приймає вхідний аудіосигнал з радіоканалу та передає його на відповідний пульт диспетчера, забезпечуючи чітке розділення каналів і можливість одночасного прослуховування кількох джерел відповідно до процедур. Передача керування та аудіо від VCS до радіотехнічної частини виконується через мережевий або спеціалізований інтерфейс до вузла радіосайту.

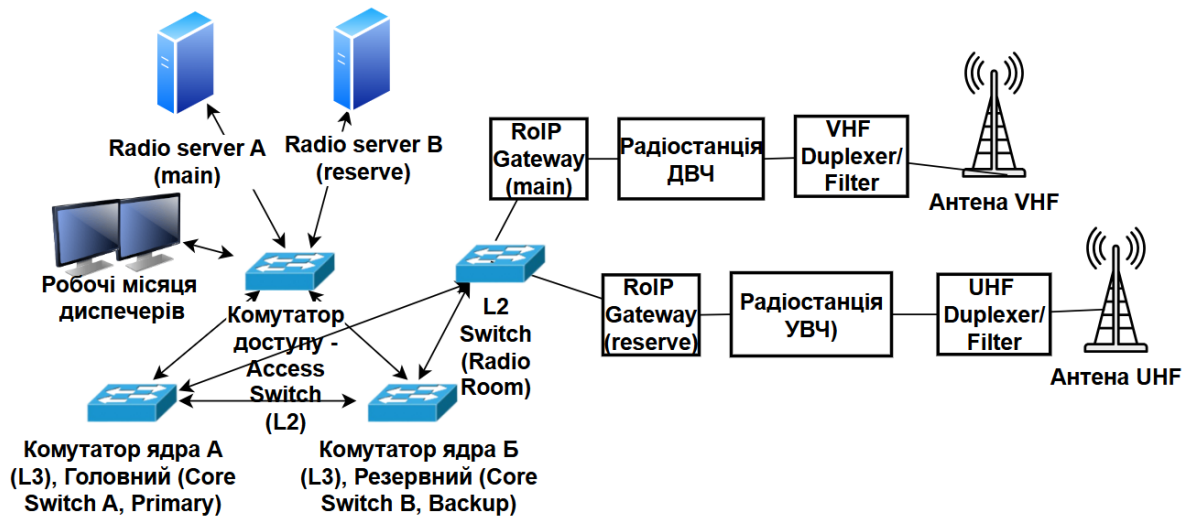


Рис. 1.7. Структурно-мережева схема підсистеми голосового авіаційного радіозв'язку аеропорту

На фізичному рівні радіосайт містить радіотрансивери, радіочастотне обладнання, фідерну лінію та антенну систему. Радіотрансивер здійснює модуляцію, підсилення та випромінювання сигналу через антену в діапазоні VHF типово для цивільного повітряного зв'язку або UHF за наявності вимог експлуатації. У зворотному напрямку радіотрансивер приймає сигнал від повітряного судна або наземного рухомого об'єкта, демодулює його та передає аудіо в диспетчерський центр. Таким чином реалізується двосторонній голосовий радіообмін «повітря–земля» та «земля–земля». У рамках СУПР аеропорту система радіозв'язку інтегрується з іншими інформаційно-зв'язковими підсистемами як мінімум на рівні операційних процедур: диспетчер використовує радіоканал для доведення рішень, що формуються на основі даних

спостереження, метеоінформації, а також планової оперативної інформації. У підсумку підсистема радіозв'язку виступає основним оперативним інтерфейсом між диспетчерським управлінням і виконавцями в зоні аеродрому, забезпечуючи реалізацію команд та підтверджень, від яких безпосередньо залежить безпека та пропускна спроможність аеродромного руху.

1.3.2.3 Наземна станція обміну даних VDL/ACARS

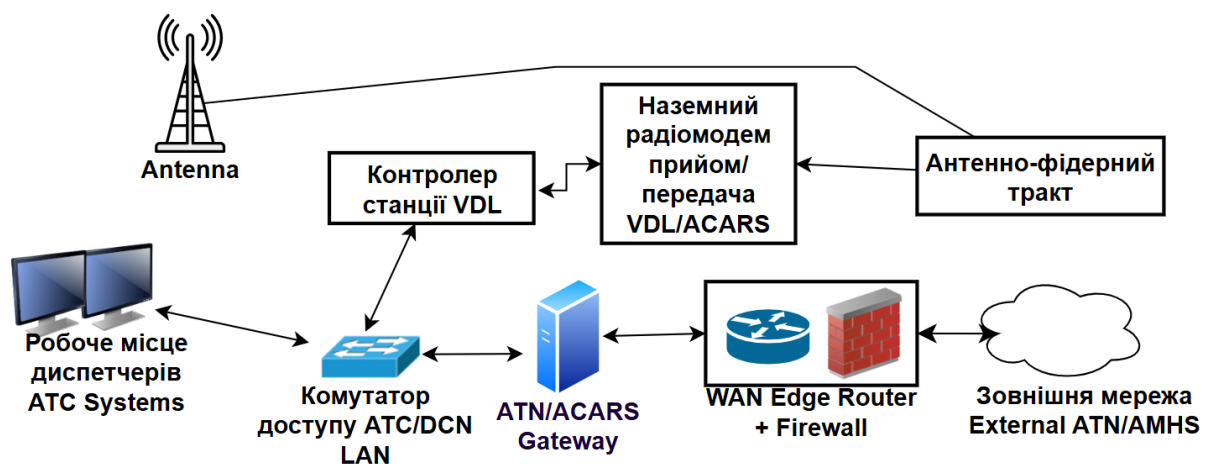


Рис. 1.8. Структурно-мережева схема наземної станції обміну даних VDL/ACARS аеропорту

Наземна станція передачі даних на рівні аеропорту (рис. 1.8), призначена для забезпечення цифрового обміну повідомленнями між повітряними суднами та наземною інфраструктурою через VHF-канал передачі даних. На відміну від голосового радіозв'язку, наземної станції передачі даних забезпечує формалізований обмін короткими текстовими повідомленнями (службові повідомлення, операційні повідомлення авіакомпаній), що підвищує точність передачі інформації, зменшує навантаження на голосові частоти та доповнює засоби управління повітряним рухом і наземними операціями [7, 12, 17]. У контексті СУПР аеропорту ця підсистема використовується як додатковий канал доведення та отримання інформації, а також для інтеграції з зовнішніми

мережами провайдерів, де здійснюється подальша маршрутизація повідомлень до відповідних сервісів.

Радіочастотний сегмент системи починається з антени яка забезпечує прийом та передачу сигналів в діапазоні VHF(118–137 МГц) [34]. Від антени сигнал по фідерній лінії надходить через грозозахист та заземлення, що захищає обладнання від імпульсних перенапруг, та далі через радіочастотний фільтр, які виконують фільтрацію і розв'язку, зменшуючи взаємні завади та забезпечуючи коректну роботу радіотракту при наявності кількох каналів або суміжних радіосервісів. Після обробки сигнал подається на наземний радіомодем VDL/ACARS, який реалізує передавально-приймальний тракт, модуляцію, демодуляцію та первинну обробку каналних структур, перетворюючи радіосигнал у цифрові дані та навпаки. На наступному рівні контролер станції VDL виконує функції керування наземною станцією: організовує сеанси та обмін даними, забезпечує буферизацію, контроль помилок, облік статистики, а також формує інтерфейс до IP-мережі станції. З'єднання між радіомодемом і контролером реалізується як канал керування даних, що логічно відокремлює радіочастотну частину від мережевого домену. Далі контролер підключається через LAN до комутатора доступу, який забезпечує підключення обладнання станції до локального мережевого середовища із можливістю сегментації. Маршрутизація повідомлень на прикладному рівні здійснюється шлюзом повідомлень ACARS/ATN [18, 22]. Його роль полягає у прийомі повідомлень від наземної станції, їхній адресації, постановці у черги, веденні журналів та передачі у зовнішні домени відповідно до встановлених маршрутів. Цей вузол формує чітку межу між радіодоступом та сервісами зовнішніх мереж. Далі трафік прямує до маршрутизатора периметру WAN Edge, який забезпечує мережеву сегментацію, політики безпеки та організує вихід у зовнішню мережу. Таким чином забезпечується захищене та кероване підключення наземної станції до інфраструктури провайдера, де відбувається подальша доставка повідомлень до адресатів [23, 29, 31].

1.3.2.4 Підсистема автоматичного аеродромного інформування ATIS

Система ATIS на рівні аеропорту забезпечує регулярне та стандартизоване доведення до екіпажів актуальної аеродромної інформації, зменшуючи навантаження на диспетчерів і підвищуючи точність інформаційних повідомлень (рис. 1.9). У рамках системи управління повітряним рухом аеропорту ATIS використовується як базовий сервіс інформування перед виходом на зв'язок із диспетчером [4, 5, 6, 9]. Формування ATIS повідомлення ґрунтується на двох основних потоках вхідних даних. По-перше, система отримує метеодані з AWOS, по-друге, ATIS використовує оперативні дані від вежі та системи зв'язку, які відображають стан аеродромних операцій, ці дані надходять у ATIS.

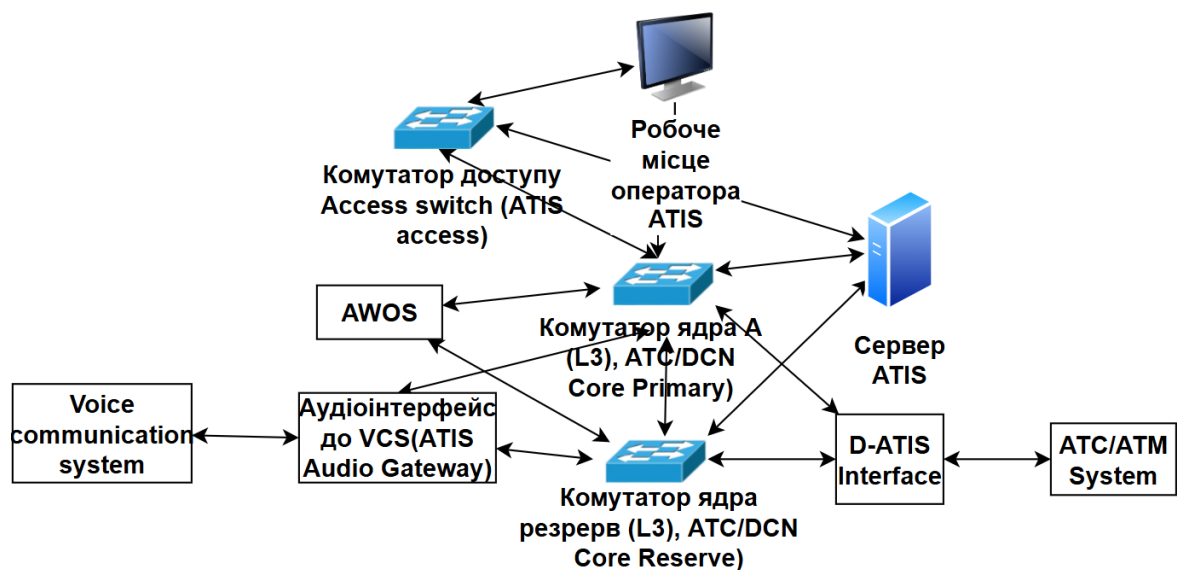


Рис. 1.9. Структурно-мережева схема підсистеми автоматичного аеродромного інформування ATIS

Мережевою основою системи ATIS є комутатор доступу, через який підключаються серверні й операторські компоненти, та резервована агрегація на комутаторах ядра. Така побудова забезпечує сегментацію і керовану доставку ATIS трафіку, а також відмовостійкість - у разі збою одного з елементів ядра зберігається зв'язність і працездатність сервісу. Центральним обчислювальним компонентом виступає сервер ATIS, на якому виконуються функції збору

вхідних даних, нормалізації, формування тексту повідомлення відповідно до встановленого шаблону, а також генерації вихідних повідомлень. Для контролю і внесення регламентованих уточнень використовується робоче місце оператора ATIS, що дає можливість переглянути сформовані дані, оперативно уточнити службову інформацію, зберігаючи при цьому простежуваність змін. Для архівації та аудиту система веде записи у сервері бази даних ATIS, де зберігаються версії повідомлень, журнали подій, часові мітки та інша інформація, необхідна для розборів і перевірок.

Доставка повідомлень ATIS здійснюється двома основними каналами: для голосового інформування формується Voice ATIS, який через аудіо-шлюз ATIS передається у систему голосового зв'язку, після чого транслюється назовні через радіостанцію на виділеній частоті ATIS(118–137 МГц). У цьому ланцюгу VCS забезпечує коректну комутацію та керування аудіопотоками, а радіостанція реалізує передавання в ефір. Паралельно може використовуватися цифровий канал D-ATIS [1-4, 14]. Загалом ATIS інтегруючись із метеоджерелами, вежевими оперативними даними, мережевою інфраструктурою та засобами зв'язку, забезпечує надійне, стандартизоване й відмовостійке інформування, що підвищує безпеку та ефективність управління повітряним рухом на рівні аеропорту.

1.3.2.5 Автоматизована підсистема метеорологічних спостережень AWOS

Підсистема AWOS на рівні аеропорту забезпечує безперервне автоматизоване спостереження за метеорологічними умовами в районі ЗПС та зони маневрування і надає стандартизовані метеодані для органів ОПр, метеослужби та суміжних інформаційних сервісів, зокрема ATIS (рис. 1.10) [14, 18]. У рамках системи управління повітряним рухом аеропорту AWOS є одним з ключових джерел об'єктивної інформації, що впливає на безпеку й пропускну спроможність: визначення робочої конфігурації ЗПС, застосування процедур низької видимості, обмеження руління, оцінка вітру, контроль умов зледеніння та оперативне попередження про небезпечні явища.

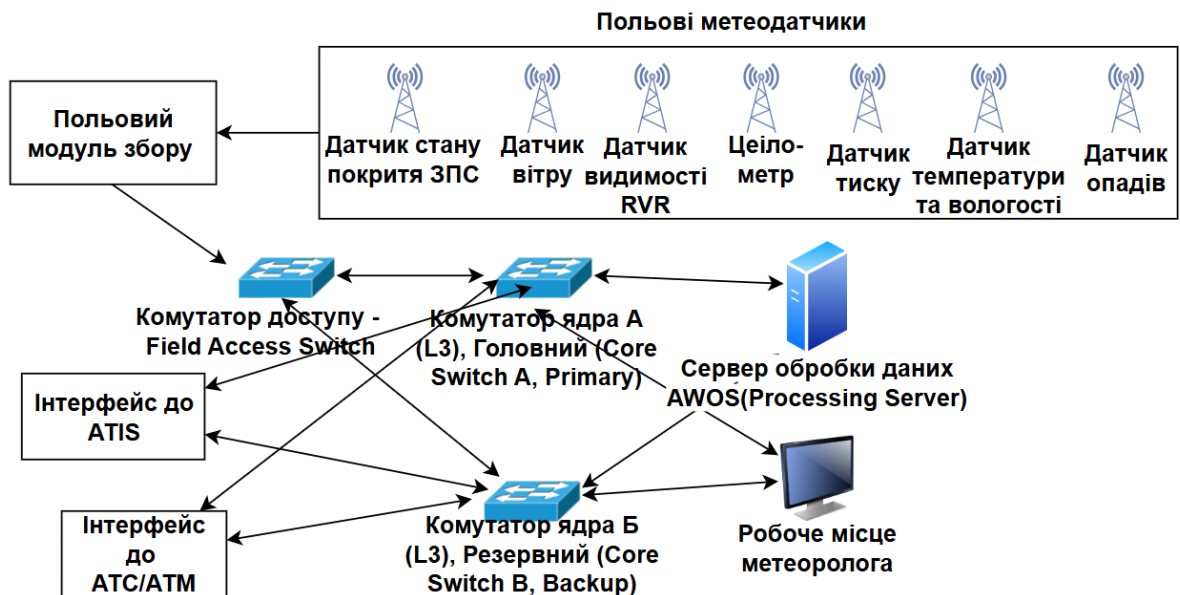


Рис. 1.10. Структурно-мережева схема автоматизованої підсистеми метеорологічних спостережень AWOS

Первинні дані формуються на польових метеомайданчиках, де встановлено набір датчиків. Сигнали від датчиків надходять у польовий модуль збору, який виконує оцифрування, первинну фільтрацію, перевірку на коректність, часову прив'язку та агрегування вимірювань у телеметричні пакети.

Метеодані передаються по польовій мережі LAN після чого через резервовану транспортну інфраструктуру аеропорту потрапляють на рівень комутатор ядра, що забезпечують відмовостійкість і гарантовану доставку критичних даних. Центральним компонентом є сервер обробки AWOS який отримує IP-потоки вимірювань, виконує контроль якості, обчислює похідні параметри, формує узгоджені метеопродукти та події тривоги при виході параметрів за пороги або відмові датчика [1-4, 6]. Оперативний контроль і використання даних здійснюється через робоче місце диспетчера, де персонал метеослужби спостерігають за станом сенсорів, підтверджують або коригують окремі повідомлення в межах процедур та забезпечують узгодженість метеоінформації для ОПР. Важливою взаємодією в СУПР є передача узагальнених метеоданих через інтерфейс до ATIS - AWOS постачає актуальні значення (вітер, видимість, хмарність, тиск, температура/точка роси, опади) для

автоматизованого формування ATIS-повідомлень, які далі доводяться до екіпажів голосовим або цифровим каналом.

1.3.2.6 Підсистема наземного службового зв'язку, телефонного зв'язку та передавання даних GCPN

Підсистема наземного службового зв'язку на рівні аеропорту забезпечує надійну координаційну взаємодію між ключовими учасниками аеродромних процесів: службами експлуатації, оперативним центром, метеопідрозділом, технічними й аварійно-рятувальними службами, а також підтримує керовані канали зв'язку із зовнішніми доменами та підсистемами диспетчерського зв'язку АТС через відповідні інтерфейси (рис. 1.11). У структурі СУПРА ця підсистема формує координаційний контур наземних служб, доповнюючи радіозв'язок і забезпечуючи телефонні з'єднання, оперативні дзвінки, контроль доступу до зовнішніх мереж і фіксацію переговорів для подальшого аналізу [1-4, 9, 11, 18]. Типово реалізація базується на IP-телефонії з сегментацією трафіку, резервованою комутаційною інфраструктурою та периметровими засобами безпеки [22, 28, 34].

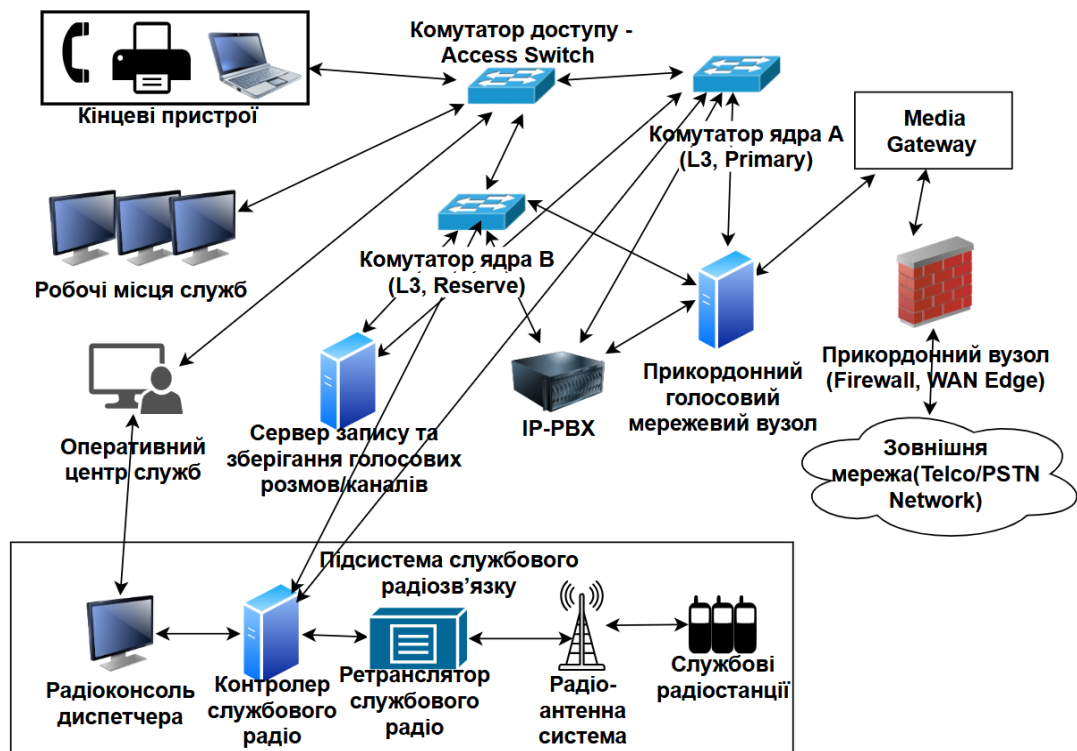


Рис. 1.11. Структурно-мережева схема підсистеми наземного службового зв'язку, телефонного зв'язку та передавання даних GCPN

Кінцевими вузлами є SIP-термінали та телефони, а також робочі місця служб, що підключаються до комутатора доступу у складі виділеного сервісного сегмента. Комутатор доступу агрегує підключення абонентів, виконує базову сегментацію та передає трафік у магістраль через резервоване ядро, сформоване комутаторами ядра. Така побудова забезпечує підвищену відмовостійкість транспортного рівня, можливість пріоритезації критичного голосового трафіку та контрольоване розмежування сервісів у межах єдиної інфраструктури LAN.

Центральним вузлом керування викликами є АТС IP-PBX, що забезпечує реєстрацію абонентів, план нумерації та маршрутизацію дзвінків усередині аеропорту. Для взаємодії з зовнішніми доменами використовується прикордонний контролер сесій SBC, який виконує функції захисту та контролю SIP-сесій, політики доступу, нормалізацію сигналізації та шифрування. Вихід у зовнішні мережі організовано через периметровий вузол, який забезпечує фільтрацію, маршрутизацію та підключення до зовнішньої мережі. Для сумісності з традиційними інтерфейсами застосовується шлюз, що виконує перетворення між IP-телефонією та каналами зв'язку [20, 22, 27, 30]. Окремо на схемі виділено підсистему службового радіозв'язку, інтеграція якої з IP-інфраструктурою може здійснюватися через шлюз RoIP та інтерфейс АТС, забезпечуючи керовану взаємодію між голосовими доменами за потреби. Таким чином GCPN формує надійний і захищений координаційний контур зв'язку наземних служб аеропорту з резервуванням ключових мережевих елементів та контрольованим виходом у зовнішні мережі.

1.3.2.7 Підсистема керування наземним рухом і контролю за ним A-SMGCS

Система зовнішнього спостереження та керування рухом A-SMGCS на рівні аеропорту забезпечує безперервне спостереження за повітряними суднами та наземними транспортними засобами в зоні маневрування, формує єдину ситуаційну картину та підтримує диспетчера вежі при прийнятті рішень [6, 15, 16] (рис. 1.12). У структурі СУПР аеропорту ця підсистема є основним джерелом

достовірної інформації про місцеположення та рух об'єктів, що прямо впливає на безпеку і пропускну спроможність. Первинні дані надходять від комплексу РЛС і сенсорів спостереження, що забезпечують загальне радіолокаційне спостереження. Радьолокатор наземного контролю формує високодетальне спостереження за об'єктами на поверхні, ADS-B надає дані бортових передавачів про координати та ідентифікацію, MLAT визначає місцеположення за різницею часу приходу сигналів, у тому числі для цілей, де ADS-B недостатній або потребує підтвердження. Усі ці джерела генерують потоки які надходять до SDAU. Даний блок виконує роль інтерфейсного та нормалізаційного рівня: приймає дані з різних фізичних інтерфейсів, виконує первинну перевірку цілісності, буферизацію, синхронізацію за часом та перетворення до уніфікованого формату для подальшої IP-передачі в обчислювальний домен. Дані передаються по LAN у резервовану транспортну мережу, побудовану на зв'язці комутаторів основного та резервного. Наявність двох комутаторів ядра забезпечує підвищену надійність - відмова одного елемента або лінка не повинна призводити до втрати критичного потоку спостереження. У серверному домені системи розміщуються сервери які виконують функції обробки даних спостереження в реальному часі. На цьому етапі здійснюються фільтрація шумів, перевірка валідності, прив'язка вимірювань до часу, первинне формування треків та забезпечення відмовостійкості за схемою основний/резервний із механізмом перемикання [15, 16].

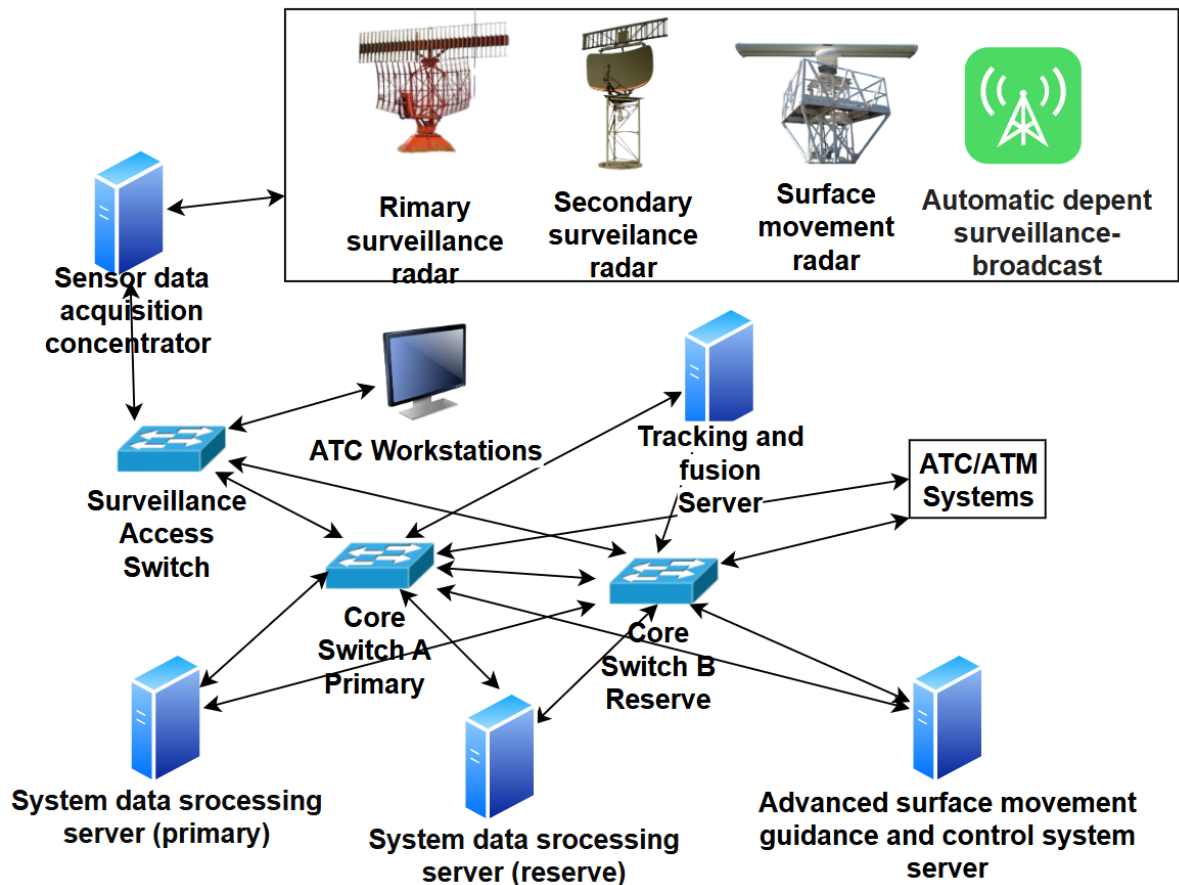


Рис. 1.12. Структурно-мережева схема підсистеми керування наземним рухом аеропорту і контролю за ним A-SMGCS

Результати роботи A-SMGCS подаються на ATC диспетчера у вигляді інтегрованої ситуаційної картини поверхні: положення цілей, вектори руху, позначення ідентифікації, статуси, попередження та контрольні індикатори. Паралельно дані та статуси передаються в ATM/ATC Systems для інтеграції з ширшими контурами управління[18].

1.3.2.8 Підсистема планування польотів та обробки повідомлень AFTN/AMHS

У типовій аеропортовій архітектурі система планування польотів та обробки повідомлень забезпечує обмін авіаційними повідомленнями між підрозділами аеропорту і зовнішніми адресатами (рис. 1.13). Її роль у СУПР аеропорту полягає у гарантованій доставці критичних повідомлень, які впливають на планування і виконання польотів такі як службові координаційні повідомлення та інша оперативна інформація. На практиці користувачі

працюють з повідомленнями через робочі місця AIS, MET, ATC, тощо., де оператор формує повідомлення, задає адресацію, пріоритет, тип і відправляє його у внутрішній домен повідомлень [5, 10, 11]. Так само на цих робочих місцях відображаються вхідні повідомлення, виконуються пошук, фільтрація та підтвердження отримання відповідно до процедур.

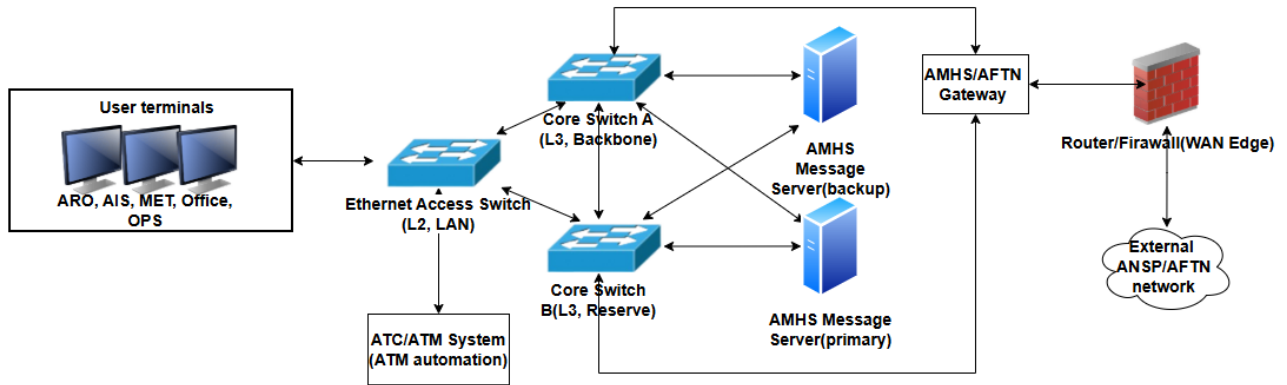


Рис. 1.13. Структурно-мережева схема підсистеми планування польотів та обробки повідомлень AFTN/AMHS

Передавання даних від робочих місць до серверної частини відбувається через локальну мережу, трафік з терміналів агрегується на комутаторі доступу, після чого передається на комутатор ядра. Обчислювальне ядро підсистеми формують основний сервер AMHS та резервний, які реалізують логіку обробки повідомлень прийом від клієнтів, перевірку формату, постановку у чергу, буферизацію і повторні спроби доставки, маршрутизацію за адресами, ведення журналів та архівів. Резервування дозволяє зберігати доступність при відмові одного сервера та виконувати обслуговування без зупинки сервісу. Саме на цьому рівні забезпечується ключова властивість підсистеми - контрольований життєвий цикл повідомлення від прийому до підтвердженої доставки або фіксації недоставки [11].

Для взаємодії з вузлами, що підтримують різні технології, використовується AMHS/AFTN Gateway, що забезпечує міжсистемне узгодження, маршрутизація у зовнішні домени та, за потреби, перетворення між AMHS та AFTN, щоб забезпечити сумісність із аналоговими вузлами. Далі

трафік проходить через фаєрвол, який забезпечує сегментацію, політики доступу, фільтрацію, а також організацію захищеного каналу до зовнішньої мережі. Через цей домен повідомлення доставляються адресатам за межами аеропорту, а вхідні повідомлення надходять у зворотному напрямку тим самим шляхом. У результаті AMHS/AFTN у складі СУПР аеропорту формує надійний цифровий контур повідомлень, який доповнює голосові канали, забезпечує стандартизований обмін критичною інформацією, її реєстрацію та контроль доставки

1.3.2.9 Суміжні органи управління повітряним рухом: диспетчерський орган підходу та районний диспетчерський центр APP/ACC

Диспетчерський орган підходу та районний диспетчерський центр є елементами зовнішнього домену провайдеру аеронавігаційного обслуговування у повітряному просторі країни або регіону та забезпечують диспетчерське обслуговування повітряного руху на етапах підходу та вильоту і маршрутизації районного центру управління повітряним рухом. Для аеропортової системи УПР ці підрозділи виступають суміжними центрами, з якими аеродромна диспетчерська вежа виконує координацію під час передачі відповідальності за повітряні судна, а також обмін оперативною інформацією. З погляду мережевої інфраструктури аеропорту APP/ACC доцільно розглядати як зовнішній вузол, доступ до якого здійснюється через периметр мережі АТС. У межах такого стику транспортуються два основні класи трафіку: голос координації та дані, внутрішню архітектуру. Диспетчерський орган підходу та районний диспетчерський центр APP/ACC у даній роботі не розглянуто, оскільки вона не є частиною аеропортової мережі [7, 28, 30].

1.4. Цілі і постановка задачі дослідження

Аналіз архітектури та функціонування систем зв'язку аеропорту в контурі управління повітряним рухом показує, що критичність сервісів визначається не стільки піковою пропускнуою здатністю, скільки передбачуваністю затримок, відмовостійкістю, керованою ізоляцією трафіку та здатністю до оперативного

відновлення після відмов. Саме тому мережева інфраструктура ATC/DCN має забезпечувати гарантовану якість обслуговування для різномірних підсистем (голос, дані, спостереження, повідомлення), які працюють одночасно та мають різні профілі навантаження і вимоги до надійності.

Аналіз підходів модернізації мереж аеропорту на основі SDN і NFV показує, що перехід до програмно-керованої інфраструктури створює технологічну основу для централізованого керування політиками, гнучкої сегментації, автоматизації конфігурації та підвищення операційної ефективності мережі, зокрема за рахунок автоматизації процесів управління і скорочення витрат на адміністрування. Водночас у межах СУПР ефект від мережевої модернізації буде обмеженим, якщо критичні підсистеми радіолокаційного спостереження даними не підтримуватимуть необхідну інтенсивність передавання в умовах завад, колізій та ризику перевантаження каналів. Окремо, для систем повітряного спостереження, зокрема вторинних радіолокаторів повітряного спостереження характерні особливі обмеження: бортовий транспондер як критичний вузол, колізії, повторні запити та вплив завад, що прямо впливає на пропускну здатність і стійкість каналу передавання даних спостереження. Це формує не менш важливу задачу поряд із модернізацією мережевої архітектури потрібно забезпечити оптимізовану, адаптивну передачу критичних потоків спостереження в SSR [22]. Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі дослідження:

1. Провести аналіз та формалізувати вимоги до мережі аеропорту в контурі СУПР. Визначити склад підсистем і типи інформаційних потоків, сформулювати узгоджені вимоги до якості обслуговування вхрваючи затримку, надійність, відмовостійкість, ізоляція трафіку, а також виділити вузькі місця традиційної архітектури, які обмежують керованість і прогнозованість сервісів. Необхідно систематизувати обмеження та вимоги до телекомунікаційної інфраструктури аеропорту в контурі СУПР, визначити фактори, що стримують масштабування, автоматизацію та модернізацію традиційних мереж.

2. Розробити архітектурні рішення модернізації мережі аеропорту та метод підвищення ефективності роботи LAN аеропорту за показниками

затримки на основі SDN/NFV. Запропонувати принципи побудови модернізованої LAN з централізованим керуванням, сегментацією та політиками якості обслуговування, а також визначити місця інтеграції віртуалізованих мережевих функцій, що забезпечують автоматизацію управління, підвищення керованості та операційної ефективності мережі. Виконати формалізацію моделі локальних мереж LAN_{ACCES} і базових мереж WAN_{CORE}, обґрунтувати механізми керування потоками, маршрутизацією та оцінювання часових характеристик доставки даних.

3. Побудувати модель оптимізації довжини інформаційного пакета для передавання даних спостереженняв радіолокаційних системах повітряного спостереження, зокрема вторинних раїдолокаторів состереження (SSR) та дослідити вплив параметрів каналу. Розробити адаптивний алгоритм ефективної швидкості передавання з урахуванням групування помилок, затримок, повторних запитів та відмов. Знайти оптимальну довжину пакета та чисельне визначення оптимуму. Встановити закономірності зміщення оптимальної довжини пакета при зміні показника групування помилок, потенційної швидкості та кількості повторів, отримати практично придатні діапазони налаштувань. Сформувати алгоритм, який узгоджено керує швидкістю передавання та параметрами пакетизації, оскільки зміна одного параметра істотно впливає на оптимальні значення інших. Синхронізувати реалізацію алгоритму як програмно-керованої функції в модернізованій SDN/NFV інфраструктурі для підвищення ефективної пропускної здатності та стійкості передавання даних у каналах SSR.

4. Виконати валідацію запропонованих рішень шляхом моделювання LAN мережі підсистем СУПРА. Провести імітаційне моделювання для отримання чисельних значень затримки, пропускної здатності, QoS, провести порівняння з традиційними підходами та виконати моделювання модернізованої мережі з SDN/NFV, зокрема у Mininet продемонструвати приріст ефективності, враховуючи вимоги доставки даних спостереження, де доцільне адаптивне керування параметрами передавання з урахуванням мережевих обмежень.

Кількісно оцінити отримані результати за ключовими показниками як підтвердження вирішення ключових проблем описаних в роботі.

Висновки до першого розділу

1. Сучасний аеропорт є критично важливою інфраструктурою, в структурі якої телекомунікаційні системи забезпечують безперервність операцій, підтримку польотів і взаємодію служб. Однак зростання трафіку, вимог до безпеки та інтеграції сервісів підсилює навантаження на мережу, яка історично будувалась як набір розрізнених підсистем. Це призводить до обмеженої масштабованості й складного управління через жорстку прив'язку до апаратних платформ(вендорів мережевого обладнання), фрагментацію доменів, неузгодженість конфігурацій і як наслідок - неефективне використання ресурсів, міждоменні затримки та ускладнену експлуатацію. Додатково зростають поточні операційні витрати на підтримку роботи мережевої інфраструктури через переважання ручного адміністрування мережі - це підвищує ризик помилок, уповільнює зміни та реагування на інциденти, а низька автоматизація й інерційна модернізація гальмують впровадження нових сервісів і QoS. Паралельно погіршується кіберстійкість через застарілі компоненти й неоднорідність протоколів, а масштабування в апаратно-орієнтованій моделі підвищує інвестиційні витрати на створення та купівлю мережевої інфраструктура та обладнання.

2. Перспективним напрямом модернізації є SDN, що відокремлює площину керування від передачі даних і забезпечує централізований програмний контроль, єдину політику, узгодженість конфігурацій та глобальну видимість мережевого стану для швидшої діагностики й проактивного управління ресурсами, ефективність цих рішень буде представлена в наступних розділах. SDN підвищує гнучкість за рахунок оперативної зміни маршрутів, пріоритизації й правил доступу, а також забезпечує сегментацію та ізоляцію доменів, локалізацію інцидентів і точніший контроль сервісів із жорсткими вимогами до затримок і доступності. Наявність API створює основу для автоматизації розгортання, реконфігурації та масштабування, зменшуючи поточні операційні

витрати на підтримку роботи мережевої інфраструктури і залежність від людського фактору, а аналітика майже в реальному часі допомагає виявляти вузькі місця та планувати ємність.

3. Логічним доповненням є NFV, яка переносить частину мережевих функцій зі спеціалізованого обладнання у VNF на стандартних платформах (маршрутизація, комутація, захист, балансування, сервісні голосові компоненти з урахуванням профільних вимог), що дає змогу швидко розгортати й масштабувати функції та скорочувати час відновлення шляхом перенесення або перезапуску компонентів. Водночас модернізація має бути гібридною: критичні фізичні елементи (антенно-фідерні системи, RF-тракт, радіонавігаційні та посадкові засоби) залишаються апаратними через вимоги надійності та сертифікації, тоді як керування, оркестрація та сервісні мережеві функції поступово переходять у програмно-віртуалізований контур. Синергія SDN NFV формує основу для автоматизованої доставки сервісів, динамічного масштабування, оптимізації маршрутів із мінімізацією затримок і кращого використання ресурсів, а економічна доцільність оцінюється за повним життєвим циклом із потенційним зниженням інвестиційних витрат на створення та купівлю мережевої інфраструктури та обладнання і скороченням поточних операційних витрат на підтримку роботи мережевої інфраструктури ті обладнання, враховуючи масштаб впровадження, критичність сервісів і вимоги резервування.

РОЗДІЛ 2.

РОЗРОБКА ПРОПОЗИЦІЇ ПОБУДОВИ МЕРЕЖІ УПРАВЛІННЯ ПОВІТРЯНИМ РУХОМ АЕРОПРОТУ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЙ SDN/NFV ТА ОЦІНКА ПОКАЗНИКІВ ЇЇ ФУНКЦІОНУВАННЯ

2.1 Аналіз архітектури мережі SDN та функціональних можливостей її елементів.

2.1.1 Передумови переходу традиційної інфраструктури до SDN/NFV в мережі управління повітряним рухом аеропорту

Система зв'язку сучасного аеропорту в контурі управління повітряним рухом є базовою інфраструктурою для обміну критичними даними між диспетчерськими центрами, засобами зв'язку та спостереження, навігаційними й метеорологічними підрозділами та службами аеродромного забезпечення. Ключовими вимогами такої мережі є не стільки пікова пропускну здатність, скільки гарантована передбачуваність затримок, стійкість сервісів, керована ізоляція трафіку та швидке відновлення після відмов. Традиційні аеропортові мережі будувалися на спеціалізованих закритих апаратно-програмних платформах різних виробників, через що інтеграція нових сервісів часто потребує глибокої модернізації або заміни обладнання [35-38]. Це спричиняє тривалі цикли впровадження, підвищує ризики змін і робить навіть прості оновлення (QoS, сегментація технологічного та ІТ-трафіку) масштабними через необхідність послідовної конфігурації численних мережевих вузлів. Додатково класичні рішення характеризуються «монолітністю» (передавання, управління, моніторинг і адміністрування жорстко прив'язані до фізичних пристроїв), що підсилює вендорну залежність і знижує гнучкість. При цьому мережа має одночасно обслуговувати диспетчерські голосові/дані, технологічну телеметрію, моніторинг, ІТ-сервіси та журнали кіберзахисту, а пріоритети повинні оперативно змінюватися відповідно до сценаріїв експлуатації.

У цьому контексті SDN і NFV є системною відповіддю на обмеження традиційної архітектури. SDN базується на логічно централізованому

управлінні, що дозволяє приймати рішення на основі цілісної картини стану мережі (використання ресурсів, відмовостійкість, політики безпеки, правила обслуговування) [39]. Для мережі управління повітряним рухом це забезпечує інженерно кероване гарантування пріоритетності критичних потоків, стабільність QoS і оперативне перемикання на резервні маршрути у разі відмов. NFV доповнює SDN, переносючи мережеві функції у віртуалізоване середовище як програмні компоненти на стандартних обчислювальних платформах, що зменшує залежність від спеціалізованого мережевого обладнання, спрощує масштабування та скорочує час введення сервісів. Поєднання SDN/NFV уніфікує керування фізичними й віртуальними елементами, знижує вендорну залежність і полегшує інтеграцію різнорідних компонентів у межах єдиної керованої архітектури.

Щодо архітектури - SDN передбачає чітке розмежування апаратного та програмного рівнів: апаратна частина забезпечує універсальні ресурси (живлення, охолодження, обчислення, пам'ять, базову комутацію), тоді як програмний рівень реалізує протокольні механізми, інтерфейси та моделі керування. Це дає змогу програмно змінювати політики сегментації, маршрутизації та пріоритизації трафіку відповідно до поточних вимог безпеки й режимів роботи. Відкритість SDN, взаємодія через відкриті API створює основу для інтеграції з системами експлуатаційного управління, моніторингу, кіберзахисту та сервісної підтримки, а також для впровадження спеціалізованих керувальних застосунків і автоматизації операційних процедур. Технологія NFV логічно доповнює SDN, забезпечуючи перенесення мережевих функцій у віртуалізоване середовище з можливістю їх реалізації у вигляді програмних компонентів на стандартних обчислювальних платформах. Такий підхід зменшує залежність від спеціалізованого апаратного забезпечення, спрощує масштабування та скорочує час введення нових сервісів в експлуатацію. Важливо, що поєднання SDN і NFV дозволяє абстрагуватися від конкретних фізичних технологій і типів обладнання: механізми управління як фізичними, так і віртуальними мережевими елементами уніфікуються, що знижує вендорну

залежність і полегшує інтеграцію різнорідних компонентів у межах єдиної керованої архітектури

Таким чином, перехід до SDN/NFV у мережі управління повітряним рухом аеропорту зумовлений потребою подолати інерційність і замкненість традиційних рішень, знизити вендорну залежність і скоротити цикли змін. Практично це забезпечує керовану пріоритизацію критичних потоків, централізований контроль QoS, маршрутизації та сегментації, прискорене відновлення після відмов і безпечну інтеграцію з наявними підсистемами в умовах гібридної інфраструктури перехідного етапу.

2.1.2 Архітектура SDN та функції її елементів у процесі вирішення задач управління СУПРА

Функціонування програмно-керованих мереж доцільно аналізувати через призму архітектурної організації SDN та ролі її складових у процесі оброблення запитів, що ініціюються користувачами. При цьому ключовий інтерес становлять ті компоненти системи, які безпосередньо впливають на керування навантаженням, розподіл ресурсів і прийняття керувальних рішень у реальному часі.

Слід підкреслити, що практичне впровадження SDN відбуватиметься в умовах тривалого співіснування з традиційними мережевими інфраструктурами. Це означає, що в єдиному інформаційному просторі одночасно функціонуватимуть сучасні програмно-керовані механізми та застарілі протоколи й технології, які залишаються критично важливими для підтримки безперервності сервісів [35–38]. За таких умов архітектура SDN повинна містити спеціалізовані засоби інтеграції, здатні забезпечувати взаємодію з мережами попередніх поколінь як в автоматичному, так і в напівавтоматичному режимах. Окрім цього, принципово важливою є можливість залучення людини-оператора до контуру керування для ручного формування політик обслуговування, встановлення пріоритетів використання мережеских ресурсів та виконання управлінських дій, які не піддаються повній формалізації. Узагальнену структуру такої системи та взаємозв'язки її основних компонентів наведено на

рис. 2.1. Запропонована модель архітектури відповідає рекомендаціям ONF TR-502 [40].

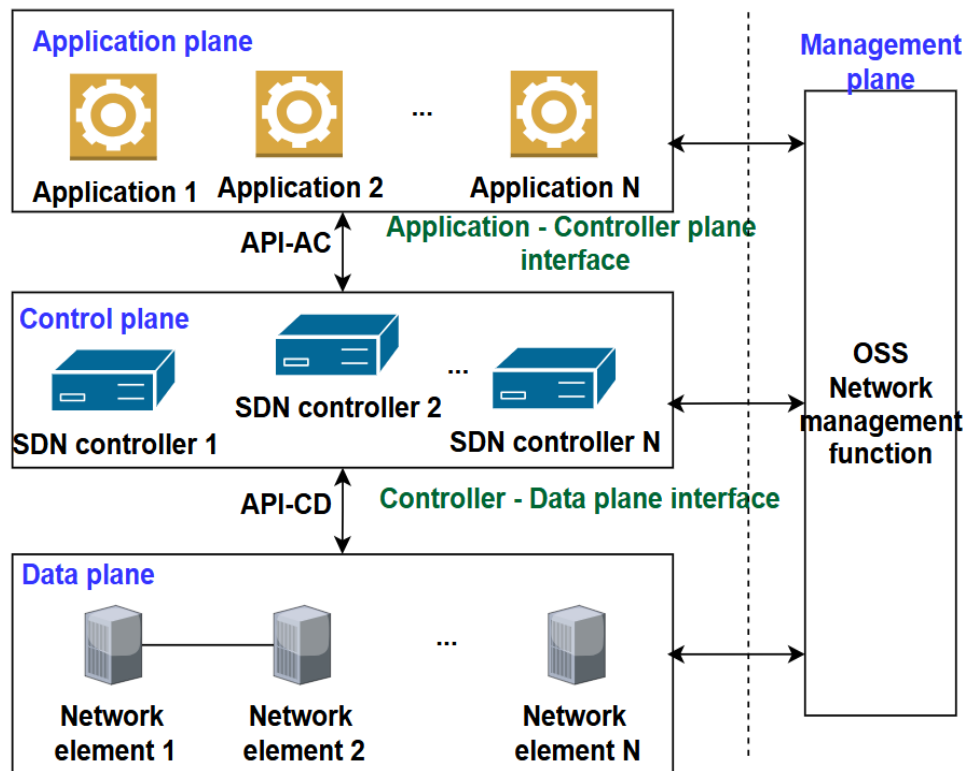


Рис. 2.1. Мережа SDN із функцією керування management (OSS)

Архітектура SDN може містити такі основні компоненти:

- площина даних (data plane);
- площина контролера (controller plane);
- площина застосунків (application plane);
- площина керування (management plane).

З функціональної точки зору архітектура SDN формується як сукупність кількох логічних площин, кожна з яких виконує визначене завдання у процесі керування мережею. До таких площин належать площина передавання даних, площина контролерів, площина прикладних застосунків та площина управління й інтеграції.

Площина передавання даних об'єднує мережеві елементи, що безпосередньо здійснюють оброблення й пересилання трафіку. Кількість таких елементів не є фіксованою та визначається масштабом і топологією мережі.

Кожен елемент розглядається як сукупність ресурсів, які можуть бути реалізовані як на основі фізичного обладнання, так і у віртуалізованому вигляді. У контексті SDN під ресурсами розуміють абстрактне подання продуктивнісних і функціональних можливостей базових мережевих компонентів, незалежно від їх апаратної природи.

Площина прикладних застосунків включає програмні модулі, призначені для реалізації різноманітних функцій у межах SDN-мережі. Частина цих застосунків орієнтована на надання сервісів кінцевим користувачам і не бере безпосередньої участі в процесах керування, проте сприяє зростанню кількості користувачів і, відповідно, економічних показників оператора. Інша група застосунків спеціалізується на розв'язанні окремих задач керування мережею; такі модулі мають горизонтальну модульну структуру, а їх кількість зростає в міру появи нових алгоритмів і методів управління. Саме ці застосунки безпосередньо залучаються до керування та ініціюються контролером SDN за потреби. Окрему роль відіграють застосунки, здатні частково виконувати функції контролера SDN, зокрема у режимах резервування або розподілу керувальних повноважень, однак їх робота завжди здійснюється під координацією основного контролера.

Кожен застосунок оперує власним набором ресурсів, над якими він має ексклюзивний контроль, проте доступ до цих ресурсів можливий лише в межах взаємодії з одним або кількома контролерами SDN. У процесі функціонування застосунки можуть ініціювати запити на виділення мережевих ресурсів, координувати свою діяльність через контролер, взаємодіяти між собою як опосередковано, так і безпосередньо, формувати вимоги до мережі під час розв'язання задач керування, а в окремих випадках — виконувати функції контролера SDN.

Площина керування представлена одним або кількома контролерами SDN, кожен з яких відповідає за управління визначеним доменом мережевих ресурсів у площині передавання даних та площині застосунків. Функціональні можливості контролера охоплюють збирання та аналіз інформації, необхідної для прийняття керувальних рішень, моніторинг стану мережевих елементів,

оброблення запитів прикладних застосунків, логічну ізоляцію їх роботи та організацію взаємодії між ними, контроль параметрів функціонування мережі, надання доступу людині-оператору з визначеним рівнем пріоритету, адаптацію керування до змін топології, навантаження й показників якості обслуговування, реалізацію процедур відновлення працездатності після збоїв, а також забезпечення обслуговування вхідних заявок відповідно до заданих вимог [39].

Взаємодія площини керування з іншими функціональними площинами здійснюється за допомогою відкритих програмних інтерфейсів. Для обміну інформацією з площиною передавання даних використовується інтерфейс A-CPI, тоді як зв'язок із площиною застосунків реалізується через інтерфейс D-CPI. Архітектурні принципи побудови та практичні реалізації цих інтерфейсів постійно розвиваються, а найбільш поширені з них розглядаються під час аналізу Open Network Operating System (ONOS), яка виступає базовим функціональним компонентом контролера SDN.

Окреме місце в архітектурі SDN займає площина управління (management plane), призначена для забезпечення сумісності програмно-керованих мереж із традиційними інфраструктурами, у складі яких застосовуються застарілі системи підтримки операцій класу OSS. Ця площина також реалізує механізми взаємодії з людиною-оператором і зазвичай використовується для інтеграції OSS старих мереж із контролером SDN, підключення оператора до засобів керування, виконання початкового налаштування мережевих елементів, а також закріплення окремих сегментів мережі за відповідними контролерами SDN.

Первинне розгортання та початкове конфігурування системи керування мережею на базі SDN фактично не може бути виконане повністю автоматично, тобто без залучення людини-оператора. На стартовому етапі виникає значний масив слабо формалізованих задач, які складно або неможливо алгоритмізувати. Окрім цього, частина управлінських рішень у мережі досягається не технічними, а організаційними процедурами. Саме тому під час первинного запуску SDN-контролера на оператора, як правило, покладаються такі функції:

- задання та коригування політик обслуговування користувачів;

- визначення межі контролю й керування, що делегуються SDN-застосункам;
- встановлення ресурсних обмежень на використання доступної інфраструктури;
- формування переліку параметрів, які мають підлягати постійному контролю та моніторингу.
- На прикладному рівні оператор переважно виконує налаштування:
- угод/контрактів щодо рівня сервісу (SLA);
- алгоритмічних процедур розв'язання задач керування;
- правил пріоритезації пристроїв у процесі спільного виконання керуючих функцій.

Додатково, на всіх рівнях SDN-архітектури оператор задає політику безпеки, що забезпечує коректну й захищену взаємодію розподілених функцій між собою.

2.1.3 Функціональна структура модульної площини управління

Управління мережевою системою будь-якого рівня складності, як правило, включає: отримання актуальної інформації про стан її елементів; фіксацію відхилень контрольованих параметрів від заданих (нормованих) значень; вироблення управлінських рішень щодо способів приведення характеристик мережі до необхідних норм; а також формування керувальних впливів (команд) для виконавчих компонентів. Для реалізації зазначених процедур у контурі керування мають бути передбачені функціональні елементи, на які покладаються відповідні ролі та обов'язки.

Відповідно до рекомендацій ONF TR-502, в архітектурі SDN доцільно виокремлювати такі функціональні блоки:

1. Агенти.
2. Координатори.
3. Віртуалізатори.
4. Бази даних ресурсів (RDB).
5. Менеджери (Manager).

Узагальнену структуру зазначеної системи подано на рис. 2.2. Аналіз цієї структури свідчить про необхідність уточнення: (а) місць розміщення функціональних елементів; (б) їх призначення та набору функцій; (в) логіки й порядку взаємодії між ними під час розв’язання задач керування.

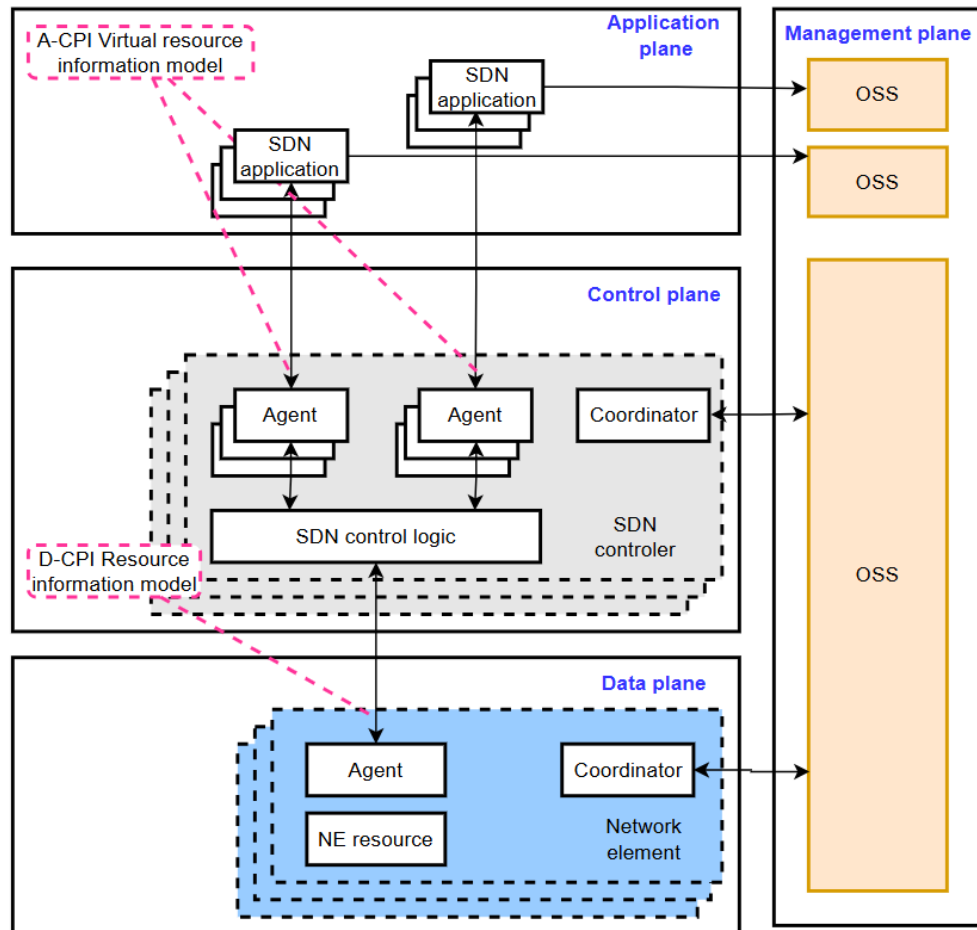


Рис. 2.2. Рекомендації ONF TR-502 щодо розміщення агентів і координаторів в архітектурі SDN

Далі розглянемо функціональне призначення блока «Агент». У загальному випадку агент асоціюється з контрольованим об’єктом (або групою об’єктів) і виконує роль первинного інструмента збору та попередньої обробки експлуатаційної інформації. Типовий перелік його функцій охоплює:

- виявлення та реєстрацію відмов мережевих елементів у межі зони відповідальності агента;
- збирання показників продуктивності підконтрольних елементів;

- накопичення статистики функціонування мережі (зокрема завантаження портів, параметри черг, часові затримки обслуговування);
- підготовку вихідних даних, необхідних для задач оптимізації параметрів роботи мережі;
- визначення факту та величини відхилення контрольованих параметрів від нормованих значень;
- оперативне інформування органу керування про зміну стану/параметрів контрольованого об'єкта.

При цьому слід підкреслити: набір обов'язків агента не є фіксованим і суттєво залежить від того, на якому рівні та в якій точці архітектури він розміщений. З огляду на це доцільно одразу формалізувати місце розташування агента шляхом введення відповідного індексу, а далі - уточнювати перелік задач, які він виконує в конкретному випадку. Виходячи зі схеми розміщення агентів і координаторів в SDN (рис. 2.2), можна виділити щонайменше дві групи:

1. Агенти, які розташовані на рівні додатків, та позначити їх як Агент

—

$$A_{AP\ i}, i \in (1, \overline{N}).$$

2. Агенти, які розташовані на рівні площини даних, та позначити їх як Агент —

$$A_{DP\ i}, i \in (1, \overline{N}).$$

Специфіка SDN-мереж полягає в тому, що функції агентного контролю мають реалізовуватися одночасно на кількох рівнях абстракції мережевої моделі. При цьому неприпустимо, щоб повнота або точність контролю залежали від природи підконтрольних об'єктів: агент може обслуговувати як фізичні мережеві компоненти, так і їх віртуалізовані аналоги, і в обох випадках якість керування повинна залишатися еквівалентною. Саме тому раціональним є включення до складу агента формалізованої моделі контрольованого об'єкта. За наявності такої моделі процедури моніторингу та обслуговування ресурсів - незалежно від

того, чи йдеться про віртуальні чи фізичні елементи - набувають уніфікованого характеру та не прив'язуються до конкретного виробника обладнання.

На рис. 2.3 представлено запропоновану функціональну організацію агентів, визначено рекомендовані позиції їх розміщення в архітектурі, а також відображено логіку взаємодії компонентів у межах розв'язання задач мережевого керування. Окрім цього, на схемі деталізовано функціональний блок ONOS, показано розташування координаторів, віртуалізаторів та інших елементів, задіяних у формуванні контуру управління.

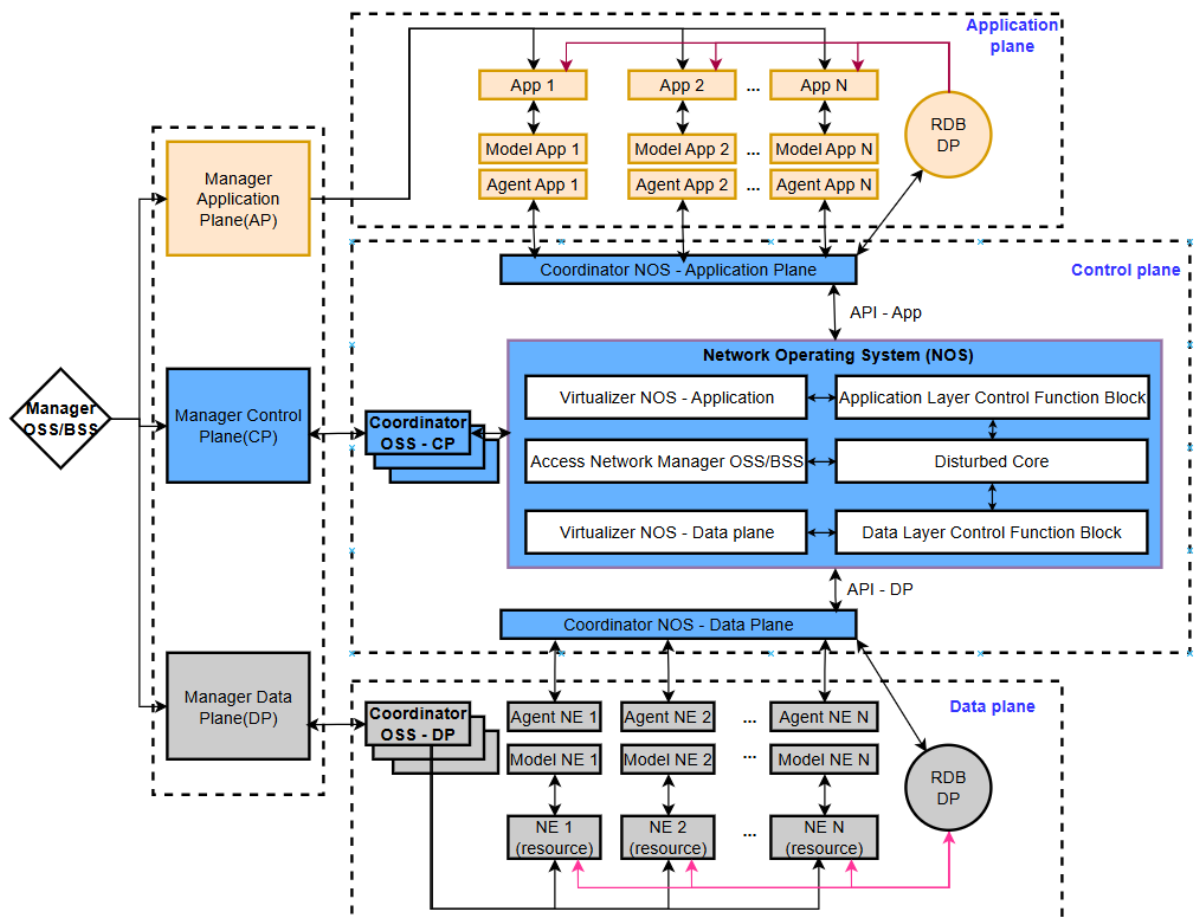


Рис. 2.3. Функціональна структура модульної площини керування

Координатор у складі SDN-архітектури доцільно розглядати як функціональний елемент «людина-в-контурі», через який оператор отримує можливість цілеспрямовано впливати на режими роботи мережі. Діючи від імені оператора, координатор забезпечує постановку та коригування вимог до політики обслуговування, зокрема зміну параметрів, що визначають правила керування трафіком і ресурсами. Передавання керувального впливу реалізується

шляхом доставки до мережевих компонентів керувальної інформації у формі моделей даних, що походять як із площини керування, так і з площини застосунків. Саме тому координаторні функціональні блоки доцільно розміщувати в різних частинах системи, залежно від того, які взаємодії мають бути забезпечені.

Окремо підкреслюється, що координатори відіграють ключову роль у забезпеченні сумісної роботи SDN-рівня керування з мережами попередніх поколінь, для яких характерне використання OSS/BSS-підходів. У цьому контексті всі координатори безпосередньо пов'язуються з рівнем Management OSS/BSS, оскільки саме цей рівень слугує джерелом керувальних команд, що надходять від оператора та повинні мати підвищений пріоритет у процесі виконання.

За ознакою розміщення та «пар» взаємодіючих площин/рівнів можна виокремити чотири типи координаторів:

1. Координатори взаємодії NOS і Application plane, розміщені на рівні Control plane; позначаються як координатори NOS-Application plane –

$$C_{\text{NOS_AP}b}, b \in (\overline{1, N}).$$

2. Координатори взаємодії OSS/BSS і Control plane, розміщені на рівні Control plane; позначаються як координатори OSS/BSS-Control plane –

$$C_{\text{OSS/BSS_CP}d}, d \in (\overline{1, N}).$$

3. Координатори взаємодії NOS і Data plane, розміщені на рівні Control plane; позначаються як координатори NOS-Data plane - $C_{\text{NOS_DP}w}, w \in (\overline{1, N}).$

4. Координатори взаємодії OSS/BSS і Data plane, розміщені на рівні Data plane; позначаються як координатори OSS/BSS-Data plane –

$$C_{\text{OSS/BSSDP}y}, y \in (\overline{1, N}).$$

Ключова частина функцій, пов'язаних із прийняттям та реалізацією керувальних рішень, зосереджується в координаторах, що належать до рівня Control plane. Поряд із ними важливим компонентом площини керування виступає віртуалізатор. У межах SDN-підходу віртуалізація забезпечує

формування та надання застосункам віртуальних (абстрактних) ресурсів, відокремлених від конкретної фізичної інфраструктури. При цьому SDN-контролер подає мережеві послуги прикладним модулям через екземпляр інформаційної моделі, яка узагальнено описує доступні ресурси та правила (політики) їх використання.

Віртуалізатор доцільно трактувати як функціональний об'єкт, що зберігає екземпляр такої інформаційної моделі ресурсів разом із відповідною політикою. Його створення ініціюється OSS/координатором окремо для кожного клієнтського застосунку. На цьому етапі OSS/координатор виконує розподіл ресурсів і задає політику, за якою віртуалізатор надалі надає послуги застосункам через API. Після цього віртуалізатор формує агента, до якого заноситься власний екземпляр інформаційної моделі доступних ресурсів і політики їх використання, необхідний для забезпечення сервісу конкретному застосунку.

Водночас керування настільки складною системою, як SDN, принципово неможливе без постійного контролю параметрів функціонування та стану її компонентів, оскільки саме ці відомості виступають вхідними даними для розв'язання задач керування. З цією метою організовується моніторинг елементів системи як на рівні Data plane, так і на рівні Application plane. Отримані результати моніторингу передаються для зберігання до розподіленої бази даних ресурсів (RDB). На основі накопичених у RDB даних формуються моделі віртуальних мережеских ресурсів і виконується переформування плану розподілу навантаження у випадках, коли параметри мережі виходять за межі встановлених норм.

2.1.4 Архітектура відкритої мережевої операційної системи ONOS для контролера SDN

Розглянемо засади формування архітектури відкритої мережевої операційної системи ONOS та ключові риси її побудови. У практиці опису SDN-рішень ONOS нерідко подають як «сам контролер SDN», що частково пояснюється її центральною роллю в реалізації функцій керування. Водночас

таке ототожнення є методологічно некоректним: SDN-контролер є композицією кількох функціональних складових, і ONOS виступає лише одним із цих блоків. Однак саме через те, що на ONOS зосереджуються інтелектуальні задачі керування мережею, її архітектура за логікою викладу та рівнями опису багато в чому корелює як із загальною архітектурою SDN, так і з архітектурою контролера як системи.

Варто підкреслити, що розроблення ONOS здійснюється в межах окремого проєкту ONF з відкритим вихідним кодом, який розповсюджується за ліцензією Apache 2.0 [41]. Крім того, системний опис платформи ONOS доступний у відкритих джерелах [42].

Відповідно до позиції ONF, ONOS орієнтована на формування рішень операторського класу, тобто таких, що забезпечують гнучке створення та розгортання динамічних мережевих сервісів і надають спрощені програмні інтерфейси для їх реалізації. При цьому платформа має підтримувати як задачі конфігурування, так і процеси керування мережею в реальному масштабі часу. Концептуально це дозволяє зменшити потребу у запуску традиційних протоколів керування маршрутизацією та комутацією безпосередньо всередині інфраструктури оператора.

На сучасному етапі окрему увагу приділяють пошуку підходів до оптимізації ONOS і підвищення ефективності її функціонування. Одним із можливих напрямів розглядається розміщення функціонального блока ONOS у хмарному середовищі, що потенційно надає кінцевим користувачам змогу створювати нові мережеві застосунки без необхідності модифікації площини даних.

Один із варіантів архітектурного виконання ONOS наведено на рис. 2.4. Зі схеми (рис. 2.4) випливає, що архітектура ONOS має модульну організацію. Така побудова забезпечує раціональне використання ресурсів, оскільки для кожного конкретного сценарію розгортання може бути підібрана оптимальна конфігурація - тобто необхідна підмножина модулів у відповідній кількості.

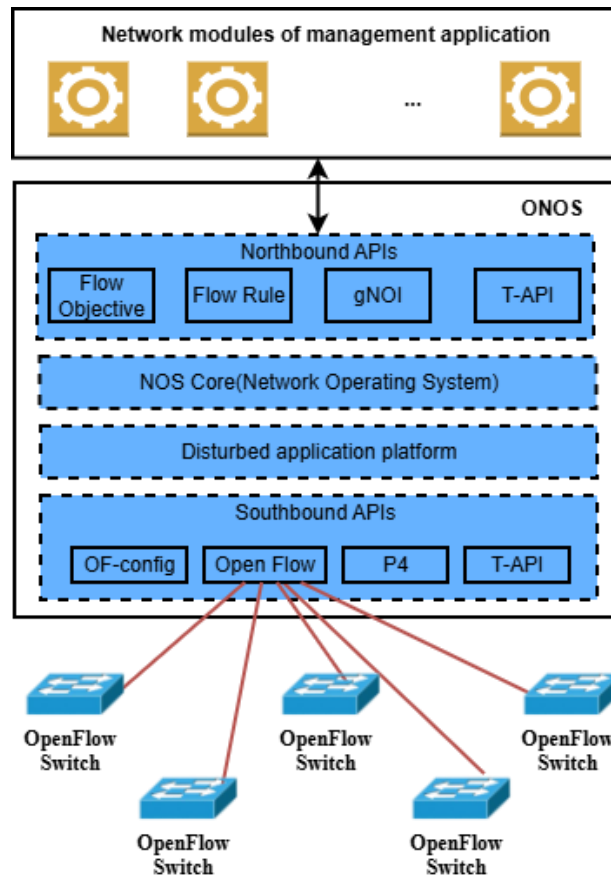


Рис. 2.4. Архітектура ONOS

Архітектурна ONOS концептуально складається з трьох взаємопов'язаних складових.

По-перше, це ядро відкритої мережевої операційної системи, на яке покладено виконання інтелектуальних функцій керування: вироблення керувальних рішень, підтримка глобального бачення мережі та реалізація логіки управління.

По-друге, у структурі ONOS передбачено платформу розподілених застосунків - сукупність прикладних модулів, що реалізують окремі задачі керування мережею. Така платформа формується як розширювана модульна система: кожен функціональний модуль відповідає за визначену управлінську функцію, а зі зростанням спектра задач (і, відповідно, вимог до керування) кількість задіяних модулів у складі платформи закономірно збільшується.

По-третє, ONOS спирається на відкриті мережеві інтерфейси, побудовані за типовою для SDN логікою поділу на два напрями взаємодії:

- південний інтерфейс (SBI) - набір модулів, що забезпечують зв'язок з площиною даних;

- північний інтерфейс (NBI) - набір модулів, призначених для взаємодії з функціональними блоками та сервісами рівня застосунків.

У складі SBI використовують набір протоколів і технологічних інтерфейсів, серед яких OpenFlow, OF-CONFIG, P4, T-API та інші. Доцільність і «вага» кожного з цих елементів визначається конкретними умовами функціонування мережі та вимогами до керованості. Для ілюстрації відмінностей розглянемо співставлення OF-CONFIG і OpenFlow.

OF-CONFIG (OpenFlow Management and Configuration Protocol) належить до класу протоколів конфігурації: він призначений для налаштування та керування операційним контекстом комутаторів OpenFlow. На відміну від нього, OpenFlow використовується як протокол керування процесом оброблення даних у комутаторах і маршрутизаторах, що реалізують технологію програмно-конфігурованих мереж, тобто фактично керує правилом проходження та обробки пакетів у робочому режимі.

При застосуванні OpenFlow передбачається, що комутатор вже пройшов попередню підготовку: заздалегідь задані базові параметри експлуатації, зокрема IP-адреси контролерів OpenFlow та інших мережевих компонентів. Натомість OF-CONFIG орієнтований саме на віддалене налаштування OpenFlow-комутаторів до введення їх у штатну експлуатацію; за характером операцій він працює повільніше, ніж OpenFlow, оскільки не прив'язаний до оброблення пакетів у реальному масштабі часу.

Типові приклади задач, що реалізуються OF-CONFIG - формування (підготовка) матриць/структур маршрутизації, які надалі використовуються OpenFlow під час оперативної обробки потоків, а також адміністративні операції на кшталт увімкнення чи вимкнення портів, що не є частиною процесу реального-часу пакетної обробки.

Важливо, що OF-CONFIG інтерпретує OpenFlow-комутатор через абстракцію логічного (віртуального) комутатора OpenFlow і дозволяє налаштовувати його параметри так, щоб SDN-контролер мав можливість

обмінюватися даними та здійснювати керування цим логічним комутатором через протокол OpenFlow. Додатково OF-CONFIG підтримує механізм динамічного закріплення ресурсів за конкретними логічними комутаторами: один фізичний комутатор може бути поділений на кілька віртуальних екземплярів із виділенням для кожного відповідної частки ресурсу. У результаті ONOS застосовує зазначені протоколи як інструменти взаємодії з площиною даних для реалізації задач мережевого керування.

У сучасних реалізаціях SDN-керування спостерігається зростання використання інструментів P4 та T-API. Їх дедалі частіше залучають до побудови мережевих моделей, які є базою для розв'язання задач керування. При цьому P4 у низці сценаріїв демонструє кращі показники ефективності порівняно з OpenFlow.

З погляду системної уніфікації доцільним є підхід, за якого набір відкритих інтерфейсів і протоколів ONOS формується як універсальний - придатний для всіх сегментів і типів елементів мережі. Така уніфікація створює передумови для побудови однорідних і масштабованих рішень, в яких досягається високий рівень взаємодії між компонентами та спрощується інтеграція різномірних технологій.

У разі застосування зазначеного підходу архітектура ONOS забезпечує низку практично значущих ефектів:

1. Спрощення процедур перевстановлення й оновлення програмного забезпечення на мережевих елементах.
2. Зниження витрат на впровадження нових технологій і сервісів у масштабі всієї мережі оператора.
3. Можливість поетапного нарощування переліку задач керування через додавання нових функціональних модулів до платформи розподілених застосунків.
4. Формування горизонтально масштабованої та відмовостійкої системи, що є критично важливим для виконання вимог надійності централізованих механізмів керування.

Виходячи з наведеного, можна визначити базові вимоги до архітектури ONOS. Насамперед, горизонтальна складова SBI має бути достатньо «широкою», оскільки доступ до базового мережевого обладнання здійснюється саме через ONOS. Отже, сукупність південних API повинна покривати повний цикл експлуатаційних операцій: налаштування, супровід і керування мережею.

Крім того, архітектура має передбачати багаторівневу систему застосунків і сервісів, що функціонують поверх ONOS. Рівень оперативності оброблення задачі доцільно визначати залежно від її пріоритетності та частоти використання. Зокрема, застосунки, які в аварійних режимах визначають головний керувальний функціональний блок і забезпечують реакцію на відмови мережевих елементів, мають бути максимально наближені до ядра ONOS і мати з ним безпосередній зв'язок. Натомість компоненти, що виконують процедури встановлення нового ПЗ, оновлення сертифікатів та конфігураційних параметрів і використовують у роботі OF-CONFIG, можуть бути розміщені на рівні з більшими допустимими затримками.

Ще одна принципова вимога полягає в забезпеченні одночасного двостороннього інформаційного обміну через NBI та SBI. Як показано на рис. 2.4, за допомогою NBI прикладні модулі використовують ONOS як інструмент керування мережевими елементами, тоді як через SBI «південні» модулі доставляють у ядро ONOS відомості про поточний стан базової мережі (рис. 2.4).

Зв'язок ядра ONOS з мережевими пристроями реалізується через набір протоколів і інтерфейсів (зокрема OpenFlow, OF-CONFIG, P4, T-API), які деталізують взаємодію з обладнанням та фактично екранують ядро ONOS і застосунки, що працюють поверх нього, від технологічної різноманітності мережевих платформ.

Ядро ONOS, у свою чергу, включає сукупність підсистем, кожна з яких відповідає за окремий аспект функціонування мережі. Для підтримання узгодженості в кластері кожна підсистема оперує власною сервісною абстракцією, що забезпечує поширення параметрів стану мережі між вузлами кластера.

2.1.5 Взаємодія SDN-мереж із традиційними системами управління TMN/OSS.

Впровадження програмно-керованих мереж SDN у практичних інфраструктурах не реалізується у форматі «повної заміни з нуля». У найближчому часовому горизонті SDN-сегменти тривалий період співіснуватимуть із традиційними мережами, які оператори продовжуватимуть експлуатувати десятиліттями. У зв'язку з цим до площини керування SDN висувається принципова вимога: забезпечити сумісність і керовану взаємодію з наявними системами управління, що базуються на концепції TMN (Telecommunications Management Network) - стандартизованій ITU-T архітектурі мережевого керування, де центральне місце займають OSS, а також передбачено участь людини-оператора у випадках, коли задачі не піддаються повній автоматизації.

На рис. 2.5 зображено стандартизовану концепцію/архітектуру керування телекомунікаційними мережами TMN. У межах традиційної парадигми TMN оператору надається сукупність сервісів управління, які забезпечують оптимізацію режимів роботи керованої мережі в реальному масштабі часу: від отримання поточного стану елементів до вироблення керувального впливу, передачі команд і отримання підтвердження їх виконання. Обмін управлінською інформацією організовується через TMN-інтерфейси та транспортну мережу DCN, що забезпечує доставку телеметрії й керувальних повідомлень відповідно до рівнів OSI. У даній моделі OSS виступає як «орган управління», реалізуючи функції прикладного рівня, тоді як робочі станції (WS) формують людино-машинний контур доступу до управління через відповідні інтерфейси.

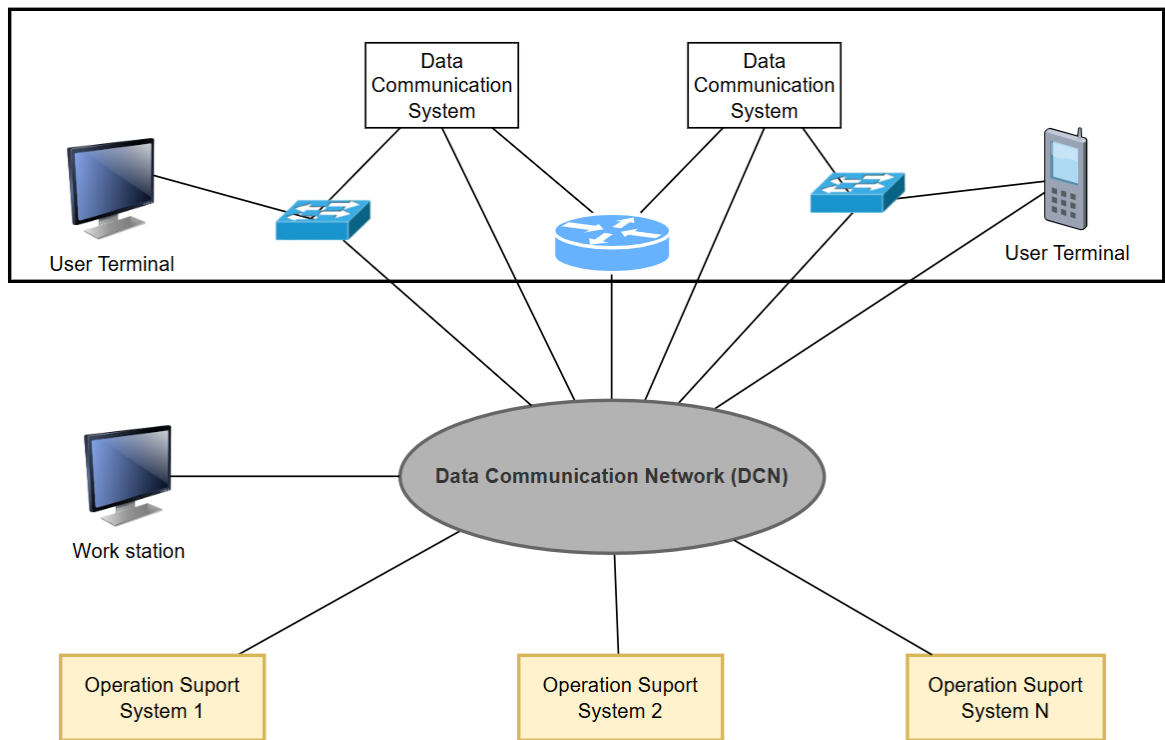


Рис. 2.5. Управління мережами згідно концепції TMN

З функціональної точки зору OSS зосереджується на безперервному контролі стану мережевих елементів, накопиченні та обробці статистики, побудові моделі поточного стану мережі, оцінюванні показників функціонування та їх зіставленні з нормованими значеннями. Окремим (і критично важливим) завданням є формування інформаційної моделі мережі та підтримання бази даних мережевого управління як структурованого набору відомостей про елементи, їхні взаємозв'язки й процедури отримання/надання даних.

Для мереж управління повітряним рухом аеропорту наведені положення мають безпосередню практичну релевантність. Значна частина телекомунікаційних підсистем (радіозв'язок, навігація, спостереження, інженерні та технологічні мережі) історично супроводжувалася класичними інструментами NMS/OSS. Отже, у такому середовищі SDN не може розглядатися як одномоментна повна заміна: першочерговим стає завдання безпечної інтеграції, за якої модернізовані сегменти отримують централізоване керування, але водночас коректно узгоджуються з наявним контуром TMN/OSS «старого парку».

Найбільш проблемним є саме рівень керування, оскільки потребує узгодження політик, пріоритетів та процедур реагування між SDN-контролером і традиційними системами, побудованими за TMN [44]. Додаткову складність створюють слабо структуровані задачі, характерні для аварійних режимів, деградації сервісів або нетипових конфігурацій: у таких ситуаціях рішення визначаються контекстом експлуатації, регламентами та відповідальністю персоналу, а тому не можуть бути повністю формалізовані. Саме з цієї причини в моделі взаємодії обґрунтовано розглядається участь людини-оператора як повноцінного елемента контуру управління.

У TMN-архітектурі операторська участь реалізується через WS та DCN, що забезпечує доступ до управлінської інформації та її інтерпретацію за допомогою людино-машинних інтерфейсів. Для SDN-площини керування це означає необхідність передбачити механізми контрольованого ручного втручання і процедури узгодження рішень SDN із вимогами OSS/BSS, зокрема в частині безпеки, SLA та пріоритезації.

З метою забезпечення взаємодії SDN з TMN-оточенням у площині керування SDN доцільно виділити спеціалізовані функціональні блоки: ФБ OSS (для інтеграції з традиційними OSS) та ФБ OPER (для взаємодії оператора з SDN-контролером у режимі ручного, неавтоматизованого керування) [43]. Функціональна логіка такого поділу полягає в наступному. ФБ OSS має забезпечити міжетехнологічну узгодженість систем керування та відповідність принципам TMN, включно з підтримкою взаємодії із системами операційної підтримки OSS. Натомість ФБ OPER орієнтований на реалізацію «операторського рівня» за аналогією з TMN: визначення областей контролю, виконання первинного налаштування мережевих елементів і конфігурування SDN-областей під час введення їх в експлуатацію. У прикладному аспекті це означає, що через ФБ OPER оператор може задавати політики контролю, ресурсні обмеження та перелік параметрів моніторингу, а на рівні застосунків - визначати SLA, алгоритми управління та пріоритети пристроїв у спільних сценаріях роботи.

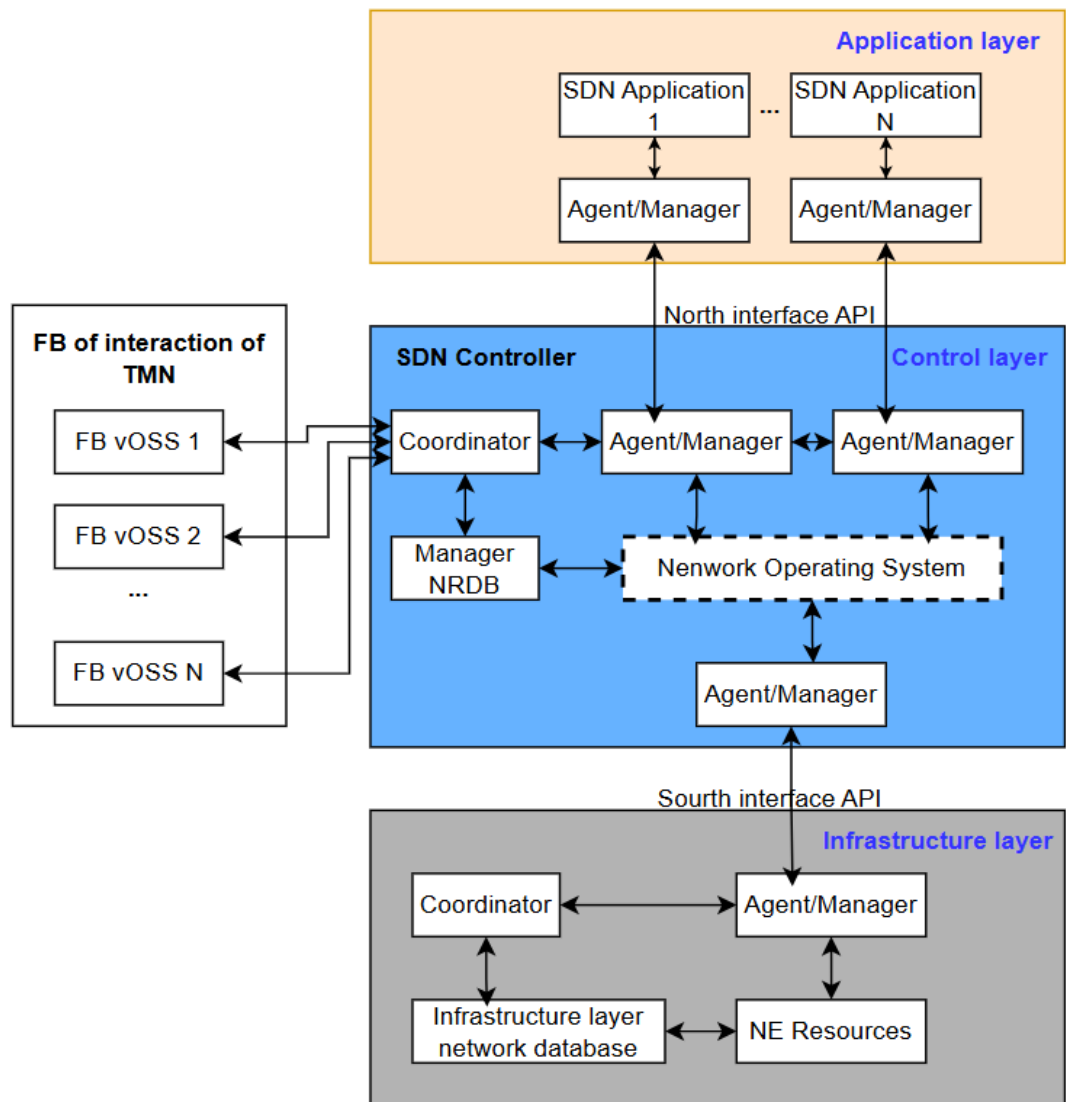


Рис. 2.6. Модель взаємодії площини управління SDN і систем управління TMN

У межах запропонованої схеми взаємодії площини керування SDN із системами TMN, наведеної на рис. 2.6, визначальну роль відіграють три взаємопов'язані компоненти: інтеграційний блок TMN (із механізмом віртуальних копій OSS), координатор та база даних мережевих ресурсів, що містить актуальний екземпляр інформаційної моделі. Зокрема, FB of Integration of TMN використовується як інтерфейс зв'язку між SDN-контролером і елементами TMN-керування; при цьому наявність віртуалізованих копій OSS (FB vOSS) розглядається як засіб узгодження та «стиковки» різних підходів до управління в одному гібридному середовищі (рис. 2.6).

Функціональний елемент Coordinator у цій моделі трактується як багатопризначений механізм [45], що забезпечує взаємодію між мережевими доменами та елементами різних технологій, а також формує канал прямого керувального впливу оператора на мережеву операційну систему. Це дає змогу оперативно коригувати вимоги та правила функціонування (параметри QoS, політики безпеки тощо), що є особливо значущим у надзвичайних ситуаціях. Для аеропортової мережі управління повітряним рухом така властивість є критичною, оскільки режими роботи здатні змінюватися стрибкоподібно (пікові навантаження, деградація каналів, аварійні сценарії), а корекція політик має відбуватися швидко, проте в контрольований і формалізований спосіб.

Інформаційною основою прийняття керувальних рішень у гібридній інфраструктурі виступає NRBD (Network Resources Database). У ній фіксується поточний екземпляр інформаційної моделі ресурсів, що відображає можливості як фізичних, так і віртуальних елементів; доступ до цієї моделі реалізується через агентів підлеглого рівня. Зазначений підхід фактично формує уніфікований спосіб опису ресурсів і, як наслідок, створює умови для узгодженого планування розподілу навантаження та застосування політик використання ресурсів одночасно в SDN-контурі та в традиційній системі керування (рис. 2.6).

Окремим елементом моделі є FB OPER, який вводиться для забезпечення участі людини на будь-якому етапі експлуатації, зокрема тоді, коли відсутні або недостатні програмні механізми автоматичного розв'язання нетипових ситуацій. У межах FB OPER оператор отримує можливість: коригувати інформаційну модель, змінювати політики використання ресурсів, модифікувати програми мережевої операційної системи, а за потреби - ініціювати впровадження додаткових протоколів. Для мереж управління повітряним рухом це є принциповим, оскільки вимоги до надійності та керованості зумовлюють необхідність моделі «автоматизація + оператор», а не повної автономності.

Таким чином, взаємодію SDN із TMN/OSS у гібридному середовищі можна звести до трьох базових положень:

1. Забезпечення сумісності контурів керування через інтеграційні блоки та зв'язок із OSS як ключовим елементом традиційної парадигми;

2. Використання спільної інформаційної основи у вигляді NRBD, що адекватно відображає фізичні та віртуальні ресурси й дозволяє формувати узгоджені керувальні рішення;

3. Наявність оператора в контурі керування через FB OPER як механізму контрольованого ручного втручання, необхідного для початкового введення в експлуатацію, міждоменої координації та розв'язання нестандартних ситуацій, де автоматизація є обмеженою.

У сукупності наведена модель задає методологічну базу поетапної модернізації мережі управління повітряним рухом аеропорту: SDN-сегменти можуть поступово розгортатися і масштабуватися без руйнування чинних TMN/OSS-процесів, тоді як інтеграційні блоки та координатор забезпечують керовану й формалізовану взаємодію між « новою » та « традиційною » площинами управління (рис. 2.6).

2.2 Методи оцінки якості функціонування базових і локальних мереж системи управління повітряним рухом аеропорту по показнику затримки даних в мережі

2.2.1 Перший етап, формалізація моделі системи телекомунікацій СУПРА

Аналіз сучасного стану системи телекомунікацій аеропорту, який був проведений в першому розділі, дозволяє зробити висновок, що вона складається з набору локальних мереж LAN. Ці LAN різного призначення. При цьому їх можливо поділити на локальні мережі доступу LAN_{ACCESS} і базові мережі WAN_{CORE} .

Призначення локальних мереж доступу LAN_{ACCESS} є забезпечення операторам і диспетчерам зв'язу для вирішення завдань управління елементами повітряного транспорту. Ці LAN_{ACCESS} ми можемо розглядати як типові, які побудовані за одними принципами з урахуванням особливостей функціонування той чи іншої групи операторів і диспетчерів.

Базові мережі WAN_{CORE} призначені об'єднати LAN_{ACCES} і забезпечити взаємодію різних груп операторів і диспетчерів між собою. Крім того, керівники і оператори органів управління аеропортів за допомогою WAN_{CORE} можуть отримати зв'язок з операторами будь якої точкой державного управління.

Ефективність функціонування LAN_{ACCES} і WAN_{CORE} залежить від технології, яка буде вибрана для той чи іншої мережі, а також від принципу керування потоками.

На данному етапі в роботі запропоновано оцінювати рівень підвищення ефективності функціонування мережі управління аеропортом два наступних практично значущих показника:

1. Рівень затримки передавання кадрів/пакетів;
2. Фактична швидкість передачі корисних даних.

Обидва показники істотно залежать від технології доступу/комутації та ступеня завантаженості каналу. Тому необхідно виконати порівняльний аналіз LAN-технологій і урахувати, що наявність централізованого керування і інтелектуального SDN-контролера дає змогу адаптивно обирати режим роботи каналів взаємодії в мережі залежно від поточного навантаження та забезпечити високу ефективність функціонування мережі системи управління повітряним рухом аеропорту.

На рис.2.7 запропонована узагальнена архітектура мережі СУПРА, яка є першим кроком формалізації моделі мережі з метою зробити її математичний опис і отримати чисельні показники функціонування.

Як ми бачимо, на рис. 2.7 запропоновано два типу мережі WAN_{CORE} різного призначено і де кілька мереж LAN_{ACCES} . В роботі буде зроблено акцент на мережах LAN_{ACCES} двох типів, які суттєво впливають процес функціонування СУПРА.

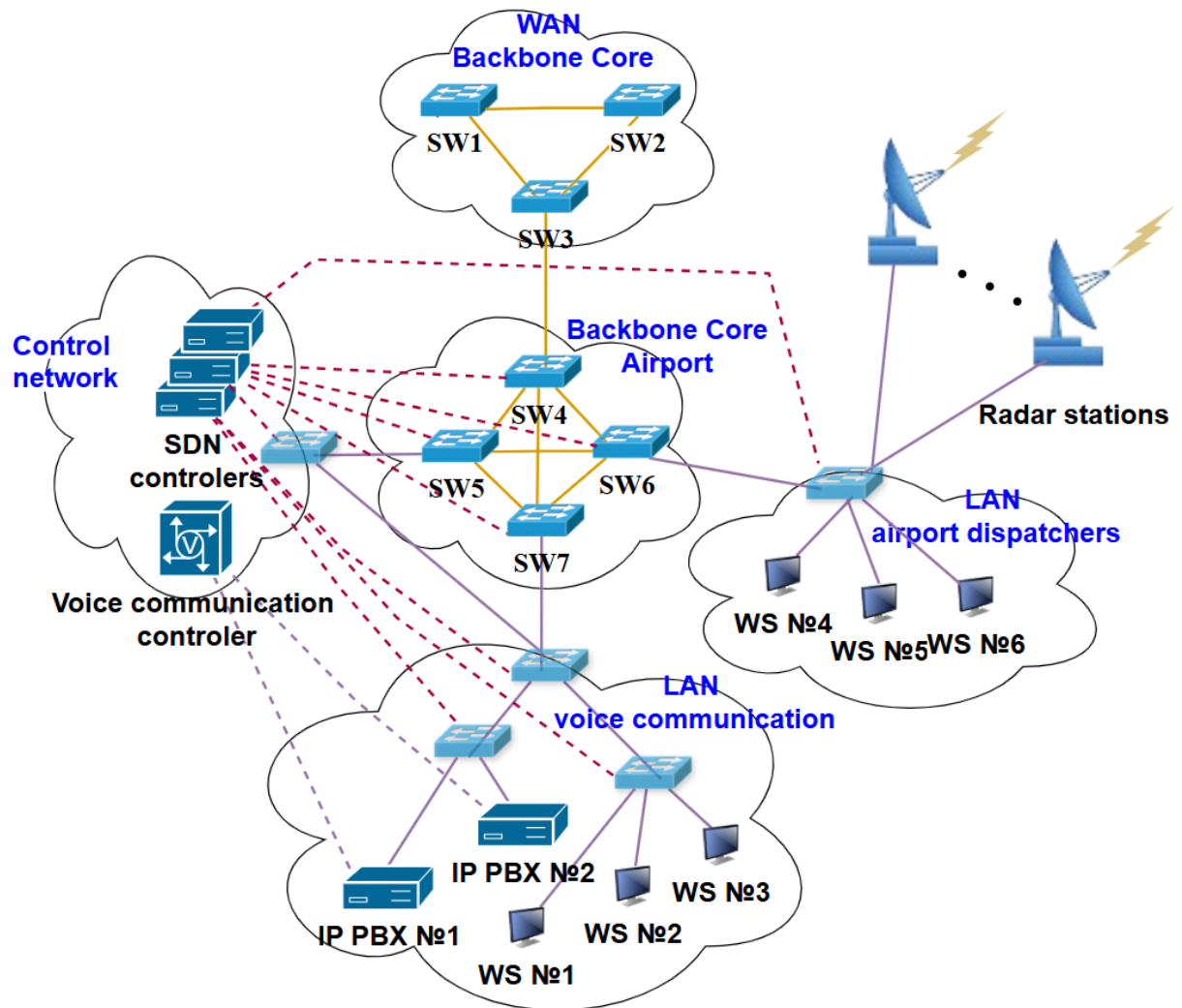


Рис. 2.7. Узагальнена запропонована архітектура мережі СУПРА

2.2.2 Аналіз технології побудови локальних мереж LAN_{ACCES} СУПРА

Для побудови локальних мереж СУПРА ми можемо використовувати різновиди технології Ethernet і різновиди кільцевих технологій. С початку розглянемо LAN_{ACCES} на базі технології Ethernet.

Ethernet є одним із найпростіших і найдешевших стандартів. Однак ми можемо використовувати два принципово різні варіанти:

- Ethernet на розділюваному середовищі CSMA/CD;
- комутований Ethernet.
- Ethernet з централізованим управлінням і сегментванням.

При використанні технології Ethernet на розділюваному середовищі усі вузли мережі спільно використовують одну фізичну середу передавання даних. Мережа будується за топологією спільної шини. Типовий варіант - усі

комп'ютери під'єднані до спільного середовища, каналу. Для керування доступом у Ethernet використовується CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection - множинний доступ із контролем несучої та виявленням колізій).[39] Тут можливі колізії.

Особливість технології комутованого Ethernet в тому, що розділюване середовище не використовується, а мережа будується на комутаторах, з'єднаних дуплексними каналами. Топологія типу дерево і між будь-якими двома вузлами існує рівно один шлях.

Топологічні обмеження (деревоподібна структура зв'язків) пов'язані зі способом побудови таблиць пересилання комутаторами Ethernet і принципом роботи алгоритму прозорого моста.[46] Фактично, якщо використовується дуплексна передача, колізії не відбуваються: для обміну двох пристроїв комутація створює віртуальний канал «точка-точка» («мікросегмент»). Вважається, що дуплексний Ethernet може забезпечити 100% ефективність використання каналу в обох напрямках[47]. Є ще варіант швидкісного Ethernet. З початку це була швидкість 10 Мбіт/с, а потім 100 Мбіт/с, 1 Гбіт/с і 10 Гбіт/с.[46] Технології Ethernet продовжують розвиватись і мають добрі перспективи.[47]

2.2.3 Аналіз технології побудови локальних LAN_{ACCES} і базових мереж WAN_{CORE} СУПРА кільцевої структури

Мережі кільцевої структури КС, як і Ethernet, мають розділюване середовище, але воно утворене каналами, що з'єднують станції в кільце. Кільце розглядається як спільний ресурс, і доступ до нього здійснюється детерміновано через надання станціям права користування кільцем у визначеному порядку. Технологія кільцевої структури КС складніша за Ethernet, проте має властивості відмовостійкості.

Для керування доступом по кільцю передається маркер (токен), який дозволяє станції-власнику передавати дані. Кожна станція формує розрив кільця. Маркер передається по кільцю від однієї станції до іншої; якщо станції потрібно передати інформацію, вона захоплює маркер і починає передавання даних.

2.3 Метод оцінки часу затримки інформації на рівні LAN_{ACCES} локальних мереж СУПРА

2.3.1 Метод оцінки часу затримки інформації на рівні LAN_{ACCES} при використанні Ethernet в розподілюваному середовищі

Однією з найважливіших характеристик мережі СУПРА є час затримки інформації в системі керування. Для оцінювання розглянемо залежність затримки передачі та фактичної швидкості корисних даних від ступеня завантаженості каналів. Для оцінки QoS проаналізуємо механізмів утворення черг у мережевих пристроях і фактори, що впливають на довжину черги за допомогою методів теорії ймовірностей та математичної статистики.

Для розрахунків скористаємось теорією масового обслуговування - теорією черг.: Розглянемо механізм формування потоків заявок на обслуговування, довжину чергі та тривалість очікування у черзі. Для рішення такого роду завдань Д. Кендалл [48,49,50] запропонував використовувати запис типу $A/B/p/R$, де A - розподіл інтервалів між заявками, B - розподіл часу обслуговування, p - кількість каналів, R - гранична кількість заявок у черзі/системі. Типи розподілів: M (показовий), E_r (ерланг r -го порядку), D (детермінований), H_k (гіперекспоненційний), G (довільний). При $R \rightarrow \infty$ четвертий параметр опускають. Для подальших розрахунків доцільно використовувати модель $M/G/1$ яка означає одноканальну СМО з вхідним потоком Пуассона, довільним розподілом часу обслуговування та необмеженою чергою.

Спільне використання каналу породжує: електричні проблеми (рівень сигналів при багатьох приймачах/передавачах), та логічні (поділ доступу в часі). При зростанні кількості вузлів пропускна здатність ділиться між усіма, а економічність структури компенсується втратою продуктивності. В Ethernet використовується доступ згідно з алгоритмом CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection). З ростом навантаження корисна пропускна здатність різко падає.

У разі випадкового доступу (Multiple Access) кожен вузол передає інформацію, коли він вважає, що середовище вільне. Усі вузли спільно

використовують одну середу та топологію «шина». Станція починає передачу після виявлення вільного каналу. Колізії можливі через скінченний час поширення сигналу t . Для коректної роботи потрібно щоб $t \ll m$, де m - час передавання кадра.

Час передавання кадра залежить від його розміру V_f кадра і визначається:

$$m = \frac{V_f}{R} \quad (2.1)$$

де R - швидкість передавання інформації.

Розмір кадра V_f складається із заголовка V_h (в Ethernet 26 байт) і корисних даних V , у межах від 46 до 1500 байт:

$$V_f = V + V_h \quad (2.2)$$

Тоді підставляємо вираз (2.1) в вираз (2.2) та отримаємо:

$$m = \frac{V_f}{R} = \frac{V + V_h}{R}$$

Якщо сталася колізія й передавання зупинено, повторна спроба виконується через випадковий інтервал - час передавання V_d біт, де $V_d \in (0; 2^i)$, а i - кількість повторних передавань.

Процеси в локальних мережах із розділюваним середовищем описує модель СМО G/M/1 [50]. Розділюване середовище відповідає обслуговувальному пристрою, а кадри кожного користувача (комп'ютера) - заявкам, черга фактично розподілена по комп'ютерах. На рис. 8 наведено найпростішу модель черги M/G/1.

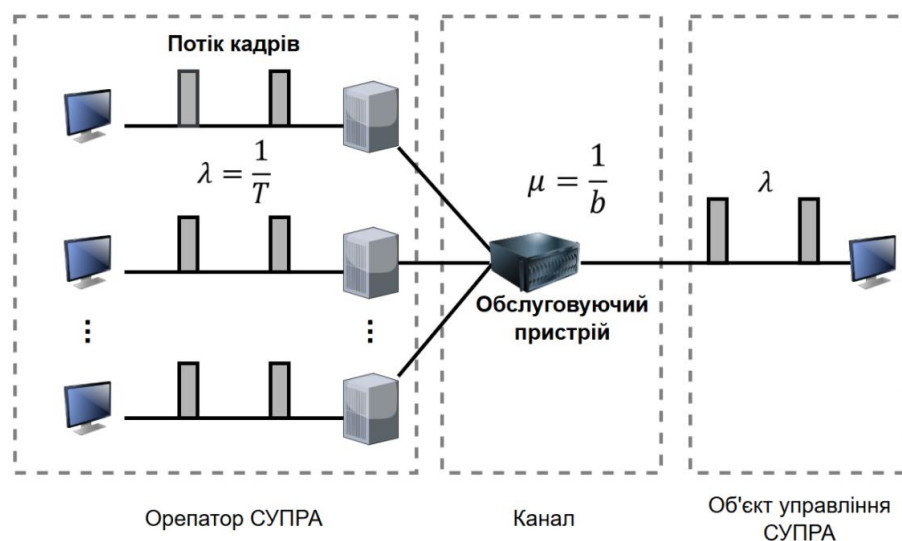


Рис. 2.8. Модель M/G/1 для Ethernet на розділюваному середовищі

Модель включає: вхідний потік заявок, нескінченний буфер станції-відправника, обслуговувальний пристрій та вихідний потік. Заявки надходять у випадкові моменти: якщо буфер порожній і пристрій вільний - обслуговуються одразу (час обслуговування випадковий), якщо пристрій зайнятий - очікують у буфері; після обслуговування заявка виходить, а пристрій бере наступну з буфера; якщо буфер не порожній, формується черга з дисципліною FIFO (First-In, First-Out). Теорія черг дозволяє визначати середню довжину черги та середній час очікування [48], де навантаження каналу задається інтенсивністю потоку λ . Тоді середній час перебування заявок у черзі можна записати як:

$$t_w = \frac{N_w}{\lambda}$$

Де:

λ - інтенсивність надходження заявок,

N_w - середня кількість заявок у черзі.

У загальному вигляді середня кількість заявок у черзі обчислюється:

$$\overline{N_w} = \sum_{i=n+1}^{n+m} (i - n) \cdot P_i$$

де:

n - кількість каналів обслуговування,

m - кількість місць у черзі,

P_i - імовірність того, що в системі перебуває i заявок.

Зв'язок між t_w та N_w для будь-якої СМО за будь-яких законів розподілу та дисципліни обслуговування задає формула Літтла [51]:

$$\overline{N_w} = \lambda_{\text{эф}} \cdot \overline{t_w}$$

де

$\lambda_{\text{эф}}$ - ефективна інтенсивність надходження заявок у систему. Якщо відома імовірність зайнятості всіх каналів і всіх місць у черзі, можна знайти інтенсивність втрат:

$$\lambda_L = \lambda \cdot P_{m+n}$$

та ефективну інтенсивність:

$$\lambda_{\text{эф}} = \lambda - \lambda_L$$

За умови, що довжина черги прямує до нескінченності (система без втрат), втрати відсутні, тому:

$$\lambda_{\text{эф}} = \lambda$$

Для одноканальної СМО з необмеженою чергою, простим потоком заявок і довільним часом обслуговування $((M|G|1):(GD|\infty|\infty))$ застосовується формула Поллачека-Хінчина [52]:

$$\overline{N_w} = \frac{\rho^2(1+\vartheta_\mu^2)}{2(1-\rho)} \quad (2.3)$$

де

$$\rho = \lambda \cdot M[t_\mu]$$

$$M[t_\mu] = \frac{1}{\mu}$$

$M[t_\mu]$ - математичне сподівання часу обслуговування;

ϑ_μ^2 - коефіцієнт варіації часу обслуговування;

$$\vartheta_\mu^2 = \frac{D[t_\mu]}{M[t_\mu]}$$

$D[t_\mu]$ - дисперсія часу обслуговування. Оскільки в цій системі час обслуговування є детермінованим ($D = 0$), отже підставляємо це в вираз (2.3) та маємо:

$$\overline{N_w} = \frac{\rho^2}{2(1-\rho)}$$

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu}$$

Параметр ρ - відношення інтенсивності надходження заявок до інтенсивності їх обслуговування, тобто показник завантаженості системи:

$$\lambda = \rho \mu$$

Тоді середній час очікування як функція завантаження:

$$t(\rho) = \frac{\rho}{2 \cdot \mu \cdot (1 - \rho)}$$

Якщо обслуговувальний пристрій має інтенсивність μ , а середній час обслуговування однієї заявки дорівнює b , то:

$$\mu = \frac{1}{b}$$

$$t(\rho) = \rho \cdot \frac{b}{1 - \rho}$$

Для отримання аналітичного результату часто припускають, що час обслуговування - це випадкова величина з пуассонівською щільністю розподілу; такі припущення дають простий вираз для середнього часу очікування заявки в черзі.

Параметр ρ називають коефіцієнтом використання обслуговувального приладу. Для будь-якого інтервалу часу це відношення часу зайнятості приладу до тривалості інтервалу [53]. Знайдемо середній час обслуговування заявки b як суму часу успішного передавання кадра t_v та міжкадрового інтервалу IPG (Inter Packet Gap), який обов'язково витримується, щоб запобігти монопольному захопленню лінії одним передавачем:

$$b = t_{IPG} + t_v \quad (2.4)$$

Міжкадровий інтервал в Ethernet відповідає часу передавання 96 біт, тому:

$$t_{IPG} = \frac{96}{R}$$

де:

R - швидкість передавання даних.

За колізій:

$$t_v = m + I \cdot t_d + m \cdot I$$

де:

t_d – затримка при колізії; у Ethernet вона вибирається випадково з діапазону $V_d \in [0; 2^l]$

Далі потрібно знайти I , з параметром n (де n - імовірність успіху, а $(1-n)$ - імовірність колізії). Тоді середня кількість повторних спроб:

$$I = \sum_{k=1}^{\infty} kn(1-n)^{k-1} = \frac{1}{n}$$

Ймовірність успішної передачі при $k \gg 1$ станціях і намірі передачі p в інтервалі $2t$:

$$n = kp(1 - p)^{k-1}$$

Максимум $n(p)$ досягається при $p_0=1/k$; за $k \gg 1$ маємо межу:

$$n_{\max} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 - \frac{1}{n}\right)^{n-1} = e^{-1}$$

Таким чином:

$$n_{\max} = e^{-1}$$

$$I = \frac{1}{n} = e$$

Отже підставляємо ці данні в фіраз (2.4), і отримуємо час успішного передавання:

$$t_v = m + e \cdot t_d + m \cdot e$$

Час очікування t_d беремо для найгіршого випадку: $t_d = 2^l$. Тоді період успішного передавання кадра:

$$b = t_{\text{IPG}} + t_v = \frac{96}{R} + m + e \cdot t_d + m \cdot e$$

Підставляючи це у формулу $t(\rho)$, отримуємо:

$$t(\rho) = \rho \cdot \frac{\frac{96}{R} + m + e \cdot t_d + m \cdot e}{1 - \rho} \quad (2.5)$$

Отже виходячи с виразу (2.5) будуємо графік залежності часу очікування кадра від завантаженості мережі; для прикладу береться пакет середнього розміру 800 байт і швидкість 10 Мбіт/с.

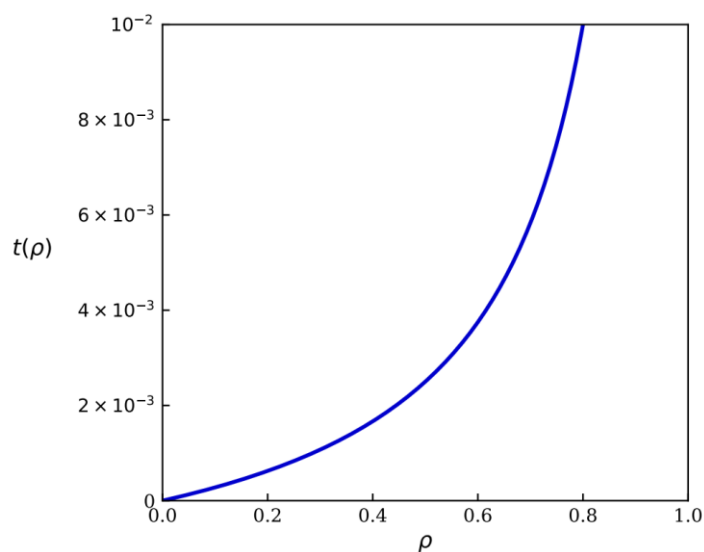


Рис. 2.9. Залежність часу затримки передавання від завантаженості мережі для технології Ethernet на розділюваному середовищі

Як видно з графіку параметр ρ є вирішальним для формування черги, при ρ близько нуля затримка майже нульова, при наближенні ρ до 1 - росте різко й нелінійно аж до нескінченності. Із графіка(рис. 2.9) випливає, що переламний момент для CSMA/CD при $\rho \approx 0,6$, після якого затримка кадра починає різко зростати навіть при помірному перевантаженні. Для користувача важливіше не затримка, а фактична швидкість передавання, яка завжди нижча за пропускну через службові поля й додаткові затримки.

Вважаючи, що затримка кадра дорівнює періоду передавання одного кадра T , частота проходження кадрів через мережу складає:

$$f = \frac{1}{T}$$

Знаючи f і обсяг корисної інформації V_n у бітах, фактична швидкість передачі інформації:

$$R_\Phi = V \cdot f = V \cdot \frac{1}{\rho \cdot \frac{\frac{96}{R} + m + e \cdot t_d + m \cdot e}{1 - \rho}} \quad (2.6)$$

Щоб оцінити зміну швидкості залежно від завантаження, посилаючись на вираз (2.6), побудуємо графік функції $Y_{\text{ппс}}(\rho)$:

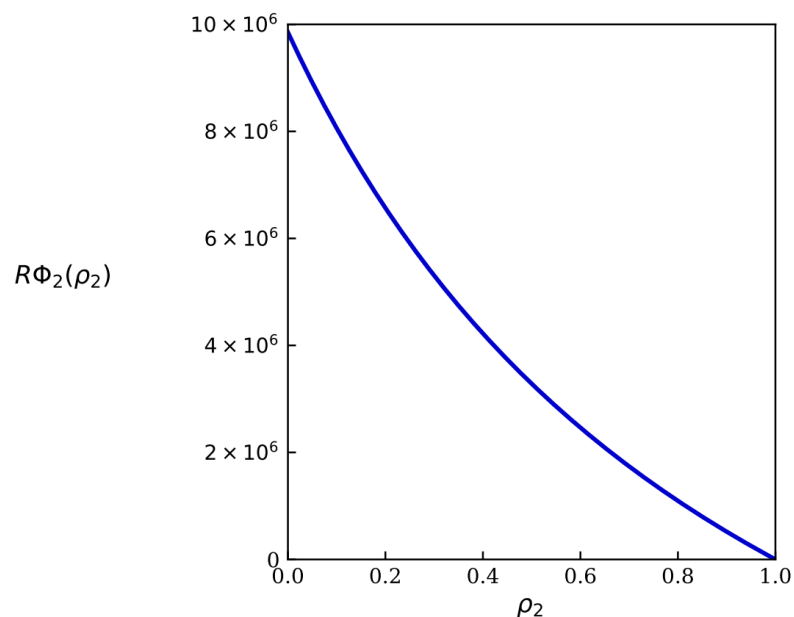


Рис. 2.10. Графік залежності швидкості передавання від ступеня завантаженості мережі для технології CSMA/CD

З рис. 2.10 видно експоненційний характер: зі зростанням завантаження швидкість передавання швидко падає. Отже, попри дешевизну, така мережа сильно залежить від завантаження і за великого трафіку не здатна стабільно забезпечувати потрібні параметри QoS.

2.3.2 Метод оцінки часу затримки інформації на рівні WAN_{CORE} і LAN_{ACCES} при використанні мережі кільцевої структури в розподілюваному середовищі

Це мережі з маркерним доступом. Технології, які використовувать в цих мережах отримали назву FDDI (Fiber Distributed Data Interface) і Token Ring. Найвідоміші стандарти: IEEE 802.4 і IEEE 802.5 [52]. Ми плануємо використовувати технологію FDDI на рівні базової мережі аеропорту. Вона забезпечує високий рівень надійності. Розглянемо цю технологію.

Право користування середовищем циклічно передається між станціями по логічному кільцю. Тому станція на пряму взаємодіє лише з попередньою та наступною. Доступ забезпечує спеціальний кадр – маркер (токен), що циркулює по кільцю. Отримавши маркер, станція або передає його далі, якщо даних немає, або вилучає маркер і передає кадр даних.

Час, потрібний станції для повторення/затримки кадра, називається латентним часом станції. Латентний період кільця L визначається як:

$$L = t + N \cdot b/c \quad (2.7)$$

Час t визначимо як час «обходу» маркера всіма станціями:

$$t = \frac{V_m}{R} \cdot N$$

де:

V_m - розмір маркера (3 байти)

R - швидкість передавання, N - кількість станцій

Латентний час станції приймаємо 1 біт/станцію, підставляємо ці данні у вираз (2.7), тоді маємо:

$$L = \frac{V_m}{R} \cdot N + \frac{1 \cdot N}{R}$$

В роботі розглядається загальний випадок і виконується розрахунок затримки доступу (часу очікування права передавання) для користувачів на кожній станції. Для цього ми можемо застосувати модель черги, яка наведена на рис.2.11

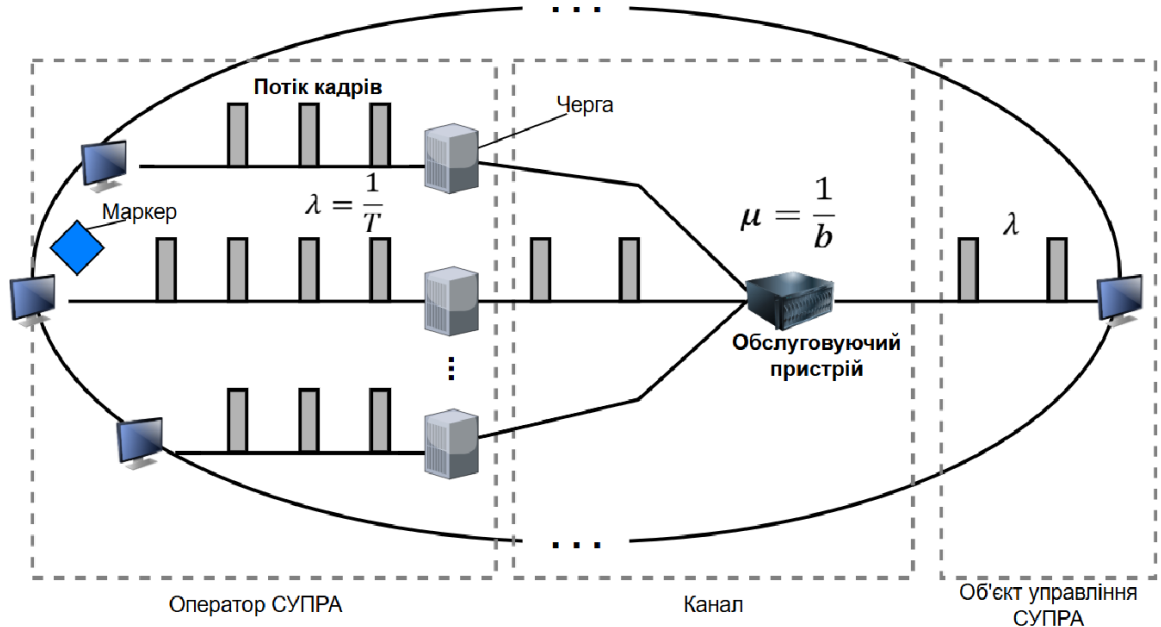


Рис. 2.11. Модель G/M/1 для кільцевої структури типу FDDI (Token Ring)

Час, потрібний для одного обходу N станцій - час циклу t_c , складається з: часу передавання дозволу опитування між станціями w_i та часу передавання кадрів t_i , де $i=1..N$. Тоді повний час циклу:

$$t_c = \sum_{i=1}^N w_i + \sum_{i=1}^N t_i$$

і це випадкова величина. Для середніх значень:

$$\bar{t}_c = \sum_{i=1}^N w_i + \sum_{i=1}^N t_i = L + \sum_{i=1}^N \bar{t}_i$$

де

L – повний час переходу по всій системі опитування.

Нехай інтенсивність надходження пакетів на станцію i дорівнює λ_i , а середній час передачі кадра - $\bar{m}_i$. Тоді середня кількість пакетів, що очікують

передавання на станції i в момент її опитування, дорівнює $\lambda_i \cdot t_c$, а середній час на їх передавання:

$$t_i = \lambda_i \cdot \bar{t}_c \cdot \bar{m}_i = \rho_i \cdot \bar{t}_c$$

де $\rho_i = \lambda_i \cdot \bar{m}_i$ - завантаження каналу, створюване станцією i . Підставляючи та спрощуючи, отримуємо для середнього часу циклу:

$$\bar{t}_c = \frac{L}{1 - \sum_{i=1}^n \rho_i} = \frac{L}{1 - \rho}$$

де сумарне завантаження:

$$\rho = \sum_{i=1}^N \rho_i = \sum_{i=1}^N \lambda_i \cdot \bar{m}_i$$

Час циклу t_c є критичним для визначення затримок доступу; зокрема, за малих значень ρ середня затримка доступу має бути малою $\frac{1}{2} \bar{t}_c$.

Вважається, що надходження пакетів на кожній станції описується незалежним пуассонівським потоком. Затримка доступу - це середній час, який пакет очікує на станції від моменту надходження до початку передавання. Її можна ототожнити із середнім часом очікування в СМО M/G/1 (формула Поллачека-Хінчина) [51]. Підставляємо данні в вираз (2.3), маємо середню затримку доступу:

$$E = \frac{\bar{t}_c}{2} \left(1 - \frac{\rho}{N}\right) + \frac{N\lambda\bar{m}^2}{2(1-\rho)} = \frac{L}{2} \frac{(1 - \frac{\rho}{N})}{(1-\rho)} + \frac{N\lambda\bar{m}^2}{2(1-\rho)}$$

$$r = N \cdot I \cdot m$$

Середній час t_f передавання даних від джерела до призначення в кільці дорівнює формулі для циклічного опитування з додаванням часу передавання кадра m та $\frac{L}{2}$, середній шлях до отримувача приблизно дорівнює половині кільця:

$$t_f = \frac{L(1-\frac{\rho}{N})}{2(1-\rho)} + \frac{N\lambda\bar{m}^2}{2(1-\rho)} + m + \frac{L}{2} \quad (2.8)$$

Оскільки $\rho = \lambda/\mu$, звідси, то $\lambda = \rho \cdot \mu$, де μ - інтенсивність обслуговування кадрів

$$\mu = \frac{1}{T}$$

де

T - період достовірного передавання кадра, що є латентний період кільця та час передавання корисних даних:

$$T = L + m$$

Таким чином, з виразу (2.8) збудуємо графік залежності затримки передачі кадру від ступеня завантаженості мережі.

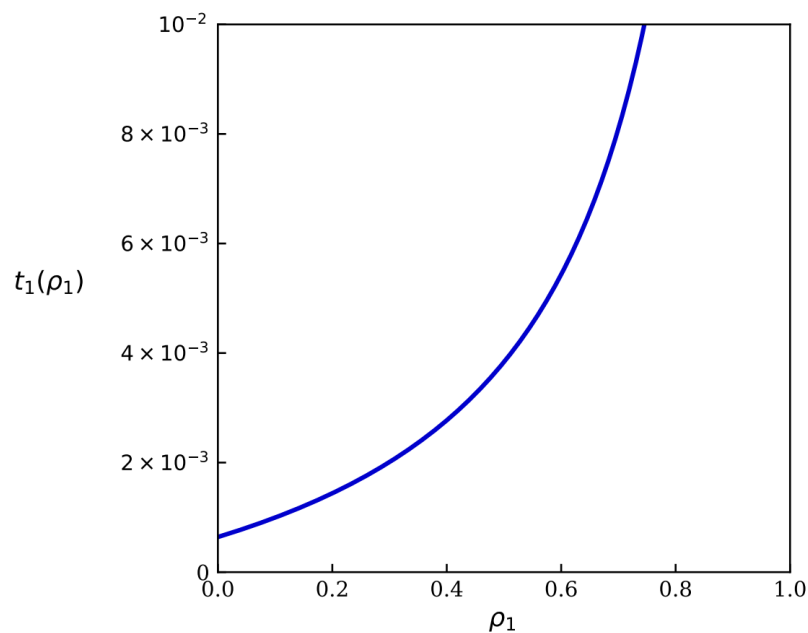


Рис. 2.12. Залежність часу затримки передавання від завантаженості мережі для технології кільцевої структури

З графіка видно, що технологія доступу через маркерне кільце вразлива до перевантажень: при завантаженні понад 0,6 час затримки починає стрімко зростати. Хоча цей спосіб розподілу середовища й усуває колізії, він водночас суттєво ускладнює алгоритм доступу до середовища передавання даних.

Розрахуємо для кільцевої структури фактичну швидкість передавання інформації для цього підставляємо данні в вираз (2.8), та маємо:

$$R_{\Phi} = V \cdot f = V \cdot \frac{1}{\frac{L(1 - \frac{\rho}{N})}{2(1 - \rho)} + \frac{N \cdot \lambda \bar{m}^2}{2(1 - \rho)} + m + \frac{L}{2}}$$

Для оцінювання динаміки швидкості збудуємо графік залежності фактичної швидкості від ступеня завантаженості системи.

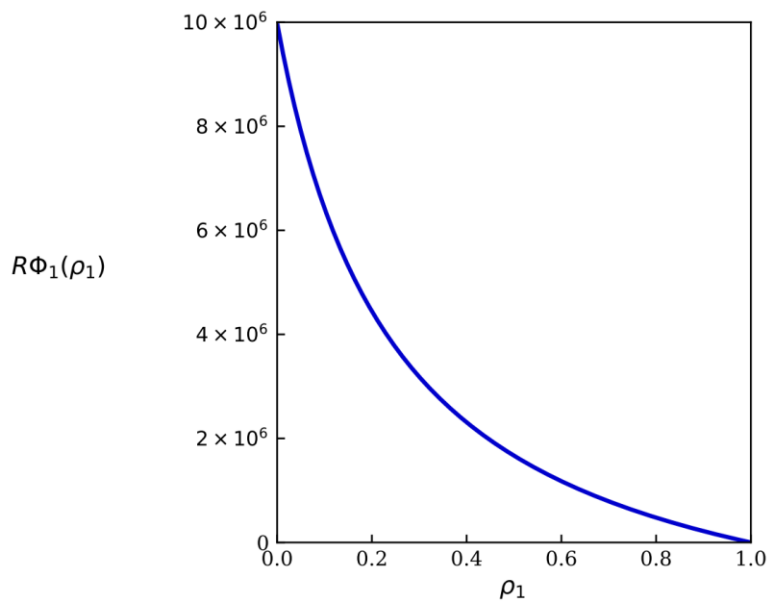


Рис. 2.13. Графік залежності швидкості передавання від ступеня завантаженості мережі для технології кільцевої структури

Як видно з рис. 2.13, залежність фактичної швидкості передачі від завантаженості мережі для кільцевої структури зменшується при збільшенні завантаженості мережі. Однак це зменшення має плавний характер. Із графіка випливає, що маркерний доступ може дати суттєвий ефект, особливо в базових мережах аеропорту, де вимоги до надійності дуже високі.

2.3.3 Метод оцінки часу затримки інформації на рівні LAN_{ACCESS} при використанні швидкого комутованого Ethernet

Розглянемо комутований варіант технології Ethernet. Така мережа не використовує розділюване середовище, а будується на комутаторах, з'єднаних дуплексними каналами. Топологія дерево, тобто між будь-якими двома вузлами існує рівно один шлях. Дуплексний зв'язок фактично усуває колізії, зменшує ймовірність перевантаження/втрат кадрів і робить непотрібним «прослуховування» каналу перед передаванням (в одному напрямку передає один передавач). Кадр послідовно проходить від вузла до найближчого

комутатора, комутується на потрібний порт і прямує далі, доки не досягне отримувача.

Комутований Ethernet не має розділюваного середовища, а мережа будується на комутаторах, з'єднаних дуплексними каналами у топології дерева. Дуплекс практично усуває колізії, зменшує ризик втрат кадрів і робить непотрібним «прослуховування» каналу перед передаванням. Кадр йде від вузла до найближчого комутатора, перемикається на потрібний порт і передається далі по ланцюгу комутаторів, доки не дійде до отримувача. Затримку передавання кадра можна оцінити:

$$t_3 = t_{IPG} + t_k + t_s$$

де

t_{IPG} - міжкадровий інтервал IPG, в Ethernet відповідає 96 біт;

t_k - середній час передавання кадра;

t_s - середній час перебування кадра в комутаторі.

Час передавання кадра та IPG визначається:

$$t = \frac{V_k}{R}$$

де

R – швидкість передвчі даних

V_k - розмір кадру, що визначається як:

$$V_k = V_{\Pi} + V_3$$

V_3 - заголовок (в Ethernet 26 байт), V_{Π} - корисні дані, тоді час затримки буде:

$$t_3 = \frac{V_{IPG}}{R} + \frac{V_{\Pi} + V_3}{R} + t_s$$

Отже, затримка залежить від розміру корисних даних і часу обробки кадра в комутаторі. В подльшому розглянемо малі (46 байт), середні (800 байт) і великі (1500 байт) пакети. Щоб оцінити середній час перебування кадру в комутаторі t_s , комутатор наближено моделюють як одноканальну СМО з кінцевим вхідним буфером і дисципліною FIFO(first input/first output). Функціональну модель наведено на рис. 2.14.

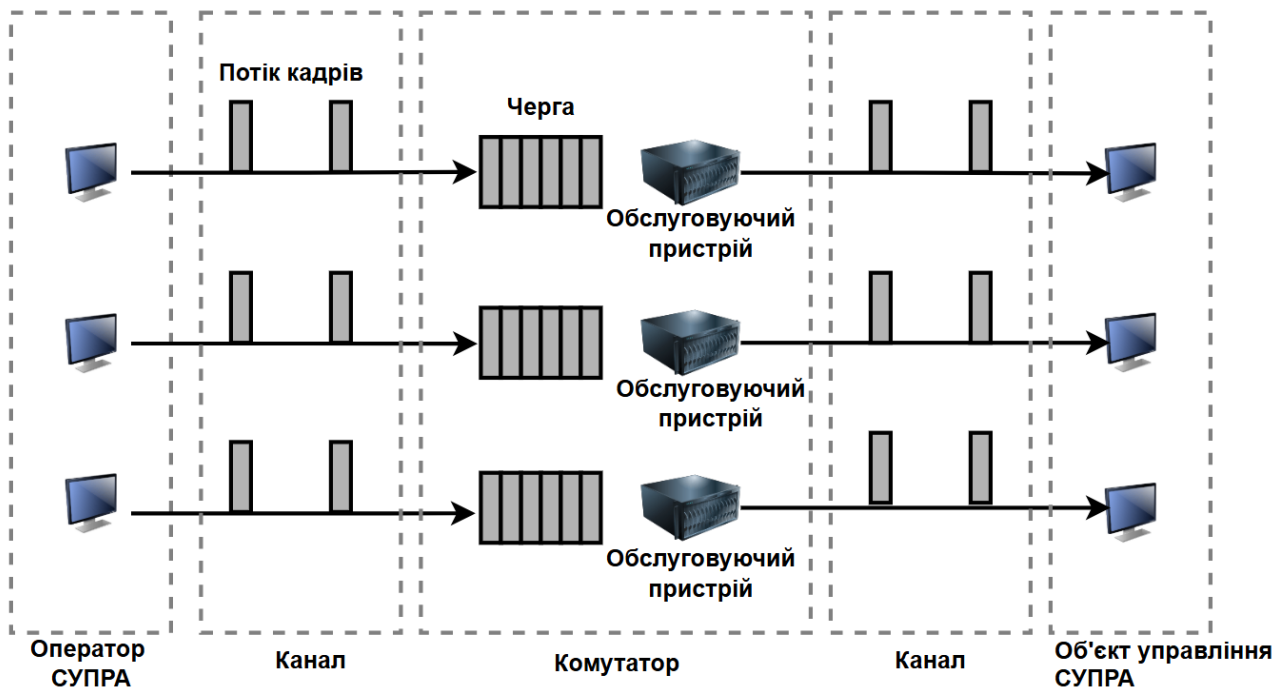


Рис. 2.14. Функціональна схема комутатора як СМО

Час перебування заявки в комутаторі:

$$t_s = t_w + t_\mu$$

де

t_w - середній час очікування в черзі,

t_μ - середній час обслуговування.

Оскільки $t_\mu = \frac{1}{\mu}$, маємо:

$$t_s = t_w + \frac{1}{\mu}$$

Ця СМО також відповідає M/G/1, тому застосовують формулу Поллачека-Хінчина [52], підставляємо у вираз (2.3) і маємо:

$$t_s = \frac{\overline{N_w}}{\lambda} + \frac{1}{\mu} = \frac{\rho}{2 \cdot \mu \cdot (1 - \rho)} + \frac{1}{\mu}$$

Підставляючи, одержуємо затримку кадра як функцію завантаження:

$$t_3 = t_{IPG} + t_k + t_s = \frac{V_{IPG}}{R} + \frac{V_\Pi + V_3}{R} + \frac{\rho}{2 \cdot \mu \cdot (1 - \rho)} + \frac{1}{\mu}$$

Побудуємо графік залежності затримки від завантаження для Ethernet зі швидкістю 10 Мбіт/с. Найбільше навантаження на комутатор створюють малі пакети, так як обробляється велика кількість заголовків, тому продуктивність має витримувати потік малих кадрів. Інтенсивність обслуговування можна оцінити як:

$$\mu = \frac{R}{V_{\min \pi} + V_3} \left(\frac{\text{кадр}}{c} \right)$$

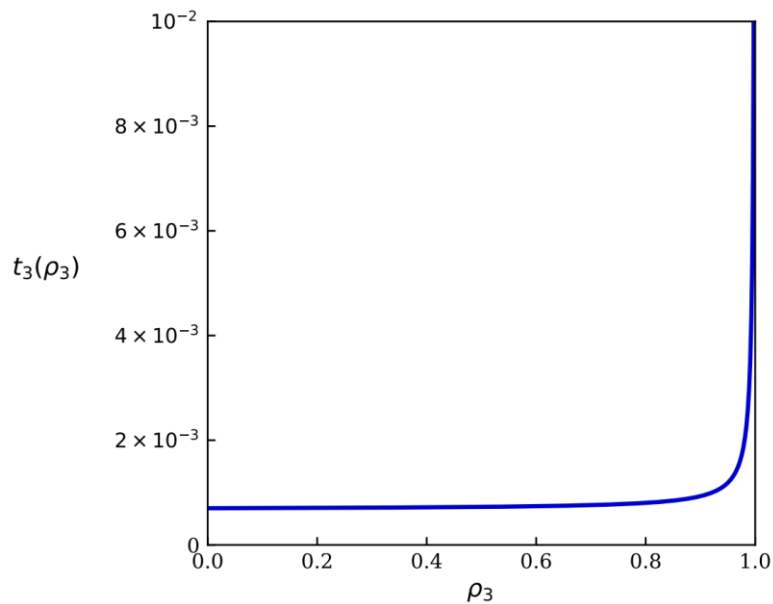


Рис. 2.15. Графік залежності часу затримки від ступеня завантаженості мережі

З рис. 2.15 випливає, що комутований Ethernet майже нечутливий до перевантажень, а вплив завантаження стає помітним переважно після 90% завантаження, а в інших режимах затримка майже не змінюється.

Аналогічно до розглянутих технологій, фактична швидкість передавання має вигляд:

$$R_{\phi} = V \cdot f = V \cdot \frac{1}{\frac{V_{IPG}}{R} + \frac{V_{\pi} + V_3}{R} + \frac{\rho}{2 \cdot \mu \cdot (1 - \rho)} + \frac{1}{\mu}}$$

Для оцінки динаміки швидкості збудуємо графік.

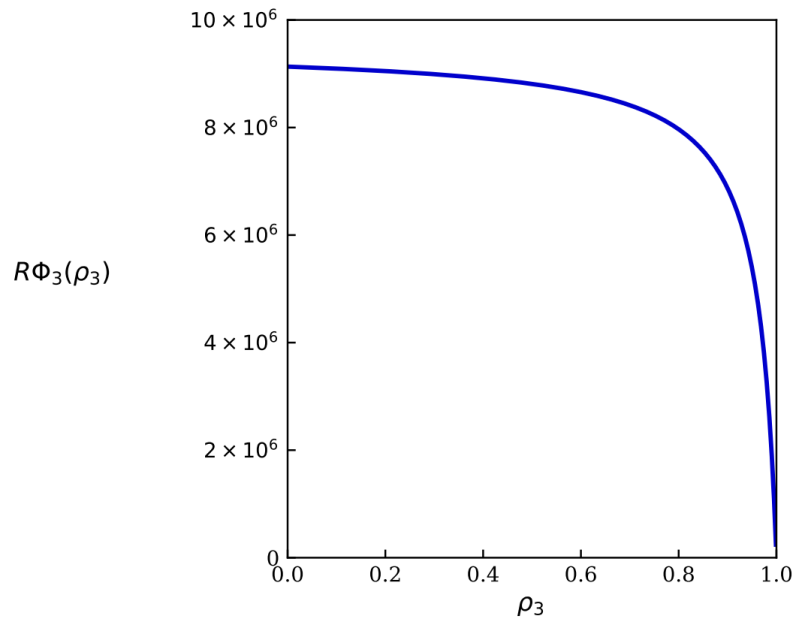


Рис. 2.16. Графік залежності швидкості передавання інформації від ступеня завантаженості мережі для технології Ethernet

З рис.2.16 видно інший характер залежності: Ethernet майже зберігає номінальну швидкість навіть за завантаження близько 70%. Це пояснюється тим, що об'єднанням вузлів і пересиланням кадрів керує комутатор, та визначає, до якого порту передати кадр, що в свою чергу зменшує надлишковий трафік, а дуплекс усуває колізії. Негативним ефектом є подорожчання мережі через додаткові пристрої та збільшення довжини кабелю. Водночас застосування комутаторів дозволяє суттєво масштабувати мережу без погіршення QoS і використовувати додаткові можливості: VLAN, інжиніринг трафіка, блокування нелегальних MAC-адрес з міркувань безпеки тощо.

2.3.4 Метод оцінки часу затримки інформації на рівні LAN_{ACCES} при використанні технології МЦУС

У Мережі з централізованим управлінням і сегментуванням визначено метод доступу пріоритет запиту demand priority: ресурс мережі виділяється лише за потреби передавання. Для топології зірка абонент надсилає концентратору запит, після чого концентратор циклічно опитує порти і надає право передавання абоненту, який іде наступним після того, хто завершив передавання, далі надсилає дозвіл. Час доступу гарантований, а пріоритет є географічним і

визначається номером порту нижчого рівня. За перевантаження запити накопичуються в черзі, інакше станція одразу починає передавання. За моделлю, СМО тут відповідає комутованому Ethernet.

Загальний час затримки кадра:

$$t_3 = t_{rq} + t_q + t_w + t_{rp} + t_f + t_c \quad (2.9)$$

де

t_{rq} — час запиту дозволу;

t_q — час опитування портів;

t_w — очікування в черзі;

t_{rp} — час відповіді;

t_f — передавання кадра з корисними даними;

t_c — обробка кадра в концентраторі.

Таким чином час запиту - це час передавання кадра запиту, що визначається як:

$$t_{rq} = \frac{V_{rq}}{R}$$

Оскільки МЦУС підтримує формат кадра Ethernet, кадр-запит беруть як мінімальний кадр Ethernet тобто 46 байт, тому:

$$t_{rq} = \frac{V_{\min \text{ п}} + V_3}{R}$$

Де:

$V_{\min \text{ п}}$ - мінімальний розмір поля корисних даних,

V_3 - розмір заголовка.

Таким чином аналогічно розрахуємо t_{rp} :

$$t_{rp} = \frac{V_{\min \text{ п}} + V_3}{R}$$

Тоді час затримки буде:

$$t_3 = 2 \cdot \frac{V_{\min \text{ п}} + V_3}{R} + t_q + t_w + t_f + t_c$$

А час передавання кадра з корисними даними де V - корисні дані:

$$t_f = \frac{V + V_3}{R}$$

Час опитування портів оцінюють аналогічно латентному періоду в Кільцевій структурі, але без передавання цієї інформації мережею, черга дійде до потрібного елемента максимум через $N-1$ станцію, тоді t_q :

$$t_q = b/c \cdot (N - 1)$$

де

b/c - латентний час станції.

Час обробки кадра концентратором:

$$t_c = \frac{1}{\mu}$$

де

μ - інтенсивність обслуговування (продуктивність концентратора).

Оскільки концентратор має обробляти короткі кадри, опитувати порти й обробляти запити, один цикл його роботи, підставляємо данні в вираз (2.9):

$$t_{con} = t_q + t_{min} + t_{rq}$$

Де

$$t_{min} = \frac{V_{min \text{ п}} + V_3}{R}$$

Тоді:

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{1}{\frac{b}{c} \cdot (N - 1) + \frac{V_{min \text{ п}} + V_3}{R} + \frac{V_{min \text{ п}} + V_3}{R}} = \\ &= \frac{1}{b/c \cdot (N - 1) + 2 \cdot \frac{V_{min \text{ п}} + V_3}{R}} \left(\frac{\text{кадр}}{c} \right) \end{aligned}$$

Залишається t_w . Як і для комутованого Ethernet, маємо одноканальну СМО M/G/1 з необмеженою чергою $((M|G|1):(GD|\infty|\infty))$, тому:

$$t_w = \frac{\rho}{2 \cdot \mu \cdot (1 - \rho)}$$

де ρ - завантаженість мережі. Після розрахунків з виразу (2.9). Підсумкова формула затримки для МУЦС:

$$t_3 = 2 \cdot \frac{V_{\min \pi} + V_3}{R} + b/c \cdot (N - 1) + \frac{\rho}{2 \cdot \mu \cdot (1 - \rho)} + \frac{V + V_3}{R} + \frac{1}{\mu}$$

Намалюємо графік залежності t_3 від ρ .

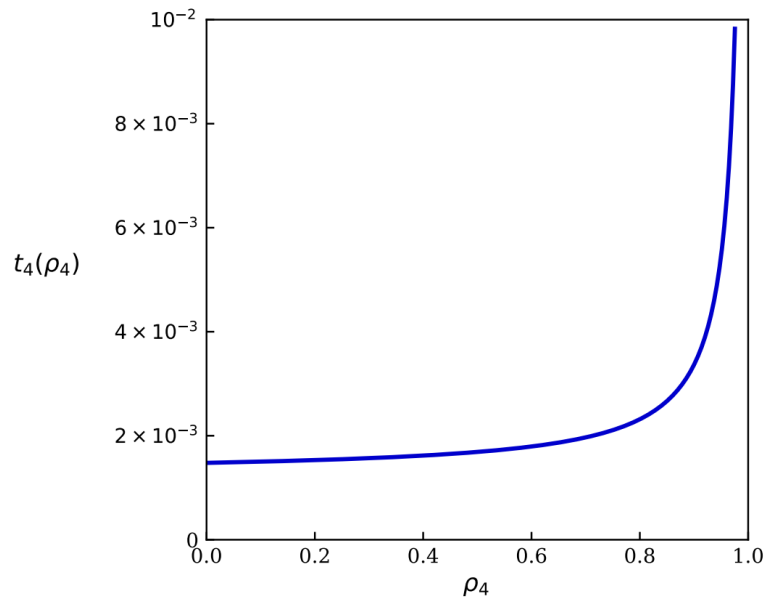


Рис. 2.17. Графік залежності часу затримки від ступеня завантаженості для мережі МЦУС

Із графіка (рис.2.17) видно, що МЦУС є відносно стійкою до перевантажень: різке зростання затримки починається за $\rho > 0,8$.

Тоді фактична швидкість передавання, в залежності від ступеню завантаженості буде:

$$R_{\phi} = V \cdot f = V \cdot \frac{1}{2 \cdot \frac{V_{\min \pi} + V_3}{R} + b/c \cdot (N - 1) + \frac{\rho}{2 \cdot \mu \cdot (1 - \rho)} + \frac{V + V_3}{R} + \frac{1}{\mu}}$$

Для оцінки динаміки намалюємо графік залежності швидкості від завантаження.

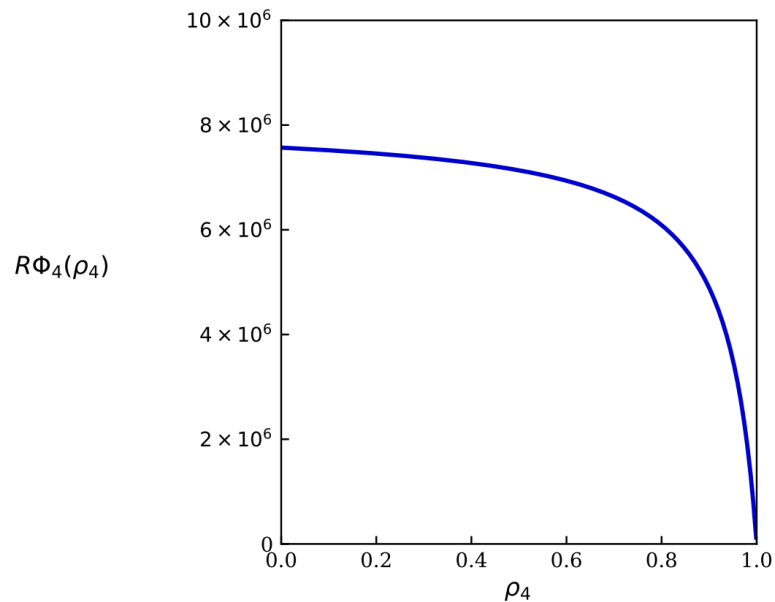


Рис. 2.18. Графік залежності швидкості передавання інформації від ступеня завантаженості мережі для технології МЦУС

Як видно з рис.2.18, характер залежності швидкості від завантаження подібний до Ethernet, що дозволяє зробити висновок про загальну стійкість технології до навантажень.

2.4 Порівняння характеристик технологій

У роботі виконано розрахунки для 4 різних технологій. Щоб порівняти реакцію кожної мережі на перевантаження каналу зв'язку, було обрано однакові умови: швидкість передавання 10 Мбіт/с і розмір пакета 800 байт. Результати наведено на рис 2.19 та рис. 2.20.

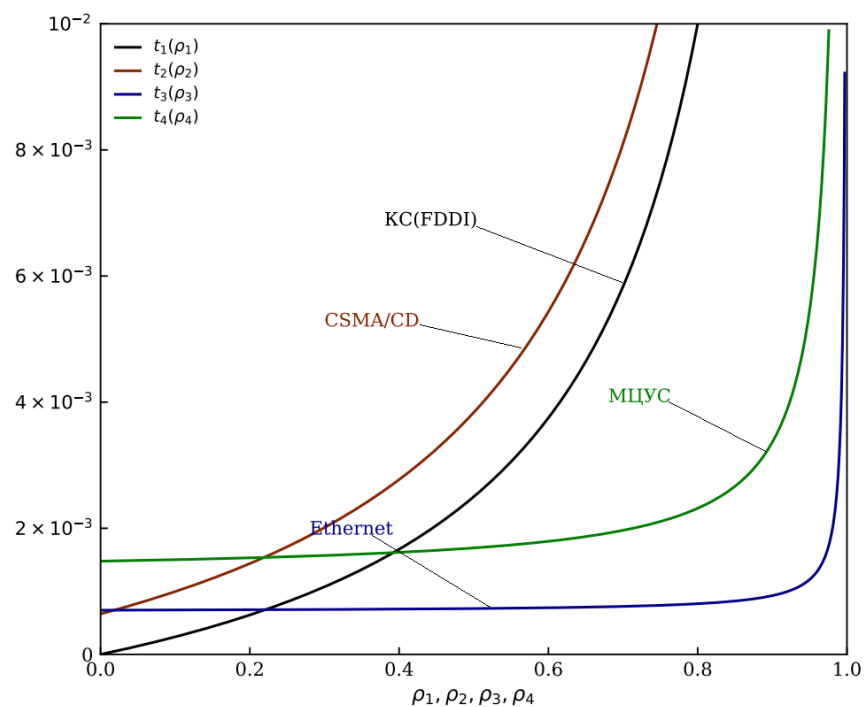


Рис.2.19. Графік залежності часу затримки від ступеня завантаженості технологій локальних мереж

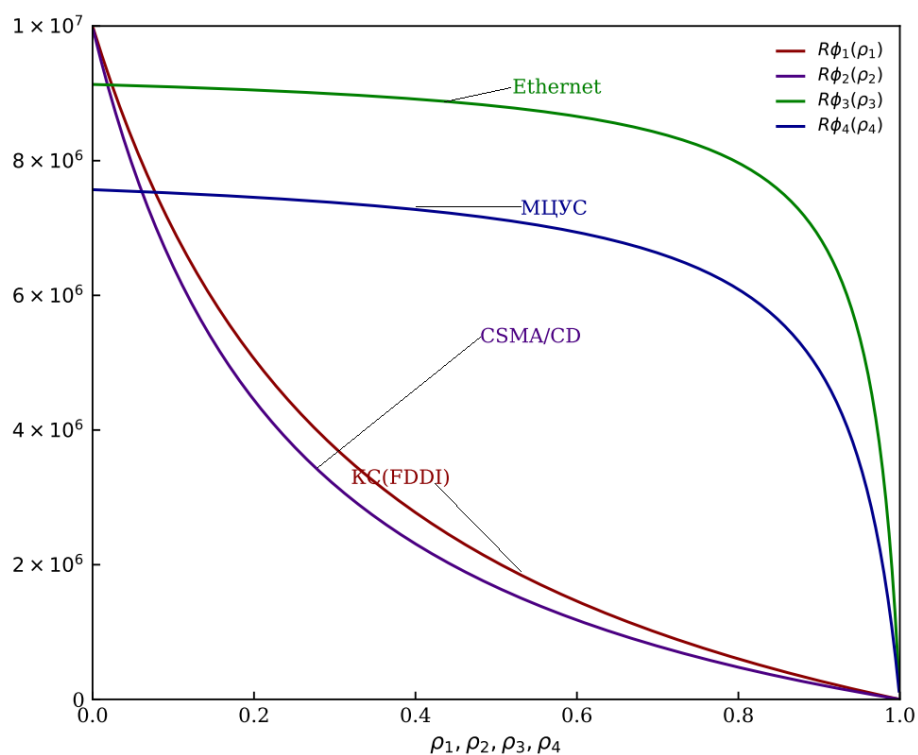


Рис.2.20. Графік залежності швидкості передавання інформації від ступеня завантаженості мережі технологій локальних мереж

Висновки до другого розділу

1. У підрозділі розглянуто принципи побудови мережі управління повітряним

рухом аеропорту на основі технологій SDN і NFV. Показано, що класична архітектура мережі має суттєві обмеження щодо гнучкості, масштабованості та здатності адаптуватися до змін навантаження.

2. Використання SDN дозволяє централізувати управління мережею, забезпечити програмну конфігурацію та глобальну оптимізацію маршрутів передачі даних. Застосування NFV доповнює ці можливості за рахунок віртуалізації мережевих функцій і підвищення ефективності використання ресурсів.

3. Найменш чутливою до перевантаження є технологія комутованого Ethernet, оскільки вона відмовилась від принципу розділюваного середовища, а отже колізії відсутні. Комутований Ethernet забезпечує найменшу затримку передавання кадра порівняно з іншими технологіями.

4. Порівнюючи CSMA/CD і маркерний доступ, можна зробити висновок, що

CSMA/CD менш схильний до зростання затримок при перевантаженні, ніж Кільцева структура, але різниця незначна і в реальній мережі зазвичай майже не відчувається. Слід враховувати, що в розрахунках умовно прийнято нескінченний буфер/час очікування, тобто систему без втрат. Це зроблено, щоб оцінити затримки, зумовлені саме технологією, без прив'язки до параметрів конкретного обладнання. У реальній мережі після досягнення певного рівня завантаження починаються втрати пакетів, і передавальна станція змушена виконувати повторні передавання. Так, у мережі CSMA/CD після колізії станції дозволено зробити 15 спроб повторного передавання, щоразу збільшуючи час очікування; після чергової невдалої спроби станція-відправник повідомляє про неможливість доставити дані отримувачу.

5. У комутованому Ethernet обмеженням є буфер порту комутатора: якщо його заповнити, нові пакети відкидаються через відсутність місця, а

станція-відправник отримує повідомлення про недоступність станції-отримувача.

6. Мережа МЦУС дещо поступається Ethernet за стійкістю до перевантажень, оскільки її доступ складніший. Водночас вона виключає колізії та спільне використання одного кабелю кількома станціями, що підвищує працездатність і робить її значно стійкішою за попередні технології маркерного кільця та CSMA/CD.

7. Оскільки в різних режимах експлуатації кожна технологія має свої переваги, доцільно використовувати можливості SDN, зокрема інтелектуальні можливості контролера, і обирати режим (технологію) роботи мережі залежно від величини навантаження, що надходить на обслуговування.

8. Отримані у цьому підрозділі положення створюють теоретичну основу для подальшого аналізу ефективності програмно-керованої архітектури, який буде виконано у підрозділі 4 шляхом моделювання функціонування мережі.

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛЬ І МЕТОД КЕРУВАННЯ ПОТОКАМИ ДАНИХ В РАДІОЛОКАЦІЙНИХ КАНАЛАХ ПОВІТРЯНОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ

Розвиток сучасних систем управління повітряним рухом супроводжується безперервним зростанням обсягів даних спостереження, навігації та зв'язку, що висуває підвищені вимоги до пропускної здатності, затримки та надійності інформаційних мереж аеропорту й суміжних підсистем CNS/ATM. Перехід від традиційної інфраструктури до програмно-керованих мереж SDN та віртуалізованих мережевих функцій NFV створює технологічну основу для гнучкого керування ресурсами, централізованої політики якості обслуговування та швидкого масштабування сервісів. Водночас ефект від такої модернізації буде обмеженим, якщо критичні підсистеми спостереження не підтримуватимуть необхідну інтенсивність обміну даними в умовах завад, колізій і перевантаження.

Одним із ключових джерел інформації про повітряну обстановку для СУПР є запитальні (інтеррогаційні) радіолокаційні системи, зокрема вторинні оглядові РЛС (SSR). Їхня експлуатація в кооперативних системах спостереження супроводжується щільними внутрішньосистемними завадами в каналах запиту та відповіді, відсутністю часової синхронізації між різними допитувачами та принциповою вразливістю бортового транспондера, який функціонує як відкрита одноканальна система обслуговування з відмовами та часом «паралічу». У таких умовах саме ефективність використання каналу а не лише номінальна швидкість визначає якість радіолокаційного забезпечення: імовірність отримання потрібної кількості відповідей, затримки оновлення трас та стійкість до навмисних і внутрішньосистемних впливів. Тому підвищення ефективності СУПР у програмно-керованій архітектурі доцільно доповнювати алгоритмічною модернізацією передачі радіолокаційної інформації в каналах SSR. Зокрема, перспективним є підхід, у якому максимізація ефективної швидкості досягається не одним важелем, а узгодженим адаптивним керуванням взаємопов'язаними параметрами передавання (швидкість, режим передавання,

швидкість кодування, довжина інформаційного пакета, поріг фрагментації, допустима кількість повторів тощо) відповідно до поточної заводової та навантажувальної обстановки.

У цьому розділі розроблено модель оптимізації довжини інформаційного пакета та сформовано принципи адаптивного алгоритму керування параметрами в радіолокаційних системах повітряного спостереження. Спочатку запитальні РЛС формалізуються як система масового обслуговування, що дозволяє виділити обмеження пропускної здатності та чинники зниження завадостійкості. Далі будується модель ефективної швидкості передавання радіолокаційної інформації як функції ключових параметрів каналу та процесу повторів та відновлення, на основі якої визначається оптимальна довжина пакета (в загальному випадку - чисельно). На завершення наведено результати чисельного моделювання та практичні рекомендації щодо вибору параметрів, які можуть бути реалізовані як програмно-керована функція у складі модернізованої інфраструктури СУПР

3.1 Формалізований опис функціонування ЗРЛС у вигляді системи масового обслуговування.

3.1.1. Вимоги та загальна характеристика допитних РЛС

Запитальні радіолокаційні системи є одним із основних джерел радіолокаційної інформації про повітряну обстановку як для управління повітряним рухом, так і для системи контролю повітряного простору (рис. 3.1). До них належать вторинні оглядові РЛС, системи радіолокаційного розпізнавання «свій-чужий» (Identification Identify Friend or Foe), а також короткоімпульсні навігаційні радіолокаційні системи.

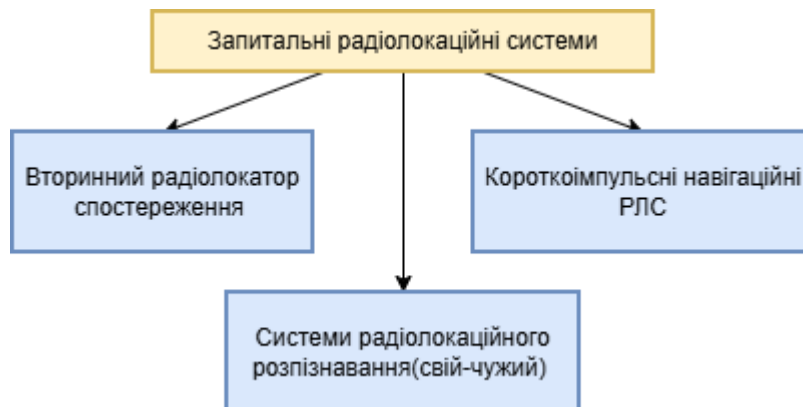


Рис. 3.1. Типи запитальних радіолокаційних систем

Запропонована мережева LAN структура підсистеми спостереження аеропорту зображена на рис. 3.2

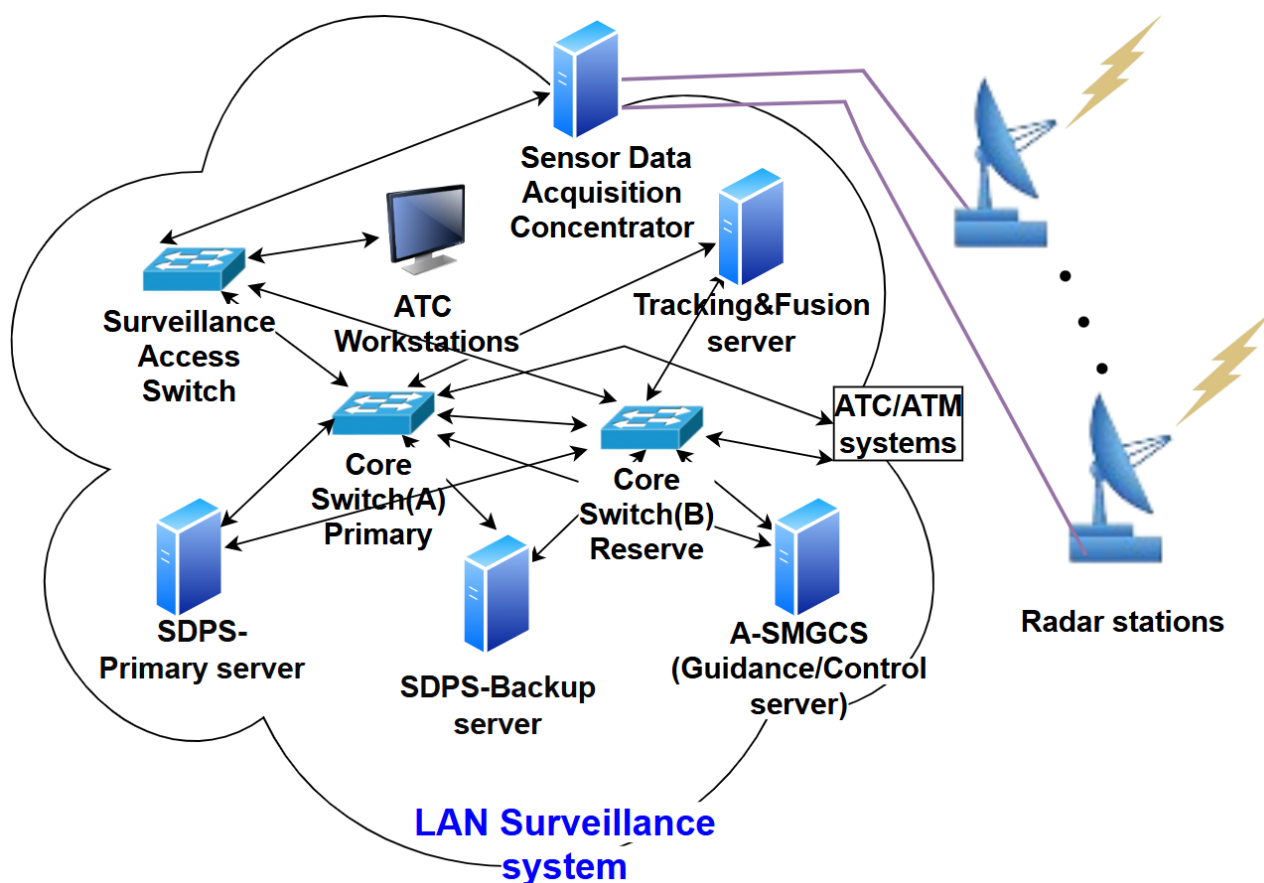


Рис. 3.2. Запропонована структурно-функціональна схема LAN підсистеми спостереження аеропорту

Запитальні (інтеррогаційні) радіолокаційні системи забезпечують спостереження за повітряним простором, що, без сумніву, передбачає визначення місцезнаходження повітряних об'єктів за допомогою наземного

радіолокаційного обладнання. Використання транспондерів повітряних суден [62–64] для формування відповідних сигналів, необхідних для оцінки місцезнаходження повітряного об'єкта в наземному радіолокаційному допитнику, зумовлює належність розглянутих інформаційних засобів до кооперативних систем контролю повітряного простору [65–66]. Таким чином, сказане дозволяє зробити висновок, що інтеррогаційні радіолокаційні системи є однією з важливих інформаційних систем, що постачають радіолокаційну інформацію як системі контролю повітряного простору, так і системі управління повітряним рухом [67, 68]. Опитувальні радіолокаційні системи вирішують наступні задачі інформаційного забезпечення системи контролю повітряного простору та управління повітряним рухом:

- визначення координат повітряних об'єктів;
- прийом польотної радіолокаційної інформації від повітряного судна;
- передача радіолокаційної інформації, необхідної для управління польотом повітряного об'єкта;
- керування й наведення засобів на виявлений повітряний об'єкт;
- радіолокаційна ідентифікація державної належності виявлених повітряних об'єктів.

Структурна схема інтеграції даних SSR у мережі аеропорту на рис. 3.3.

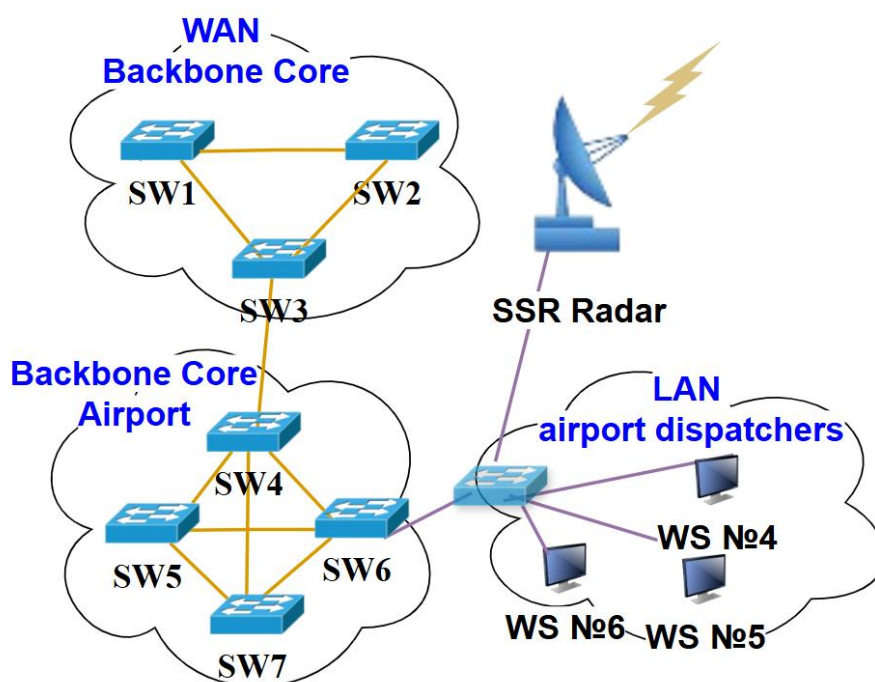


Рис. 3.3. Структурна схема інтеграції даних SSR у мережі аеропорту

Водночас радіолокаційні системи опитування, безсумнівно, можна віднести до класу асинхронних двосторонніх систем передавання радіолокаційної інформації [69–71]. Справді, запитальні радіолокаційні системи складаються з кількох передавачів і приймачів і використовують різні діапазони частот для прийому й передавання сигналів. Отже, радіолокаційні системи опитування, відповідно до принципів їх побудови, можна віднести до несинхронних інформаційних мереж систем радіолокаційного контролю повітряного простору.

Виходячи з вищесказаного, можна зробити висновок, що система РЛС опитування - це ніщо інше, як двоканальна система передавання радіолокаційної інформації. Слід зазначити, що найуразливішим місцем у розглянутій мережі опитувальних радарів систем контролю повітряного простору є транспондер повітряного судна. Це пов'язано з тим, що бортовий транспондер у складі допитної радіолокаційної системи є ніщо інше, як відкрита одноканальна система черги з відмовами. Така побудова викликає суттєві недоліки розглянутих інформаційних систем, що знижує як завадозахищеність [72, 73], так і інформаційну безпеку [74, 75, 93] останніх. Слід також зазначити, що з переходом авіаційного сектору на цифрові технології й його зростаючою залежністю від бездротових технологій привабливість цього сектору для кібератак, без сумніву, зростає.

Отже, можна стверджувати, що, незважаючи на використання сучасних технологій, радіолокаційні системи допиту залишаються проблемними інформаційними системами. Справді, це зумовлено принципом побудови як бортових, так і наземних радіолокаційних транспондерів розглянутих інформаційних систем у вигляді відкритих одноканальних систем черг з відмовами.

Саме така побудова транспондерів надає широкі можливості зацікавлений особі здійснити як несанкціонований запит із бортового транспондера [78, 79] на отримання інформації про повітряний об'єкт, так і повністю паралізувати бортовий транспондер шляхом створення навмисних корельованих перешкод необхідної інтенсивності [80, 81], що, безсумнівно, призводить до неможливості

отримання наземними пунктами управління потрібної польотної інформації, схематично зображено на рис. 3.3.

3.1.2. Формалізований опис каналу взаємодії ЗРЛС з повітряним транспортом

Побудова існуючих допитних РЛС може бути представлена у вигляді асинхронної мережі для передачі радіолокаційної інформації. При цьому порядок обслуговування допитних сигналів може бути описаний у формі одноканальної системи масового обслуговування з відмовами (СМО).

Найбільш вразливим місцем у мережі допитних РЛС є авіаційний відповідач - транспондер. Це пояснюється тим, що відповідач у запитальних РЛС є не чим іншим, як відкритою одноканальною системою масового обслуговування з відмовами. Така конструкція призводить до значних недоліків, які знижують як завадостійкість, так і інформаційну безпеку системи.

Передавачі допитних РЛС генерують дискретні запитальні сигнали $s_i(t)$, що належать до кінцевої множини s , які асинхронно передаються по лінії зв'язку. Допитний радіосигнал $s_i(t)$ має вигляд: $s_i(t) = U_i f_i(t) \cos(\omega_0 t + \varphi)$, де $f_i(t)$ - певна двійкова кодова послідовність, що приймає значення 1 або 0; «одиниці» відповідають імпульсам, а «нули» — паузам у $s_i(t)$ сигналі та самій цій послідовності, ω_0 - несуча частота, φ - випадкова початкова фаза високочастотного заповнення, яка, як правило, відрізняється для кожного імпульсу кодової послідовності; U_i - амплітудний множник, сталий у межах однієї повної реалізації цього сигналу.

Увесь ансамбль $\bar{s}$ сигналів містить k різних сигналів запиту, як правило, за кількістю режимів роботи інформаційної системи, що розглядається, що відрізняються один від одного лише послідовністю кодування $f_i(t)$, із загальною несучою частотою ω_0 . Умова адекватності сигналів запитів виражається в тому, що тривалість імпульсів τ_i , а також кількість імпульсів n , повинні бути однаковими у всіх сигналах запитів інформаційної системи, що розглядається.

Передавачі допитних радіолокаційних систем формують дискретні запитальні сигнали, які належать до скінченної множини — ансамблю.

$$\bar{S} = \{s_i(t)\}; i=1,2,\dots,V,$$

і передають їх на лінію передачі сигналу запиту асинхронно, незалежно один від одного, у певні моменти часу. Безперечно, наступна умова виконується:

$$t_i \ll T_p,$$

де t_i тривалість сигналу, $s_i(t)$; T_p - період повторення сигналів запиту.

За принципами обслуговування сигналів запиту – авіаційні ретранслятори радіолокаційних систем запиту належать до одноканальних систем масового обслуговування, з обробкою першого правильно поданого сигналу. Суть роботи системи полягає в тому, що при обслуговуванні коректно прийнятого допитного сигналу авіаційний відповідач закривається на певний час, який називається часом паралічу t_p . Наявність часу паралічу для відповідача обмежує пропускну здатність як самого відповідача, так і допитних РЛС загалом.

3.1.3. Шляхи підвищення пропускну здатності та завадостійкості каналів повітряного спостереження

Експлуатація допитних РЛС у смузі частот для передачі радіолокаційної інформації кооперативних систем спостереження призводить до суттєвої щільності внутрішньосистемних завад як у запитному, так і у відповідному каналах. Це ускладнює роботу систем при впливі навмисних та внутрішньосистемних завад.

Використання єдиного каналу передачі для сигналів запиту, а також побудова всієї системи радіолокаційного спостереження за принципом відкритої системи черг з відмовами, ускладнює роботу таких систем при впливі як навмисних, так і внутрішньосистемних перешкод. Слід зазначити, що робота радіолокаційних систем опитування в смузі частот передачі радіолокаційної інформації кооперативних систем спостереження призводить до значних експлуатаційних труднощів, це викликає значну щільність внутрішньосистемних перешкод як в каналі запиту, так і в каналі відповіді і, як

наслідок, істотно знижує перешкодостійкість розглянутих радіолокаційних систем опитування [87-89]. За принципами побудови інформаційні мережі розглянутих радіолокаційних систем опитування, безумовно, є несинхронними [88-90], що означає відсутність тимчасової синхронізації сигналів, що випромінюються авіаційними транспондерами окремих запитуючих пристроїв, а також відсутність будь-якої тимчасової синхронізації між різними радіолокаційними системами опитування.

За принципами обслуговування сигналів опитування авіаційні транспондери радіолокаційних систем опитування відносяться до одноканальних систем черги з обслуговуванням першого, правильно прийнятого сигналу опитування. Суть розглянутих систем полягає в тому, що при обслуговуванні правильно прийнятого транспондером літака опитувального сигналу він закривається на певний час, який називається часом паралічу. Величина часу паралічу залежить від режиму роботи радіолокаційних систем опитування (імітостійкі або неімітостійкі). Безсумнівно, наявність часу паралічу для авіаційного транспондера обмежує можливості як авіаційного транспондера [91, 92, 93], так і радіолокаційних систем опитування в цілому. Тому в якості характеристики завадостійкості інтеррогаційних радіолокаційних систем можна використовувати ймовірність виявлення повітряного об'єкта на авіаційному інтеррогаторі, яка визначається як ймовірність отримання необхідної кількості відповідних сигналів на запити від даного інтеррогатора. Пропускна здатність авіаційного транспондера інтеррогаційної радіолокаційної системи – можна виразити як коефіцієнт готовності авіаційного транспондера, який визначається як ймовірність того, що авіаційний транспондер видасть відповідний сигнал на конкретний сигнал опитування даного інтеррогатора.

Оскільки авіаційні транспондери обслуговують будь-який правильно прийнятий сигнал-запит (навіть імітований зацікавленою особою), вони відносяться до відкритих систем черг. Наявність тільки одного каналу для обслуговування сигналів-запитів і можливість паралізувати роботу авіаційного транспондера при обслуговуванні сигналів-запитів дозволяє віднести авіаційний транспондер до одноканальних відкритих систем черг з відмовами.

Таким чином, радіолокаційні системи опитування реалізуються на принципах, які багато в чому визначають як малошумність, так і завадостійкість.

Виходячи з вищесказаного, можна зробити висновок, що радіолокаційні системи опитування є запитно-відповідними системами передачі радіолокаційної інформації - вони містять канал сигналізації запиту і канал сигналізації відповіді. Принцип побудови розглянутих інформаційних систем, заснований на принципі відкритої одноканальної системи черг з відмовами, дозволяє зацікавленій особі як несанкціоновано використовувати авіаційні транспондери радіолокаційної системи опитування для отримання інформації, так і паралізувати роботу шляхом постановки навмисних корельованих (по каналу запиту) перешкод необхідної інтенсивності.

Крім того, використання примітивних часоінтервальних та позиційних кодів для кодування інформації значно знизило як інформаційну місткість каналів передачі, так і завадостійкість допитних РЛС загалом.

3.2. Розробка моделі ефективної швидкості передачі даних в каналі ЗРЛС

3.2.1. Модель і параметри каналу взаємодії ЗРЛС з повітряним транспортом

Покращення якості роботи бездротових мереж, до яких належать ЗРЛС, зазвичай спрямовано на регулювання якогось одного параметра, що не завжди є ефективним. Дійсно, середовище бездротового радіолокаційного зв'язку може страждати від безлічі факторів, починаючи від низького енергетичного коефіцієнта і закінчуючи зіткненнями пакетів, які різко збільшують кількість спроб, необхідних для відправки кожного пакета даних. Слід зазначити, що динамічне середовище, яке розглядається для передачі радіолокаційної інформації, як правило, створює багатовимірні проблеми, які не можуть бути вирішені регулюванням тільки одного параметра.

Отже, при високому рівні перешкод, в тому числі внутрішньосистемних, що особливо характерно для радіолокаційних систем допиту, виникає спокуса

просто зменшити швидкість передачі радіолокаційної інформації, щоб підвищити пропускну здатність розглянутої інформаційної системи. Однак зниження швидкості передачі радіолокаційних даних означає, що кожен інформаційний пакет буде витрачати більше часу на шлях від передавача до приймача, що, безсумнівно, призводить до збільшення ймовірності зіткнень з іншими інформаційними пакетами.

У зв'язку з цим значна частина досліджень з підвищення продуктивності бездротових локальних мереж присвячена, як правило, адаптивному налаштуванню [62-64]. Це пов'язано з тим, що адаптивне налаштування дозволяє оптимізувати її параметри в залежності від характеристик середовища поширення. Все це призводить до необхідності створення динамічних інтелектуальних адаптивних алгоритмів, які дозволять бездротовому пристрою динамічно оптимізувати кілька параметрів доступу до середовища передачі інформації у відповідь на зміни середовища, в якому працює пристрій. Це означає, що пристрій самостійно змінює свої параметри, вибирає найбільш оптимальний вузол доступу, мінімізує вплив перешкод, оптимізує роботу бездротової локальної мережі і, отже, покращує користувацький досвід.

Оскільки складно передбачити умови роботи бездротового пристрою, практично неможливо заздалегідь вибрати набір параметрів, який забезпечить оптимальну продуктивність для всіх додатків. Адаптивні алгоритми повинні вирішувати цю проблему, дозволяючи пристрою самостійно коригувати свої налаштування в міру зміни умов поширення сигналу, наприклад, коли раптово зникають перешкоди або вузол доступу стає перевантаженим. Слід зазначити, що такі алгоритми також спрощують розгортання бездротових пристроїв, оскільки розробникам не потрібно будувати гіпотези про характер мережевого трафіку, який буде відчувати пристрій під час роботи.

При використанні адаптивного алгоритму можна одночасно зі зменшенням швидкості передачі радіолокаційної інформації зменшити і значення максимального розміру переданого інформаційного пакета. Безсумнівно, це знижує ймовірність зіткнень при одночасній передачі декількох пакетів радіолокаційної інформації. При цьому, як правило, змінюється і поріг

фрагментації інформаційних пакетів з метою встановлення оптимального розміру переданих пакетів даних. Складність полягає у визначенні оптимальної конфігурації для багатьох взаємопов'язаних параметрів. Адже зміна одного параметра (наприклад, швидкості передачі) впливає на оптимальні значення інших параметрів, наприклад, порогу максимального розміру інформаційного пакета. По суті, адаптивний алгоритм управління доступом до фізичних носіїв намагається знайти такий набір параметрів, який забезпечить оптимальну загальну пропускну здатність інформаційної системи.

Слід зазначити, що одним з основних завдань управління ресурсами будь-якої телекомунікаційної мережі з пакетною комутацією при наданні послуг є визначення компромісу між ступенем використання вже задіяних ресурсів інформаційної мережі та рівнем якості послуг, що надаються.

У звичайних умовах, з точки зору технічної та економічної ефективності, необхідно прагнути до найбільш повного використання задіяних мережевих ресурсів, а це, перш за все, пакетні комутатори, маршрутизатори та канали передачі інформації - з метою передачі якомога більших обсягів даних на одиницю вартості задіяного обладнання.

Безсумнівно, передбачити стан навколишнього перешкодової обстановки для каналу передачі радіолокаційної інформації, опитуючи радіолокаційні системи, дещо складно. Це пов'язано з тим, що практично неможливо заздалегідь визначити набір параметрів, який гарантував би оптимальні характеристики для всіх розглянутих застосувань опитувальних радіолокаційних систем. Адаптивні алгоритми, як правило, вирішують таке інформаційне завдання, що дозволяє пристрою самостійно коригувати свої налаштування одночасно зі зміною характеристик середовища передачі радіолокаційної інформації, наприклад, при виникненні перешкод, а також при перевантаженні каналу передачі радіолокаційної інформації.

При використанні адаптивного алгоритму можливо одночасно зі зменшенням швидкості передачі радіолокаційної інформації знижувати поріг готовності до передачі. Це знижує ймовірність колізій при одночасному відправленні декількох пакетів, а також змінює поріг фрагментації пакетів, щоб

задати оптимальний розмір наступних інформаційних пакетів. Завдання полягає у визначенні оптимальної конфігурації безлічі взаємопов'язаних параметрів. Таким чином, зміна одного параметра, наприклад, швидкості передачі інформації, впливає на оптимальні значення інших параметрів, зокрема, на поріг готовності до передачі радіолокаційної інформації.

Отже, на підставі вищевикладеного можна зробити висновок, що адаптивний алгоритм управління швидкістю передачі радіолокаційної інформації повинен прагнути до знаходження такого набору параметрів, який забезпечить оптимальну сумарну пропускну здатність всього каналу передачі радіолокаційної інформації по каналах вторинної радіолокації.

Слід зазначити, що робота мережі передачі пакетної радіолокаційної інформації може вважатися ефективною лише в тому випадку, якщо її ресурси істотно завантажені, але не перевантажені. Усвідомлений вибір значення коефіцієнта використання ресурсів з урахуванням тонкої структури умов їх експлуатації має вирішальне значення. Дійсно, значення цього коефіцієнта безпосередньо впливає на розмір черг інформаційних пакетів до ресурсу, час затримки інформаційних пакетів у чергах, а також на якість надання послуг з передачі радіолокаційної інформації.

Тому в процесі вдосконалення роботи систем розпізнавання «свій-чужий» необхідно знаходити оптимальний компроміс у досягненні двох протилежних цілей. З одного боку, слід прагнути до підвищення якості обробки трафіку, тобто до зменшення затримок при передачі інформаційних пакетів і зниження ймовірності їх втрат. На практиці це досягається в першу чергу за рахунок резервування ресурсів. Однак для цього потрібна наявність додаткової, в даний момент невикористаної, частки пропускну здатності системи передачі радіолокаційної інформації.

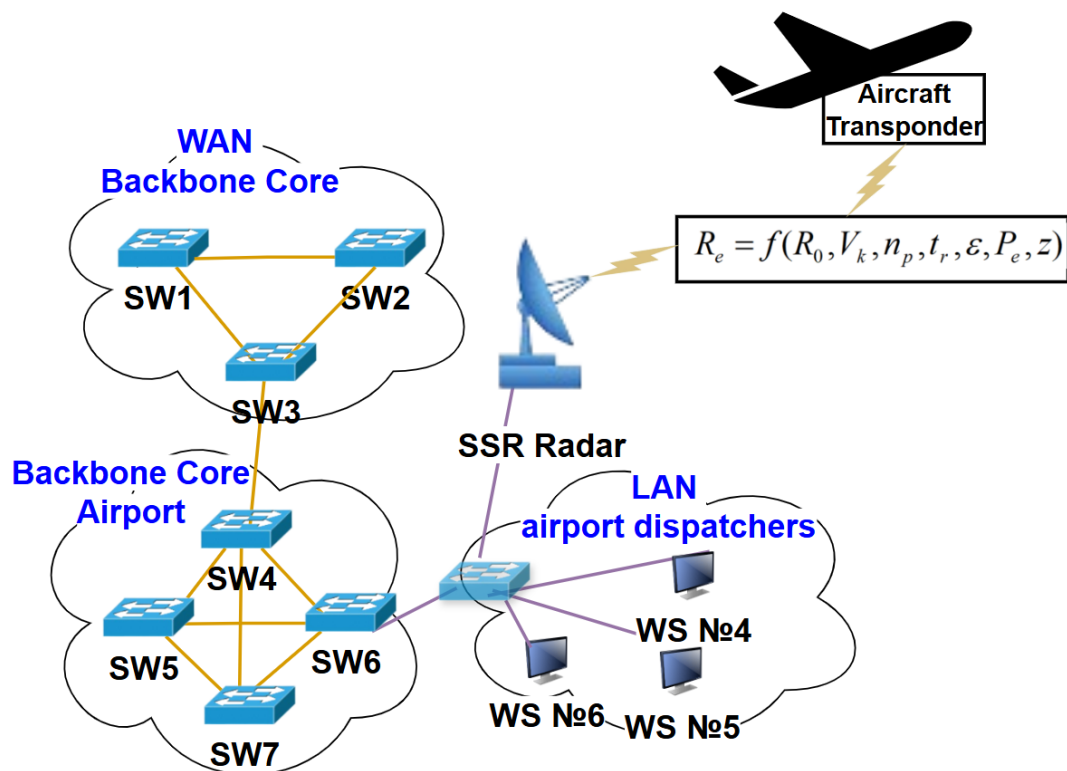


Рис. 3.4. Структурна схема передавання даних вторинної радіолокації між бортовим транспондером та SSR

З іншого боку, необхідно прагнути до максимально можливого інформаційного завантаження всіх ресурсів мережі з метою підвищення економічних показників її функціонування. Компроміс у досягненні вищезазначених цілей, як показує практика, і становить основний зміст завдання оптимізації функціонування розглянутої мережі передачі радіолокаційної інформації.

Для сучасних пакетних мереж передачі радіолокаційної інформації параметр навантаження пов'язаний з такими показниками якості обслуговування (QoS), як час затримки інформаційного повідомлення, а також ймовірність втрати пакета радіолокаційної інформації. Однак слід зазначити, що обидва ці показники якості обслуговування визначаються нічим іншим, як пропускнуою здатністю або швидкістю передачі радіолокаційної інформації [73, 93].

Структурна схема передавання даних вторинної радіолокації між бортовим транспондером та SSR представлена на рис 3.4.

3.2.2. Метод оптимізації параметрів каналу взаємодії ЗРЛС з повітряним транспортом по показнику пропускної спроможності.

Ефективною робота мережі передачі пакетної інформації може вважатися лише тоді, коли її ресурси суттєво завантажені, але не перевантажені. Враховуючи реальні чинники, такі як завади, що призводять до збільшення ймовірності одиночних і групових помилок, ефективна швидкість передачі радіолокаційної інформації R_e може бути оцінена через параметри каналу (рис. 3.4):

$$R_e = f(R_0, V_k, n_p, t_r, \varepsilon, P_e, z) \quad (3.1),$$

де R_0 – потенційна швидкість передачі пакетів радіолокаційної інформації по каналах опитувальних радіолокаційних систем; V_k – швидкість кодування, n_p – довжина пакета радіолокаційної інформації; t_r – час поширення сигналу по каналу зв'язку, а також аналізу і підтвердження (прийому пакета), ε – індикатор групування помилок через перешкоди, z – кількість повторних запитів; P_e – ймовірність виходу з ладу окремого елемента сигналу передачі радіолокаційної інформації. При цьому ймовірність відмови одного сигналу переданої радіолокаційної інформації може бути визначена на основі наступного співвідношення:

$$P_e = f(\vec{V}_m, q),$$

де $\vec{V}_m$ вектор параметрів модуляції сигналу, q співвідношення сигнал/шум.

Слід зазначити, що для передачі радіолокаційної інформації в цифровому вигляді по каналах радіопередачі даних, включаючи радіоканали розглянутих систем розпізнавання (вторинної радіолокації), як правило, слід використовувати сигнальні системи [82–84].

$$\vec{X} = \|X_{si}(t)\|,$$

де $i = \overline{1, N}$, N – загальна кількість використовуваних сигналів. Слід зазначити, що найпростішою сигнальною системою, безумовно, є бінарна система, що містить всього два сигнали, які можуть відрізнятися за фазою, частотою, амплітудою або формою.

Сигнальна система, як правило, характеризується використанням функцій невизначеності, а також спектральної щільності. Однак найбільш важливою характеристикою сигнальних систем, без сумніву, є їх енергетична відстань між сигналами.

$$D_{ij} = \int_0^T [x_{si}(t) - x_{sj}(t)] [x_{si}(t) - x_{sj}(t)]^* dt,$$

Де * - знак комплексного сполучення

Можна відзначити, що відстань між сигналами, безумовно, пов'язана з імовірністю помилки на біт інформації P_e . Дійсно, для гауссового каналу з бінарною модуляцією відстань між сигналами може бути визначена на основі наступного математичного виразу:

$$P_e = \frac{1}{2} \left[1 - F \left(\sqrt{\frac{D_{1,2}}{2N_0}} \right) \right],$$

де $N_0 = kT_{ch}\Delta F$ - спектральна щільність білого шуму, постійна Больцмана, температура шуму, ΔF смуга частот прийому сигналу

$$F(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-t^2/2} dt \quad \text{Функція Лапласа.}$$

З викладеного вище можна стверджувати, що чим більша відстань між сигналами, тим нижча ймовірність помилки на один біт переданої інформації.

Сигнали з фазовою маніпуляцією (PSK) зазвичай використовуються у вигляді бінарної (BPSK), квадратурної (QPSK) і восьмифазної (8-PSK) фазової модуляції.

Фазова маніпуляція (PSK, Phase Shift Keying) є сімейством цифрових модуляцій, де кожному бітовому слову відповідає певний кут фази гармонічної несучої. Зміна фази від символу до символу передає дані. Різновиди (BPSK, QPSK, 8-PSK) відрізняються кількістю допустимих фаз і, відповідно, бітів на символ та вимогами до якості каналу.

PSK (Phase Shift Keying) - «сигнали з фазовою маніпуляцією». Загальна технологія, де інформація кодується *кутом фази* несучої. Кількість фазових станів (M) довільна, $M \geq 2$. Від M залежить ефективність і завадостійкість. Біти на

символ описується виразом $\log_2 M$. PSK енергоефективна на слабких каналах але потребує когерентної синхронізації фази[60].

BPSK (Binary PSK) - «бінарна фазова модуляція». Кількість фазових станів (M) – 2 фазові стани, зазвичай 0° і 180° . Кількість біт на символ - 1. Завадостійкість найкраща серед PSK при однаковій потужності (найбільша мінімальна відстань між точками). Працює за низького SNR(Signal-to-Noise Ratio) відношення потужності сигналу до потужності шуму на вході приймача.

У децибелах. $SNR_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_s}{P_n} \right)$ де P_s - потужність сигналу, а P_n - потужність шуму, чим менше SNR, тим важче «розгледіти» сигнал у шумі. У цифрових системах часто використовують E_b/N_0 - відношення енергії на біт до спектральної щільності шуму. Воно напряму пов'язане з SNR і зручніше для оцінки ймовірності бітової помилки (BER). Спектральна ефективність BPSK базова але нижча ніж у QPSK/8-PSK (менше бітів/символ). Застосовують в каналах з дуже слабким сигналом.

QPSK (Quadrature PSK) - «квадратурна фазова модуляція». Кількість фазових станів(M) - 4 фазові стани, типово $45^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 315^\circ$ (або $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$). Завадостійкість гірша за BPSK, але все ще дуже добра, компроміс між надійністю й швидкістю. Спектральна ефективність вдвічі вища за BPSK (за однакової смуги — удвічі більше бітів/символ)[52,61,80].

8-PSK (Eight-Phase PSK) - восьмифазна модуляція, 8 фаз, рознесених кожні 45° . Має 3 біти на символ. Завадостійкість нижча, бо точки розташовані ближче одна до одної — потребує вищого SNR та кращого фазового синхронізму. Спектральна ефективність вища (більше бітів/символ) порівняно з BPSK/QPSK. Застосовують коли потрібно підняти швидкість у смузі, що вже виділена (часто разом із адаптивною модуляцією та корекцією помилок у стільникових і супутникових системах).

Енергетична відстань між сигналами, наведеними вище, визначається на основі таких співвідношень:

$$\text{BPSK} - D_{i,i+1} = 2\sqrt{E} ; \quad \text{QPSK} - D_{i,i+1} = 2\sqrt{E} \sin \frac{\pi}{4} ; \quad 8\text{-PSK} - D_{i,i+1} = 2\sqrt{E} \sin \frac{\pi}{8} .$$

Згодом, у міру збільшення числа, відстань між сусідніми сигналами швидко зменшується, незважаючи на те, що смуга частот, яка використовується при цьому, скорочується в $k = \log_2 M$ разів (відносно сигналів BPSK). У зв'язку з цим багатосимвольна фазова модуляція, як правило, використовується тільки для $M \leq 8$.

Природне прагнення підвищити завадостійкість прийому сигналів за рахунок збільшення відстані між сусідніми сигналами $D_{i,i+1}$ призводить до пошуку багатосимвольних сигналів з відстанню між сигналами, що перевищує таку при модуляції типу MPSK.

Зокрема, такими перевагами володіють сигнали з квадратурною амплітудною модуляцією (QAM), енергетична відстань для яких може бути визначена на основі наступного виразу: $D_{i,i+1} = \sqrt{2E}(\sqrt{M} - 1)^{-1}$.

Слід зазначити, що пропускна здатність каналу зв'язку залежить від типу і параметрів модуляції сигналу, ймовірностей помилок в радіоканалі, методу кодування, характеристик радіоканалу, тобто являє собою функцію перерахованих параметрів і характеристик:

$$C_k = f(\vec{V}_m, \vec{V}_{kod}, \vec{V}_{kan}, P_e), \quad (3.2)$$

де $\vec{V}_m$ - вектор параметрів модуляції, що включає в себе опис типу модуляції, значення швидкості модуляції V_m ; $\vec{V}_{kod}$ - вектор параметрів методів кодування; $\vec{V}_{kan}$ - вектор параметрів радіоканалу.

Однак зміна лише одного параметра, як правило, не є найкращим способом адаптації системи передачі радіолокаційної інформації до постійних змін у складному середовищі поширення сигналів.

По суті, адаптивний алгоритм управління доступом до фізичного середовища передачі завжди прагне знайти такий набір параметрів, який забезпечить оптимальну сумарну пропускну здатність відповідного пристрою передачі даних.

Методи оптимізації довжини переданого інформаційного пакета, як правило, базуються на адаптивному управлінні складовими пропускну здатності розглянутих інформаційних систем [89–91, 93], що входять до виразу (3.2).

Для розглянутої інформаційної пакетної мережі параметр навантаження пов'язаний з такими показниками якості обслуговування, як час затримки доставки, а також ймовірність втрати пакета даних, що в даний час характерно при передачі радіолокаційних даних.

Однак можна стверджувати, що зазначені показники якості обслуговування значною мірою визначаються пропускнуою здатністю або швидкістю передачі інформації.

Ми будемо враховувати такі реальні фактори, як перешкоди, які призводять до збільшення ймовірності помилок (одиначних і групових), і, як наслідок, до зниження реальної швидкості передачі інформації [88].

Виходячи з вищевикладеного, будемо вважати, що інформаційний пакет довжиною n_p містить k інформаційних елементів, що дозволить нам оцінити швидкість його кодування як $V_k = k/n_p$, а ймовірність помилки в розглянутому інформаційному пакеті будемо позначати як P . У цьому випадку час, що витрачається на одну передачу пакета радіолокаційної інформації, може бути оцінений на основі наступного математичного співвідношення:

$$T_p = t_r + \frac{n_p}{R_0}.$$

Середній час, що витрачається на передачу всього інформаційного пакету з урахуванням можливих повторів, може бути записаний у такому вигляді:

$$t_1 = T_p \sum_{i=1}^z P^i.$$

Надалі будемо вважати, що ймовірність відмови каналу передачі радіолокаційної інформації, а також час, що витрачається на відновлення T_v внаслідок навмисних і внутрішньосистемних перешкод, буде позначатися як P^z . Для розглянутого випадку вираз для ефективної швидкості передачі радіолокаційної інформації R_e може бути описано формулою:

$$R_e = V_k n_p \left[T_p \sum_{i=0}^{z-1} P^i + P^z (T_p + T_v) \right]^{-1}. \quad (3.1)$$

Якщо в представленій системі передачі радіолокаційної інформації використовуються ефективні коди, здатні виявляти помилки, то, безумовно, справедливим є наступний математичний вираз:

$$P \approx P(\geq 1, n_p) = P_e n_p^\varepsilon, \quad (3.2)$$

де $P(\geq 1, n_p)$ це ймовірністю збою в інформаційному пакеті з n_p довжина одного або декількох елементів. Вираз (3.4) демонструє вплив основних факторів, що сприяють зниженню швидкості передачі радіолокаційної інформації по розглянутих каналах передачі даних. Загальне вираження для оцінки ефективної швидкості передачі радіолокаційної інформації

R_e через канали допитних РЛС має наступний вигляд:

Якщо підставити вираз (3.4) у вираз (3.3) з урахуванням виразу (3.2), то отримаємо загальний вираз для оцінки ефективної швидкості передачі радіолокаційної інформації через канали систем радіолокаційного розпізнавання в такому вигляді:

$$R_e = V_k R_0 \frac{n_p (1 - P_e n_p^\varepsilon)}{(R_0 t_r + n_p) + R_0 T_v (P_e n_p^\varepsilon)^z}. \quad (3.3)$$

3.2.3. Аналіз компонент моделі та умови оптимізації

Вираз (3.5) відображає основні фактори, що знижують швидкість R_e . Множник $(1 - P_e n_p^\varepsilon)$ відображає ступінь зниження ефективної швидкості передачі радіолокаційної інформації R_e через вплив завад.

Перший член у знаменнику виражає величину втрат в ефективній швидкості передачі інформації R_e , що обумовлено часом, який витрачається на аналіз повідомлення в точці прийому і очікування підтвердження в точці передачі t_r .

Другий член визначає втрати в ефективній швидкості передачі інформації R_e , що обумовлено можливим впливом перешкод, а також перевищенням допустимої кількості повторних запитів z .

Аналіз наведеного математичного виразу (3.5) показує, що ефективна швидкість передачі інформації R_e залежно від енергетичних характеристик

прийнятих сигналів і довжини інформаційного пакета має максимум, значення якого залежить від наступних величин: R_0 , V_k , t_r , z , P_e і T_v . Значення R_e визначає реальну пропускну здатність мережевого обладнання і, отже, з одного боку - час передачі інформаційного пакета, а з іншого - вплив перешкод на системні характеристики обслуговуючої системи. Тому параметр можна вважати одним з основних факторів, що безпосередньо пов'язують параметр навантаження з показниками якості обслуговування.

Оптимальне значення довжини інформаційного пакета $n_{p(opt)}$ яке забезпечує можливість досягнення оптимальної швидкості передачі радіолокаційної інформації $R_{e(opt)}$, може бути оцінено на основі відповідного співвідношення:

$$\frac{dR_e}{dn_p} = 0.$$

Слід зазначити, що залежність, навіть за умови абсолютної надійності апаратного забезпечення, має трансцендентну форму і, отже, в загальному вигляді не має аналітичного рішення щодо довжини інформаційного пакета переданих радіолокаційних даних n_p . Таким чином, вищевикладені міркування дозволяють запропонувати алгоритм адаптивного управління передачею радіолокаційних даних. Цей алгоритм повинен аналізувати характеристики середовища бездротової передачі і повинен дозволяти бездротовому пристрою динамічно змінювати різні параметри рівня управління доступом до фізичного середовища в залежності від змін в середовищі поширення сигналу.

3.2.4. Метод підвищення пропускну здатності каналу ЗРЛС на основі використанням адаптивного алгоритму управління довжиною пакета даних

Запропонований далі алгоритм адаптивного керування передачею радіолокаційних даних повинен аналізувати характеристики бездротового середовища та дозволяти динамічно змінювати різні параметри рівня керування доступом до фізичного середовища. Алгоритм намагається знайти оптимальні налаштування для конкретного середовища. Подібно до алгоритму вибору

найкращого вузла доступу, алгоритм адаптивного управління доступом до фізичного середовища прагне знайти оптимальні налаштування для конкретного середовища. Виходячи з цього, не викликає сумнівів, що алгоритм повинен враховувати такі обставини:

1. Швидкість передачі, яка визначається цільовим значенням бітової помилки інформації при заданому відношенні сигнал/шум. Різні швидкості передачі використовують різні методи модуляції, тому вибір правильної швидкості передачі важливий для підтримки необхідної кількості помилок на біт інформації.

2. Поріг фрагментації, який визначає розмір кадрів доступу до фізичного середовища (з яких складаються інформаційні пакети), що передаються по розглянутому радіоканалу. Коли поріг дуже малий, накладні витрати, пов'язані з управлінням доступом до фізичного середовища і заголовками фізичного рівня, знижують загальну пропускну здатність, доступну клієнтському пристрою. Коли поріг занадто високий, кадри рівня управління доступом до фізичного середовища стають вразливими до перешкод.

Коли кількість споживачів і пристроїв, підключених до мережі, збільшується, пристрої повинні реагувати на зовнішні фактори, що мають вирішальний вплив на продуктивність всієї системи. Ці фактори можуть включати, але не обмежуватися: кількістю доступних точок доступу, завантаженням каналу, рівнем сигналу і перешкодами від інших пристроїв. Бездротові пристрої обов'язково повинні адаптуватися до постійно мінливого середовища поширення сигналу при збереженні оптимальної продуктивності. Зміна одного параметра (наприклад, швидкості передачі) значно впливає на оптимальні значення інших параметрів.

3.3. Результати моделювання і практичні рекомендації оптимізації довжини пакету в каналах ЗРЛС

3.3.1. Аналізу впливу параметрів

Завдання оптимізації роботи мережі систем спостереження повітряного простору полягає у знаходженні розумного компромісу між підвищенням якості обробки трафіку (зменшення затримок і втрат пакетів) та максимальною інформаційною завантаженістю всіх мережевих ресурсів. Усвідомлений вибір значення коефіцієнта використання ресурсу з урахуванням тонкої структури умов його експлуатації має вирішальне значення.

Значення цього коефіцієнта має прямий вплив на розмір черг пакетів до ресурсу і на час затримки пакетів у чергах, а в кінцевому підсумку - на якість телекомунікаційних послуг з передачі даних.

Тому в процесі вдосконалення функціонування інформаційної мережі намагаються знайти розумний компроміс у досягненні двох протилежних цілей.

З одного боку, прагнуть поліпшити якість обробки трафіку, тобто намагаються скоротити затримки при переміщенні інформаційних пакетів і, отже, зменшити втрати пакетів. На практиці це досягається в основному шляхом резервування ресурсів, що вимагає додаткової, в даний момент не використовуваної, частки пропускної здатності розглянутих систем.

З іншого боку, намагаються максимально підвищити інформаційне навантаження на всі ресурси мережі з метою підвищення економічних показників її функціонування.

Компроміс у досягненні вищезазначених цілей, як показує практика, і становить основний зміст завдання оптимізації роботи розглянутої інформаційної мережі систем спостереження за повітряним простором [88–90].

Чисельний аналіз впливу довжини інформаційних пакетів n_p на швидкість передачі R_e проводився на основі виразу (3.5).

3.3.2. Аналіз впливу показника групування помилок та швидкості передачі пакетів в каналах ЗРЛС

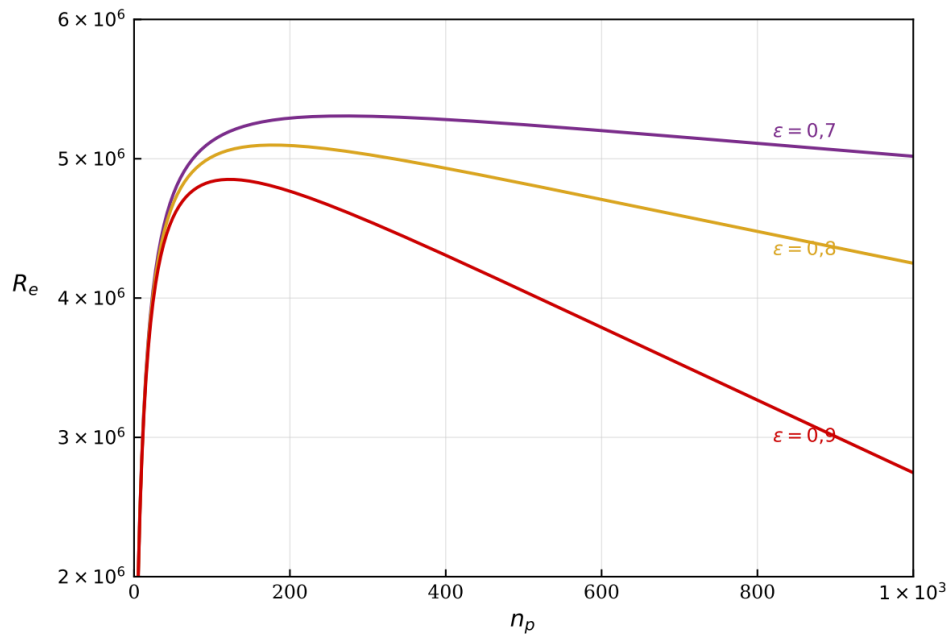


Рис. 3.5. Співвідношення $R_e = f(n_p, \epsilon)$.

На рис. 3.5 показано залежність швидкості передачі радіолокаційної інформації від довжини переданого інформаційного пакета радіолокаційних даних при різних ймовірностях групових помилок, тобто $R_e = f(n_p, \epsilon)$. У даному випадку були обрані наступні параметри даних: потенційна швидкість передачі інформаційних пакетів радіолокаційної інформації по каналах вторинних радіолокаційних систем $R_0 = 8 \times 10^6$, швидкість кодування $V_k = 3/4$, кількість повторних запитів $z = 2$, час на відновлення $T_v = 5 \cdot 10^{-5}$, час поширення сигналів по каналу зв'язку $t_p = 2 \cdot 10^{-6}$, ймовірність помилки на біт інформації $P_e = 10^{-3}$, потенційна швидкість передачі інформаційних пакетів $R_0 = 8 \times 10^6$.

З представлених залежностей випливає, що при заданих параметрах оптимальна довжина переданого інформаційного пакета становить 380 біт при показнику групування помилок 0.7, викликаних перешкодами; 210 біт - при показнику групування помилок 0.8, викликаних перешкодами; і 110 біт - при показнику групування помилок 0.9, викликаних перешкодами.

Швидкість передачі радіолокаційної інформації при оптимальному розмірі переданого пакета інформаційних даних складе:

- При $\varepsilon = 0.7$, $n_{p(opt)} = 380$ біт, $R_e = 5.42$ Мбіт/с
- При $\varepsilon = 0.8$, $n_{p(opt)} = 210$ біт, $R_e = 5.11$ Мбіт/с.
- При $\varepsilon = 0.9$, $n_{p(opt)} = 110$ біт, $R_e = 4.8$ Мбіт/с.

Зі збільшенням показника ε (більше групування помилок) оптимальна довжина пакета $n_{p(opt)}$ зменшується і починаючи з $\varepsilon \geq 0.7$ вона вже незначно залежить від цього параметра.

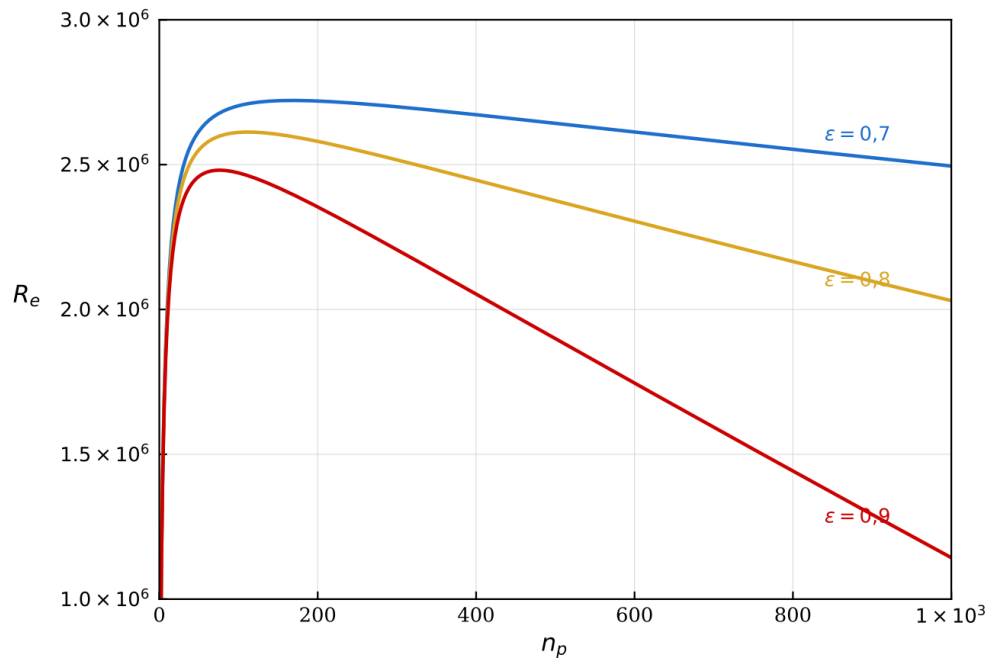


Рис. 3.6. Співвідношення $R_e = f(n_p, \varepsilon)$.

Зміна потенційної швидкості передачі пакетів радіолокаційної інформації по каналах вторинних радіолокаційних систем, як впливає з рис. 3.6, призводить до істотної зміни оптимальної довжини переданих пакетів радіолокаційної інформації.

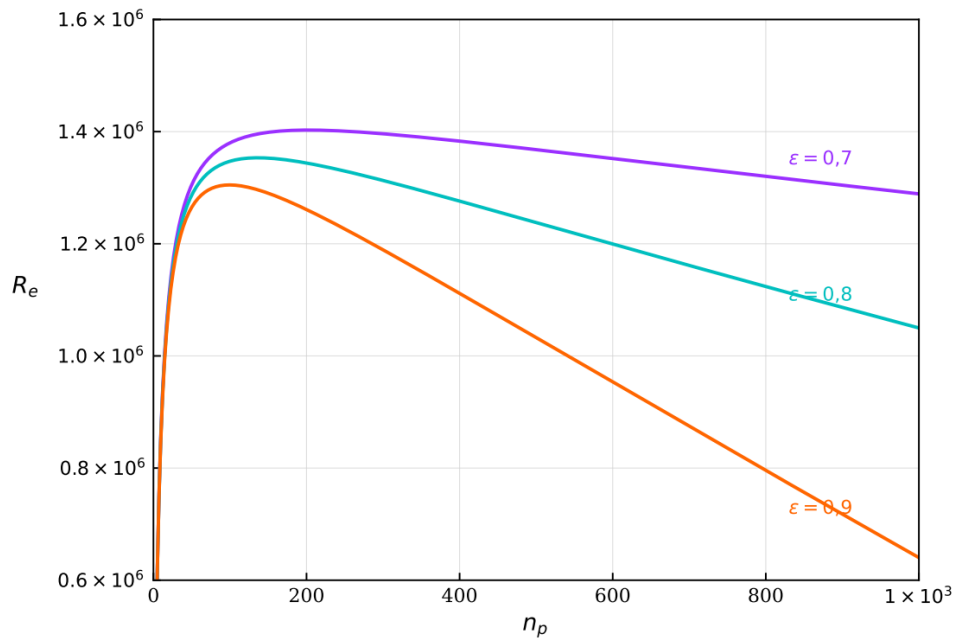


Рис. 3.7. Співвідношення $R_e = f(n_p, \varepsilon)$.

Так, при оптимальній довжині інформаційного пакета для передачі радіолокаційної інформації вона становить всього 240 біт, при оптимальній довжині інформаційного пакета для передачі радіолокаційної інформації $\varepsilon = 0.8$ - 180 біт, і при $\varepsilon = 0.9$ - 100 біт. У цьому випадку швидкість передачі радіолокаційної інформації становить відповідно 1.42 Мбіт/с для $\varepsilon = 0.7$; 1.39 Мбіт/с для $\varepsilon=0.8$ и 1.35 Мбіт/с для $\varepsilon=0.9$.

- При $\varepsilon = 0.7$, $n_{p(opt)} = 240$ біт, $R_e = 1.42$ Мбіт/с
- При $\varepsilon = 0.8$, $n_{p(opt)} = 180$ біт, $R_e = 1.39$ Мбіт/с.
- При $\varepsilon = 0.9$, $n_{p(opt)} = 100$ біт, $R_e = 1.35$ Мбіт/с.

Зміна потенційної швидкості передачі пакетів радіолокаційної інформації по каналах запитувачих радіолокаційних систем на $R_0 = 2 \times 10^6$, Як впливає з рис. 3.7, призводить до зміни оптимальної довжини переданих пакетів радіолокаційної інформації. Так, при цьому оптимальна довжина пакета передачі інформації становить всього 160 біт, при $\varepsilon = 0.8$ – 100 біт і при $\varepsilon = 0.9$ – 80 біт. При цьому максимальна швидкість передачі радіолокаційної інформації відповідно буде дорівнювати 1,42 Mbit для $\varepsilon = 0.7$; 1.39 Mbit для $\varepsilon=0.8$; и 1.35 Mbit для $\varepsilon=0.9$.

- При $\varepsilon = 0.7$, $n_{p(opt)} = 160$ біт, $R_e = 1.42$ Мбіт/с

- При $\varepsilon = 0.8$, $n_{p(opt)} = 100$ біт, $R_e = 1.39$ Мбіт/с.
- При $\varepsilon = 0.9$, $n_{p(opt)} = 80$ біт, $R_e = 1.35$ Мбіт/с.

Зміна потенційної швидкості R_0 призводить до суттєвої зміни оптимальної довжини пакетів.

- При $R_0 = 8 \times 10^5$ (Рис. 3.3), оптимальна довжина $n_{p(opt)} = 240$ біт (для $\varepsilon = 0.7$).
- При $R_0 = 2 \times 10^6$ (Рис. 3.4), оптимальна довжина $n_{p(opt)} = 160$ біт (для $\varepsilon = 0.7$).

З цього випливає, що зі зменшенням потенційної швидкості R_0 оптимальна довжина пакета $n_{p(opt)}$ зміщується у бік менших значень.

3.3.3. Вплив кількості повторних запитів

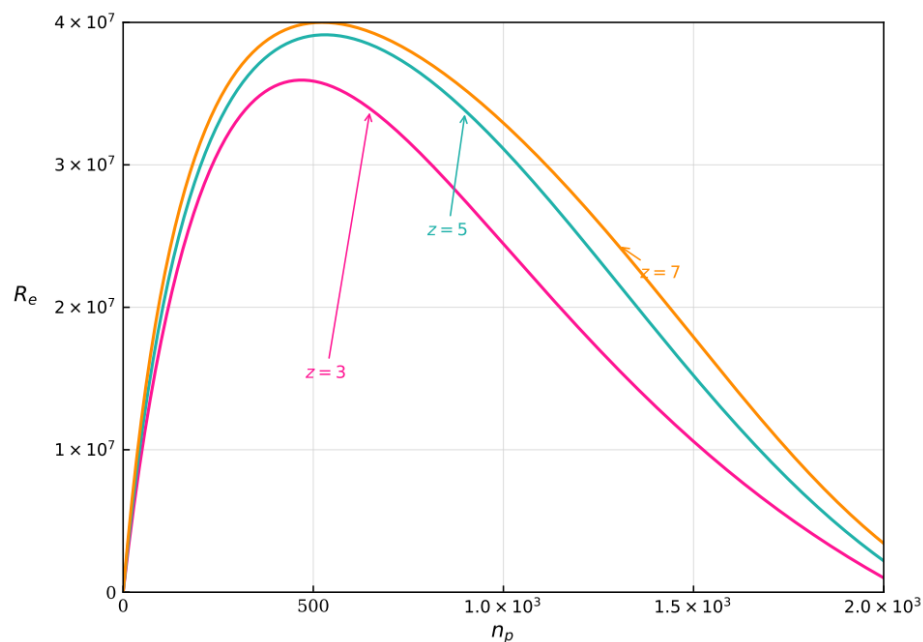


Рис. 3.8. Співвідношення $R_e = f(n_p, z)$.

На рис. 3.8 представлена залежність оптимальної довжини пакета радіолокаційної інформації від числа повторних запитів при оптимальному значенні довжини пакета, яка, безсумнівно, залежить від ймовірності групових помилок, а також від потенційної швидкості передачі пакетів радіолокаційної інформації при наступних параметрах розглянутої системи передачі радіолокаційних даних $R_0 = 8 \times 10^6$, $V_k = 3/4$, $\varepsilon = 0.9$, $T_v = 5 \cdot 10^{-5}$, $t_p = 2 \cdot 10^{-6}$, $P_e = 10^{-3}$.

Показано, що збільшення кількості повторних запитів призводить до зростання обсягу переданої інформації в одному інформаційному пакеті для передачі радіолокаційних даних.

Залежності, представлені на рис. 3.5, демонструють наявність оптимального значення довжини інформаційного пакета, що залежить від кількості повторних запитів. Так, як впливає з рис. 3.5, оптимальне значення довжини інформаційного пакета $z = 5$ становить 500 біт, при $z = 4$ – 480 біт, а при $z = 3$ – 300 біт.

Збільшення числа повторних запитів z збільшує обсяг інформації, що передається в одному пакеті. Залежності, представлені на Рис. 3.8, показують:

- При $z=5$, $n_{p(opt)} = 500$ біт.
- При $z=4$, $n_{p(opt)} = 480$ біт.
- При $z=3$, $n_{p(opt)} = 300$ біт.

3.3.4. Вплив швидкості кодування та вірогідність помилки на біт інформації

На рис. 3.9 представлена оцінка впливу ймовірності помилки на біт інформації P_e . Оптимальна довжина пакета переданої інформації при наступних параметрах розглянутої системи передачі радіолокаційних даних $R_0 = 8 \times 10^6$, $V_k = 3/4$, $\varepsilon = 0,9$, $T_v = 5 \cdot 10^{-5}$, $t_p = 2 \cdot 10^{-6}$, $P_e = 10^{-3}$.

Дані, представлені на рис. 3.6, показують, що існує оптимальне значення довжини пакета інформації, яке залежить від ймовірності помилки на біт інформації. Отже, при ймовірностях помилки на біт інформації 0,003, 0,002 і 0,001 оптимальна довжина пакета інформації становить $1,32 \times 10^3$, відповідно, 750 біт та 600 біт інформації.

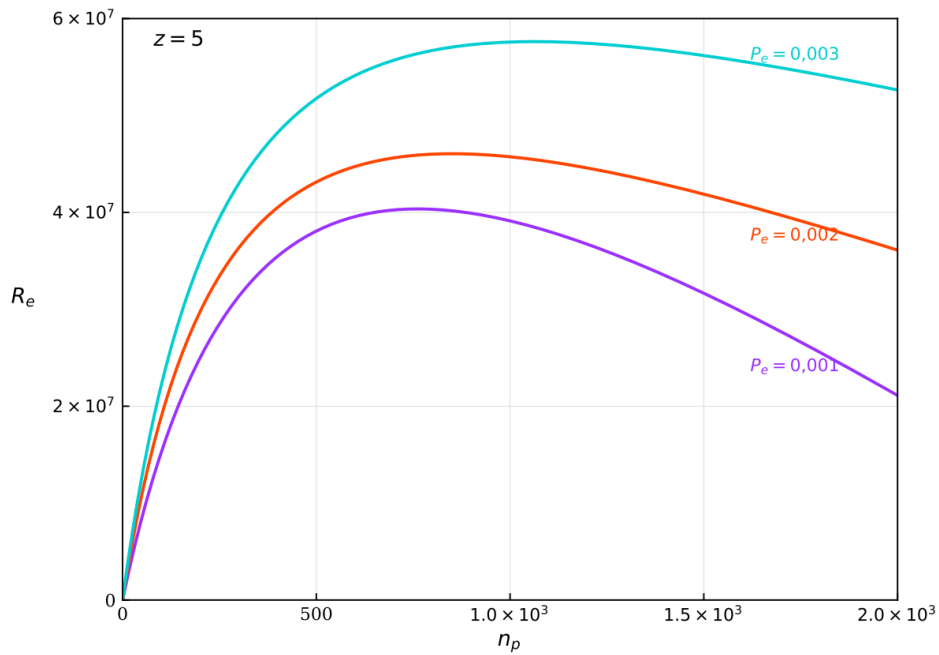


Рис. 3.9. Співвідношення $R_e = f(n_p, P_e)$.

Оцінка впливу швидкості кодування v_k . Оцінка впливу швидкості кодування на оптимальну довжину переданого пакета радіолокаційної інформації показана на рис. 3.9 при наступних параметрах розглянутої системи передачі радіолокаційних даних $R_0 = 8 \times 10^6$, $\varepsilon = 0.9$, $T_v = 5 \cdot 10^{-5}$, $t_p = 2 \cdot 10^{-6}$, $P_e = 10^{-3}$.

Залежності, показані на рис. 3.10, показують, що існує оптимальне значення довжини переданого пакета інформації, яке в невеликій мірі залежить від швидкості кодування. Дійсно, виходячи з рис. 3.10, оптимальне значення довжини переданого пакета інформації при швидкостях кодування, зазначених на рис. 3.10, становить приблизно 180 біт.

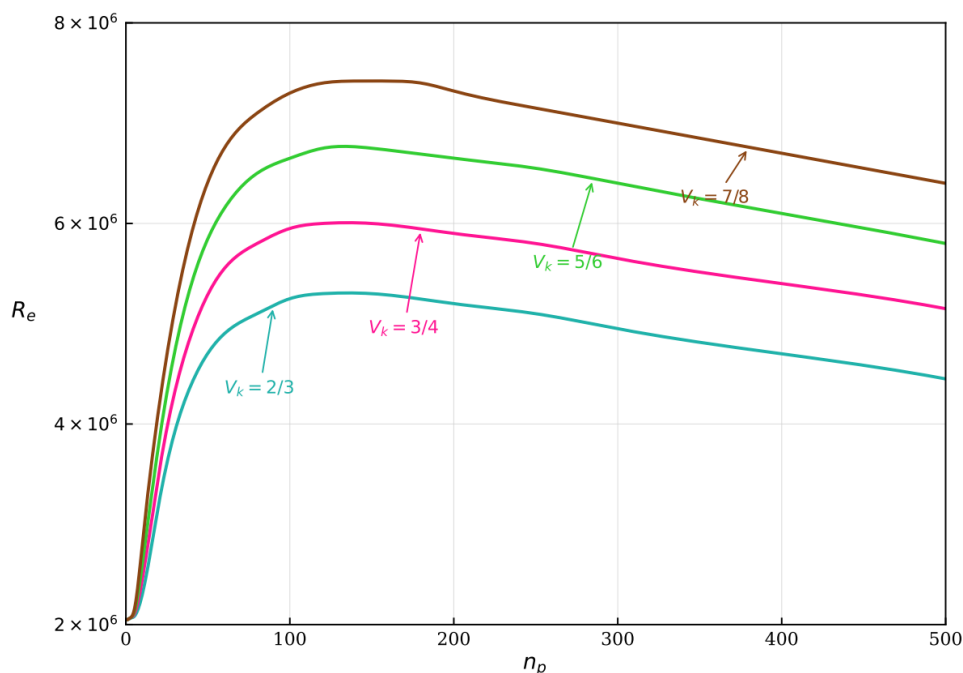


Рис. 3.10. Співвідношення $R_e = f(n_p, V_k)$.

3.3.5 Практичні рекомендації

Таким чином, виходячи з вищевикладеного, можна зробити висновок, що алгоритм адаптивного управління повинен враховувати швидкість передачі, яка визначається цільовим значенням ймовірності помилки біта інформації для даного відношення сигнал/шум. При різних швидкостях передачі радіолокаційної інформації використовуються різні методи модуляції. Це вказує на те, що для підтримки необхідної ймовірності помилки біта дуже важливо правильно підібрати швидкість передачі. Слід зазначити, що при використанні адаптивного алгоритму оптимізації довжини пакета інформації радіолокаційних даних поріг готовності до передачі також знижується одночасно зі зменшенням швидкості передачі радіолокаційної інформації. Ця особливість дещо знижує ймовірність колізій при одночасній передачі декількох інформаційних пакетів. Однак слід підкреслити, що це також змінює поріг фрагментації для визначення найкращого розміру нових інформаційних пакетів. Таким чином, завдання полягає у визначенні оптимальної конфігурації для безлічі взаємопов'язаних параметрів. Слід зазначити, що зміна одного параметра (наприклад, швидкості передачі інформації) значно впливає на оптимальні значення інших параметрів. Слід зазначити, що зміна одного єдиного параметра, як правило, не є найкращим

способом адаптації бездротового пристрою до постійних змін у складному середовищі поширення сигналу. По суті, адаптивний алгоритм управління намагається знайти набір параметрів, який забезпечує загальну оптимальну пропускну здатність розглянутих каналів системи опитування радіолокатора.

За результатами проведеного аналізу встановлено наступні практичні рекомендації щодо оптимізації роботи допитних РЛС:

- ефективна швидкість передачі радіолокаційної інформації R_e по каналах опитувальних радіолокаційних систем для спостереження повітряного простору, безумовно, має (залежно від довжини переданого пакета інформації n_p) максимальне значення $R_{e\max}$, яке при збільшенні потенційної швидкості передачі R_0 пакетів інформації радіолокаційної інформації зміщується в бік менших значень довжини переданого пакета інформації $n_{p(opt)}$. Екстремум залежності $R_e = f(n_p)$ чим більше значення потенційної швидкості передачі пакетів інформації радіолокаційної інформації по каналах опитувальних радіолокаційних систем, тим гостріше екстремум залежності - R_0 . Це вказує на менш критичний вибір n_p при зниженні потенційної швидкості передачі пакетів радіолокаційної інформації R_0 ;

- при зниженні ступеня групування помилок в каналі передачі радіолокаційної інформації, а також при збільшенні кількості поодиноких помилок (тобто при збільшенні значень ε), значення оптимальної довжини пакета переданої радіолокаційної інформації $n_{p\ opt}$ зменшується і, починаючи зі значення $\varepsilon = 0,6 \div 0,7$, вже не сильно залежить від представленого параметра ε ;

- доцільно вибирати значення допустимого числа повторних запитів (що є критерієм надійності щодо відмов, що виникають через перешкоди) в інтервалі $z = 3...5$. Менше значення кількості запитів z значно скорочує R_e ; при великих значеннях z , $n_{p\ opt}$ зростає, але в той же час R_e збільшується не значно;

- системи з більш високими значеннями потенційної швидкості передачі пакетів R_0 радіолокаційної інформації по каналах опитувальних радіолокаційних систем, з метою забезпечення можливості реалізації високих R_e

значень, повинні мати більш досконалі системи виявлення відмов, а також відновлення після відмов (тобто майже гарантовано $T_v \rightarrow 0$);

- доцільніше робити спроби в напрямку зниження втрат пакетів інформації (тобто зниження не за рахунок збільшення ємності буферної пам'яті, а за рахунок збільшення пропускної здатності розглянутої лінії передачі радіолокаційних даних або швидкості передачі R_e).

- Адаптивний алгоритм повинен одночасно враховувати і керувати швидкістю передачі (визначеною цільовим рівнем бітової помилки) та порогом фрагментації, оскільки зміна одного параметра (швидкість) значно впливає на оптимальні значення інших.

Висновки до третього розділу

1. Показано, що ЗРЛС у складі СУПР доцільно розглядати як асинхронну двоканальну систему передавання, де критичним вузлом є бортовий транспондер, який за принципом функціонування еквівалентний відкритій одноканальній СМО з відмовами та часом паралічу. Це безпосередньо обмежує пропускну здатність, підвищує ймовірність колізій і знижує завадостійкість.

2. Обґрунтовано, що спроби підвищення продуктивності лише зміною одного параметра (наприклад, зменшенням швидкості передавання) є недостатніми, оскільки це змінює час перебування пакета в каналі та, як наслідок, впливає на частоту колізій і потребу в повторях. Ефективне покращення можливе лише через узгоджене багатопараметричне адаптивне керування.

3. Розроблено модель ефективної швидкості передавання радіолокаційної інформації з урахуванням реальних чинників каналу: швидкості кодування, довжини пакета, часу поширення/підтвердження, групування помилок, кількості повторних запитів, а також імовірності відмов елементів передавання. Модель демонструє наявність максимуму ефективної швидкості залежно від довжини пакета, тобто існування оптимального значення довжини інформаційного пакета.

4. Показано, що умова оптимальності довжини пакета має трансцендентний характер і в загальному випадку потребує чисельного визначення оптимуму для заданих параметрів завадової/навантажувальної обстановки.

5. За результатами чисельного моделювання встановлено практично важливу закономірність: зі зростанням показника групування помилок оптимальна довжина пакета зменшується. Для наведеного набору параметрів отримано характерні оптимуми:

- При $\varepsilon = 0.7$, $n_{p(opt)} = 380$ біт, $R_e = 5.42$ Мбіт/с
- При $\varepsilon = 0.8$, $n_{p(opt)} = 210$ біт, $R_e = 5.11$ Мбіт/с.
- При $\varepsilon = 0.9$, $n_{p(opt)} = 110$ біт, $R_e = 4.8$ Мбіт/с.

6. Показано, що зменшення потенційної швидкості каналу зміщує оптимальну довжину пакета в бік менших значень (наприклад, для розглянутих режимів отримано характерні оптимуми порядку $n_{p(opt)}$ від 240 до 160 біт при фіксованих умовах $\varepsilon = 0.7$), що потрібно враховувати при роботі в режимах з обмеженими ресурсами та підвищеними завадами.

7. Досліджено вплив кількості повторних запитів z . Збільшення z підвищує надійність щодо відмов, але змінює оптимальний розмір пакета; отримані орієнтовні оптимуми:

- при $z=5$ - близько 500 біт,
- при $z=4$ - близько 480 біт,
- при $z=3$ - близько 300 біт.

На цій основі доцільно обирати допустиме число повторів у помірному інтервалі, щоб не роздувати службові витрати й не провокувати перевантаження каналу.

8. Показано, що зростання ймовірності бітової помилки зумовлює зміну оптимальної довжини пакета; при зменшенні BER оптимальна довжина, як правило, зростає (для наведених прикладів порядку 600–750 біт), тоді як вплив швидкості кодування на оптимальну довжину пакета є відносно слабшим, оптимум зберігається в близькому діапазоні.

9. Сформульовано принципи адаптивного алгоритму керування, який має одночасно враховувати і узгоджено змінювати швидкість та режим передавання, швидкість кодування та параметри пакетизації (довжину пакета, поріг фрагментації), оскільки зміна одного параметра істотно зсуває оптимальні значення інших. Такий алгоритм може бути реалізований як програмно-керована функція в модернізованій SDN/NFV інфраструктурі СУПР, забезпечуючи підвищення ефективної пропускної здатності та стійкості передавання радіолокаційних даних у каналах SSR.

РОЗДІЛ 4.

МОДЕЛЮВАННЯ МЕРЕЖІ СУПРА З ВИКОРИСТАННЯМ SDN- КОНТРОЛЕРА НА БАЗІ ОПЕРАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ONOS

4.1 Передумови побудови SDN мережі СУПРА на базі ONOS

Є різні варіанти побудови рівня управління мережі SDN. Однак перевага віддається ONOS [19, 94, 95], тому що:

- у структурі ONOS є платформа розподілених застосунків ;
- ONOS використовує відкриті мережеві інтерфейси;
- у складі інтерфейсів є набір протоколів і технологічних інтерфейсів, серед яких OpenFlow, OF-CONFIG, P4, T-API та інші
- архітектура ONOS забезпечує низку практично значущих ефектів: спрощена процедура переустановлення й оновлення програмного забезпечення, зниження витрат на впровадження нових технологій, можливість поетапного нарощування переліку задач керування через додавання нових функціональних модулів.

Для проведення експерименту будемо використовувати структуру мережі, яка еквівалентна мережі СУПР аеропорту (рис. 4.1).

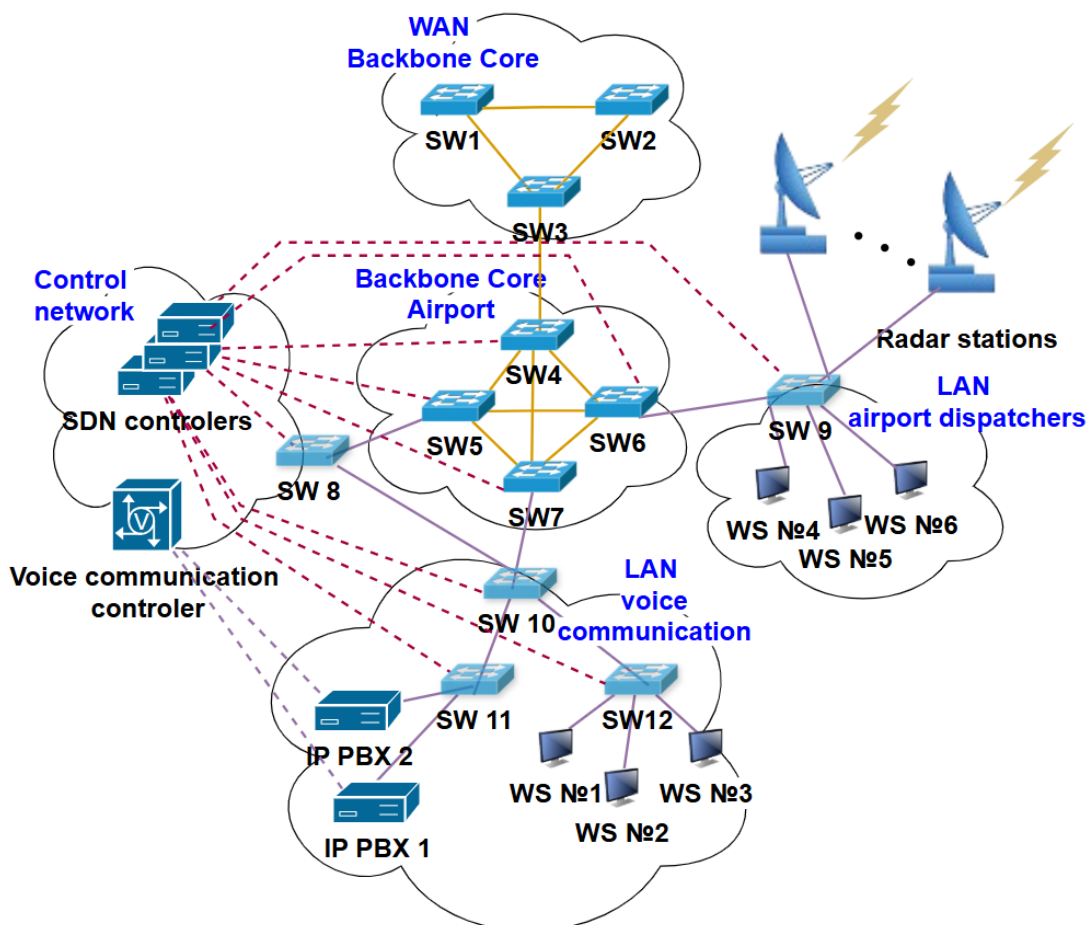


Рис. 4.1 Узагальнена запропонована архітектура мережі СУПА

Для розгортання мережі і виконання моделювання необхідно виконати наступні кроки [96, 97, 98]:

- імпортувати VM Ubuntu у VirtualBox;
- завантажити та встановити ONOS: встановлено середовище та виконано передумови для запуску ONOS;
- встановити Mininet;
- створити топологію мережі SDN в ONOS, яка відповідає мережі СУПР аеропорту (рис.4.1);
- створити екосистему ONOS для цього виконати основні команди та налаштувати інтерфейси (CLI, GUI, REST) (рис. 4.2).

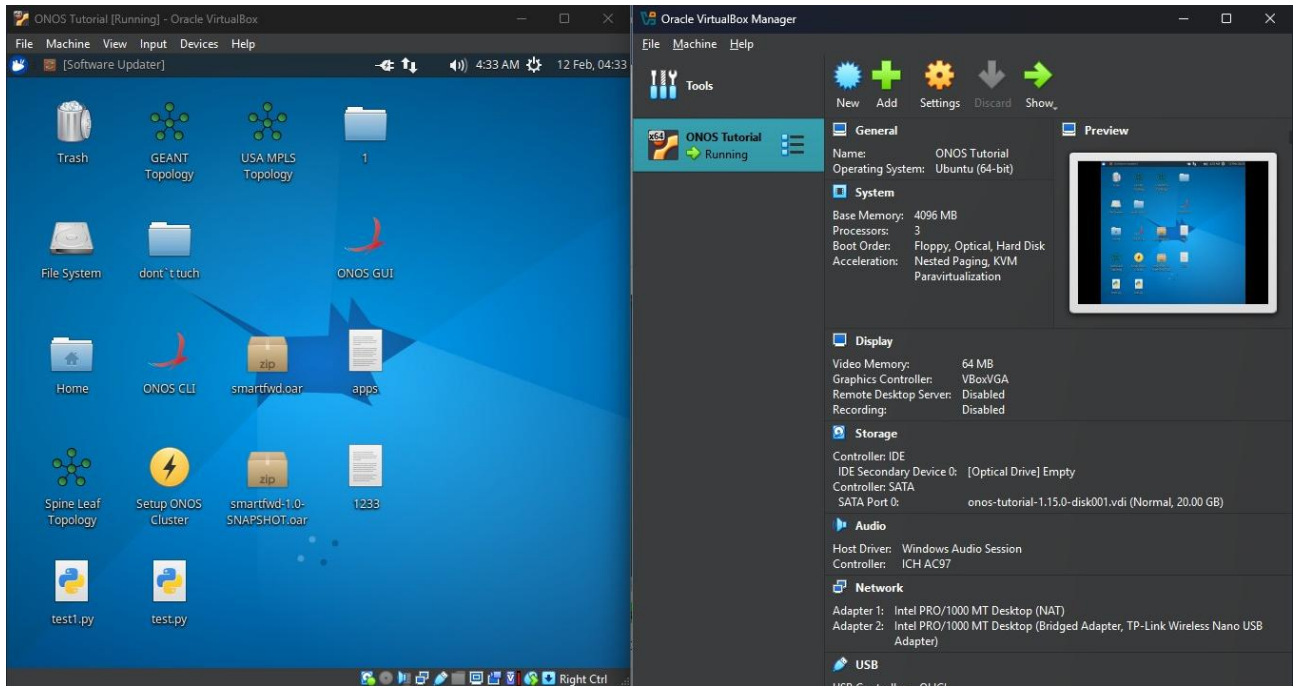


Рис. 4.2 Скріншот з програми віртуалізації Oracle VirtualBox

Після створення екосистеми ONOS та налаштування інтерфейсів можливе переходити процесу моделювання.

4.2 Налаштування архітектури мережі СУПРА

В Mininet можливе використання де кілька готових зразків топології. Однак, мережа СУПРА достатньо складна, тому потребує досить великих зусиль в налаштуванні. Тому для перевірки, на першому етапі ми будемо використовувати просту листкова-хребетну топологію. Це топологія, де кожен «лист доступу» з'єднаний із хребтом. Вона призначена для посилення потоку трафіку зі сходу на захід між комутаторами доступу в одному кластері. Завдяки цій топології мережі, з'єднання через магістральну мережу потребують лише переходу від одного листка до іншого. Це забезпечує мінімум затримки та відсутність вузьких місць.

На рис 4.3 спроектована частина топології мережі СУПРА, для перевірки функціонування макету.

Одна з програм, доступна зі стандартним розповсюдженням ONOS, дозволяє автоматично розміщувати топологію мережі в графічному інтерфейсі користувача. Для цього потрібно ввести наступну команду:

onos> topo-layout access.

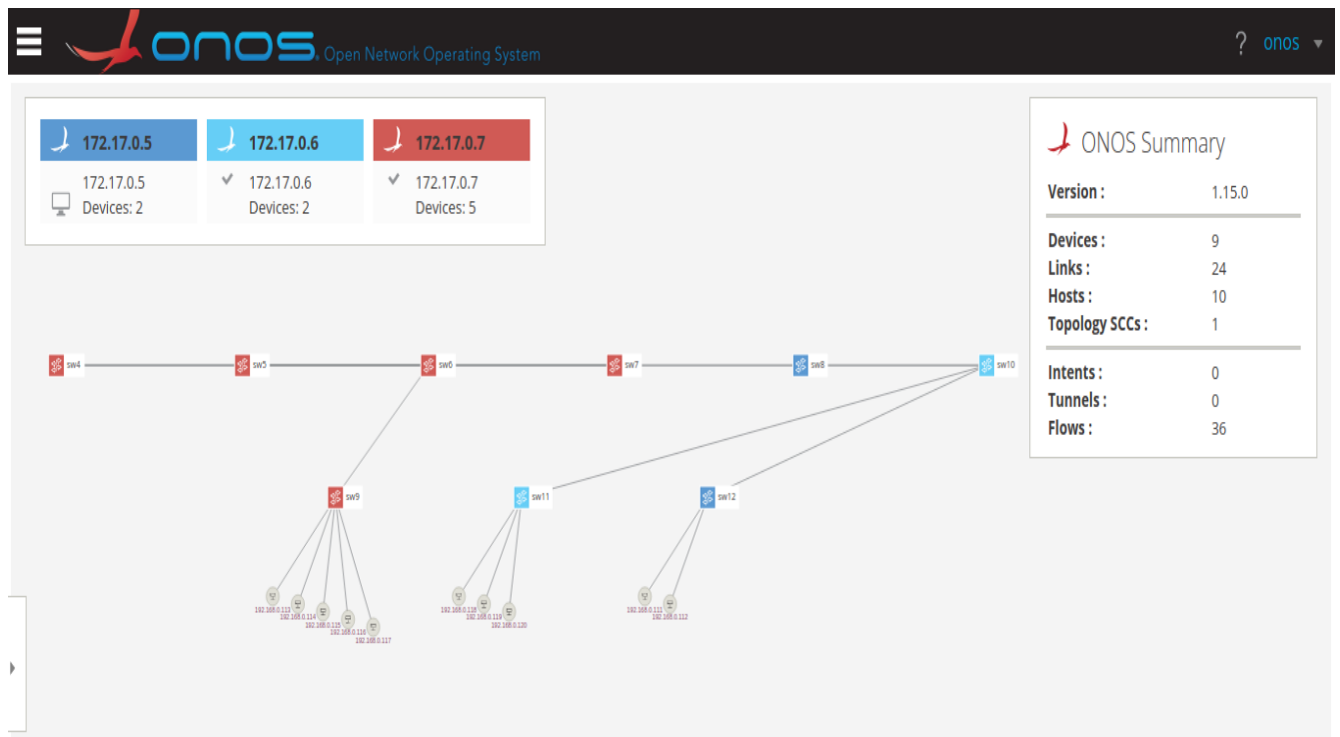


Рис. 4.3 Частина топології мережі СУПРА, для перевірки функціонування макету.

Після перевірки переходимо до моделювання всієї архітектури мережі СУПРА

4.3 Побудова SDN мережі СУПРА та перелік її елементів

Кластер SDN мережі СУПРА, який буде досліджено, складається з дев'яти свічів, до яких підключено десять хостів.

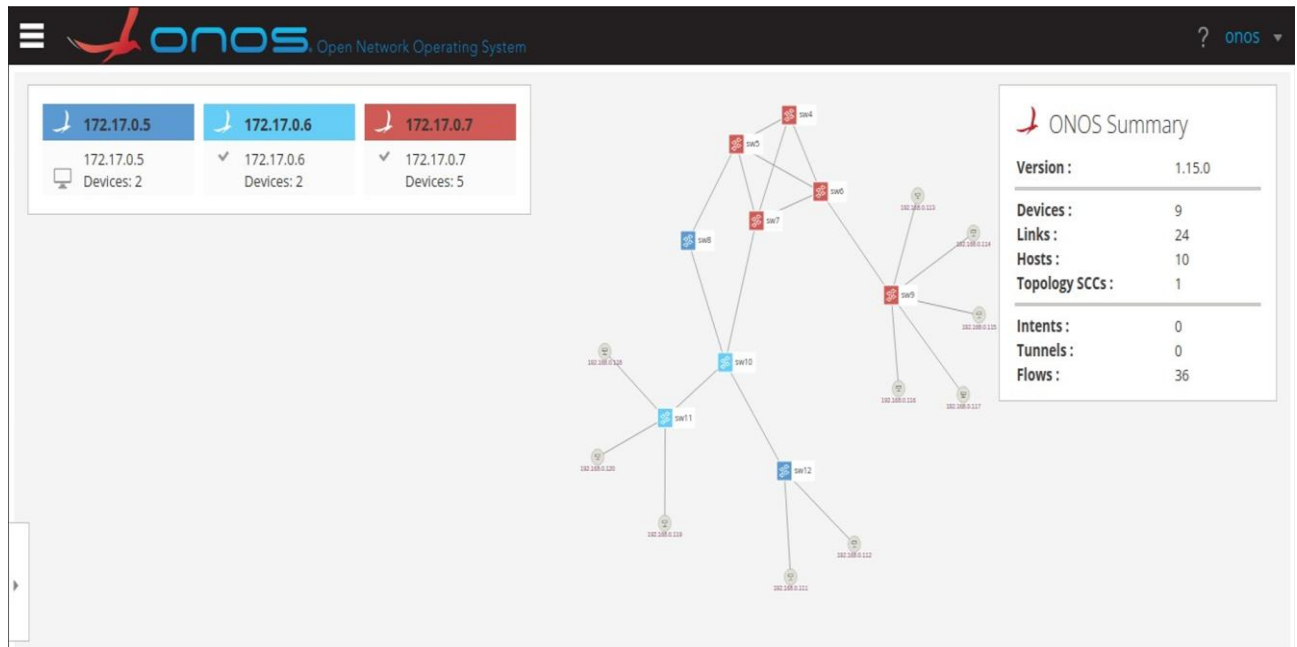


Рис. 4.4 Кластер SDN мережі СУПРА

Потрібно звернути увагу, що на рис.4.4 зображенні 2 комутатори, які відносяться до 1-го контролера (172.17.0.5), 2 комутатори до 2-го контролера (172.17.0.6) та 5 комутаторів до 3-го контролера (172.17.0.7). Як ми бачимо, розподіл навантаження в кластері між контролерами не рівномірний.

Графічний інтерфейс ONOS (як і CLI) дозволяє користувачеві здійснити балансування, де мережеві пристрої будуть приблизно порівну розподілені між усіма підмережами в кластері ONOS. Після балансування кластер буде виглядати так, як це відображено на рис. 4.5


```
mininet> ws5 ping -c 5 ws1
PING 192.168.0.111 (192.168.0.111) 56(84) bytes of data.
64 bytes from 192.168.0.111: icmp_seq=1 ttl=64 time=13.0 ms
64 bytes from 192.168.0.111: icmp_seq=2 ttl=64 time=0.357 ms
64 bytes from 192.168.0.111: icmp_seq=3 ttl=64 time=0.057 ms
64 bytes from 192.168.0.111: icmp_seq=4 ttl=64 time=0.054 ms
64 bytes from 192.168.0.111: icmp_seq=5 ttl=64 time=0.062 ms

--- 192.168.0.111 ping statistics ---
5 packets transmitted, 5 received, 0% packet loss, time 4006ms
rtt min/avg/max/mdev = 0.054/2.722/13.083/5.181 ms
```

Рис. 4.6 Результат виконання команди ping у вікні терміналу Mininet

Для того, щоб відслідкувати маршрут проходження трафіку між хостами необхідно зробити наступне. З урахуванням топології мережі ONOS обчислює всі найкоротші шляхи між будь-якими двома вузлами. Це особливо корисно для додатків, щоб отримати інформацію про шлях для встановлення потоку або іншого використання. Команда *paths* приймає два аргументи - ID пристроїв. Приклад:

```
onos> paths of:0000000000000009 of:0000000000000012
of:0000000000000009/1-of:0000000000000006/4==>of:0000000000000006/2-of:0000000000
00000007/2==>of:0000000000000007/4-of:0000000000000010/1==>of:0000000000000010/4-
of:00000000000000012/1; cost=4.0
onos> █
```

Рис. 4.7 Результат виконання команди paths у вікні терміналу ONOS

Вивід команд вище показує різну кількість шляхів між вказаними свічами, заданими у вигляді ID, а також метрики шляхів.

4.5 Рішення завдань управління трафіком з використанням підсистеми Intent

ONOS Intent Framework перетворює політики високого рівня, які називаються намірами, у встановлені правила, які, по суті, є діючими командами для мережевого середовища. У процесі встановлення виконується конфігурація кожного пристрою, який безпосередньо бере участь у роботі. ONOS здебільшого базується на пристроях і не підтримує керування технологічними доменами, які контролюються спеціальними рішеннями постачальників, такими як пропріетарні контролери або системи керування мережею. Як правило, такі

контролери забезпечують інтерфейс надання «служби» для надання повного шляху замість окремих конфігурацій для окремих пристроїв.

Intent - це незмінний об'єкт моделі, який описує запит програми до ядра ONOS для зміни поведінки мережі. Ядро ONOS приймає специфікації інтенцій і перетворює їх за допомогою компіляції в інстальовані інтенції, які, по суті, є діючими операціями в мережевому середовищі. Ці дії виконуються за допомогою процесу інсталяції, що призводить до деяких змін у середовищі, таких як підготовка тунельних з'єднань, встановлення правил потоку на комутаторі або резервування оптичних лямбда (довжин хвиль). Незважаючи на те, що ядро ONOS надає набір вбудованих інтенцій, їх компіляторів та інсталяторів, структура інтенцій розроблена таким чином, щоб бути розширюваною. Це дозволяє динамічно додавати інтенції та їхні компілятори чи інсталятори до ONOS під час виконання. Це дозволяє розширити початковий арсенал підключення та інтенцій на основі політик, доступних в ONOS за замовчуванням. [19, 94]

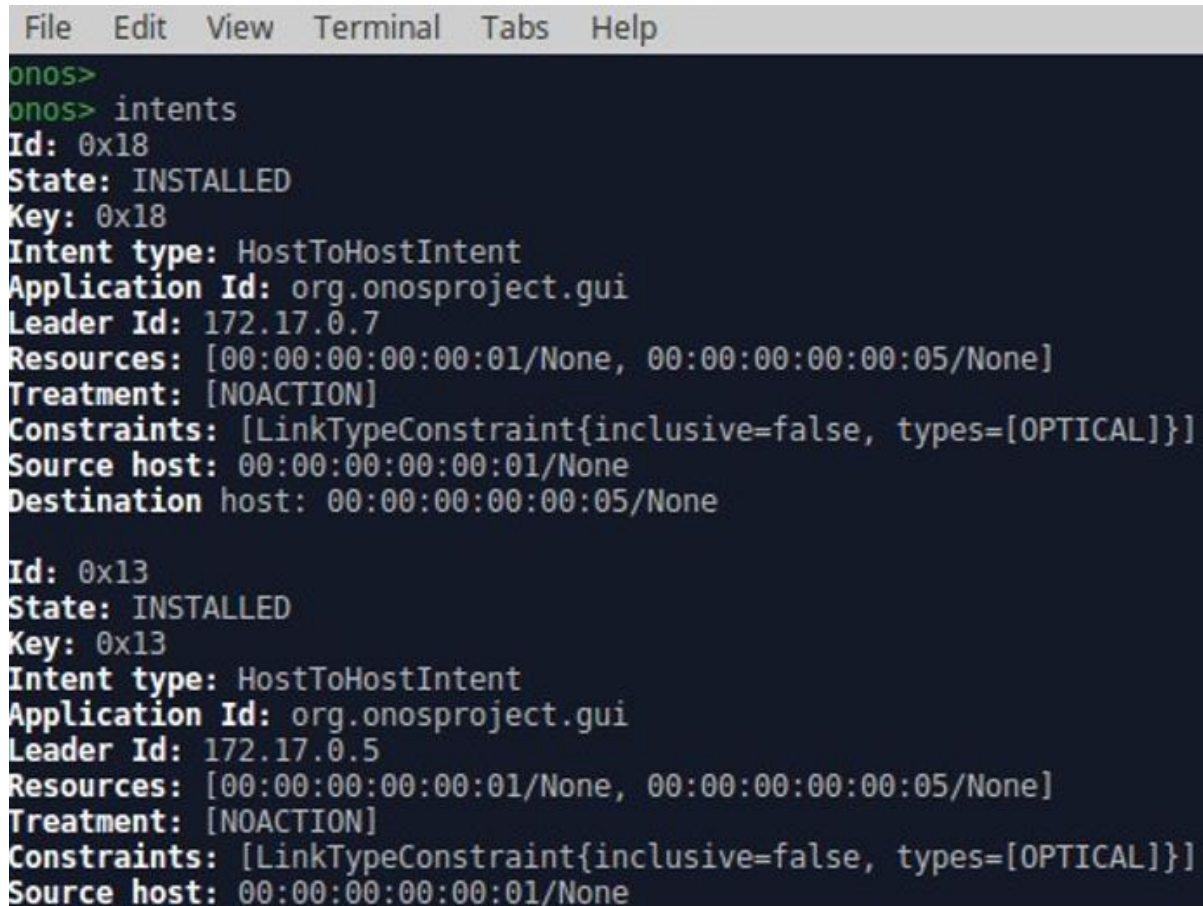
Однією з головних переваг використання інтенцій перед простим використанням записів потоку для програмування мережі є те, що інтенції відстежують стан мережі та змінюють конфігурацію, щоб задовольнити всі потреби. Наприклад, якщо з'єднання обірветься, структура інтенцій перенаправить потік на альтернативний шлях. Проте якщо альтернативного шляху немає, то в цьому випадку інтенція увійде в невдалий стан і залишиться там, доки шлях не стане доступним.

Додаємо інтенцію підключення до двох хостів кінцевих станцій:

```
onos> add-host-intent 00:00:00:00:00:01/None 00:00:00:00:00:10/None
Host to Host intent submitted:
HostToHostIntent{id=0x6, key=0x6, appId=DefaultApplicationId{id=38, name=org.onosproject.cli}, priority=100,
resources=[00:00:00:00:00:01/None, 00:00:00:00:00:10/None], selector=DefaultTrafficSelector{criteria=[]},
treatment=DefaultTrafficTreatment{immediate=[NOACTION], deferred=[], transition=None, meter=[], cleared=false,
StatTrigger=null, metadata=null}, constraints=[LinkTypeConstraint{inclusive=false, types=[OPTICAL]}],
resourceGroup=null, one=00:00:00:00:00:01/None, two=00:00:00:00:00:10/None}
```

Рис. 4.8 Результат виконання команди add-host-intent у вікні терміналу ONOS

Попередня дія забезпечить шлях між хостами 192.168.0.111 (WS1) і 192.168.0.115 (WS5), і відповідно можна переконатись в тому, що інтенцію встановлено.



```
File Edit View Terminal Tabs Help
onos>
onos> intents
Id: 0x18
State: INSTALLED
Key: 0x18
Intent type: HostToHostIntent
Application Id: org.onosproject.gui
Leader Id: 172.17.0.7
Resources: [00:00:00:00:00:01/None, 00:00:00:00:00:05/None]
Treatment: [NOACTION]
Constraints: [LinkTypeConstraint{inclusive=false, types=[OPTICAL]}]
Source host: 00:00:00:00:00:01/None
Destination host: 00:00:00:00:00:05/None

Id: 0x13
State: INSTALLED
Key: 0x13
Intent type: HostToHostIntent
Application Id: org.onosproject.gui
Leader Id: 172.17.0.5
Resources: [00:00:00:00:00:01/None, 00:00:00:00:00:05/None]
Treatment: [NOACTION]
Constraints: [LinkTypeConstraint{inclusive=false, types=[OPTICAL]}]
Source host: 00:00:00:00:00:01/None
```

Рис. 4.9. Результат виконання команди intents у вікні терміналу ONOS

Отже, тепер, коли інтенцію встановлено, можна її візуалізувати за допомогою графічного інтерфейсу ONOS, вибравши, наприклад інформаційний напрямок WS1 – WS5, та показати шляхи передбачені інтенціями.

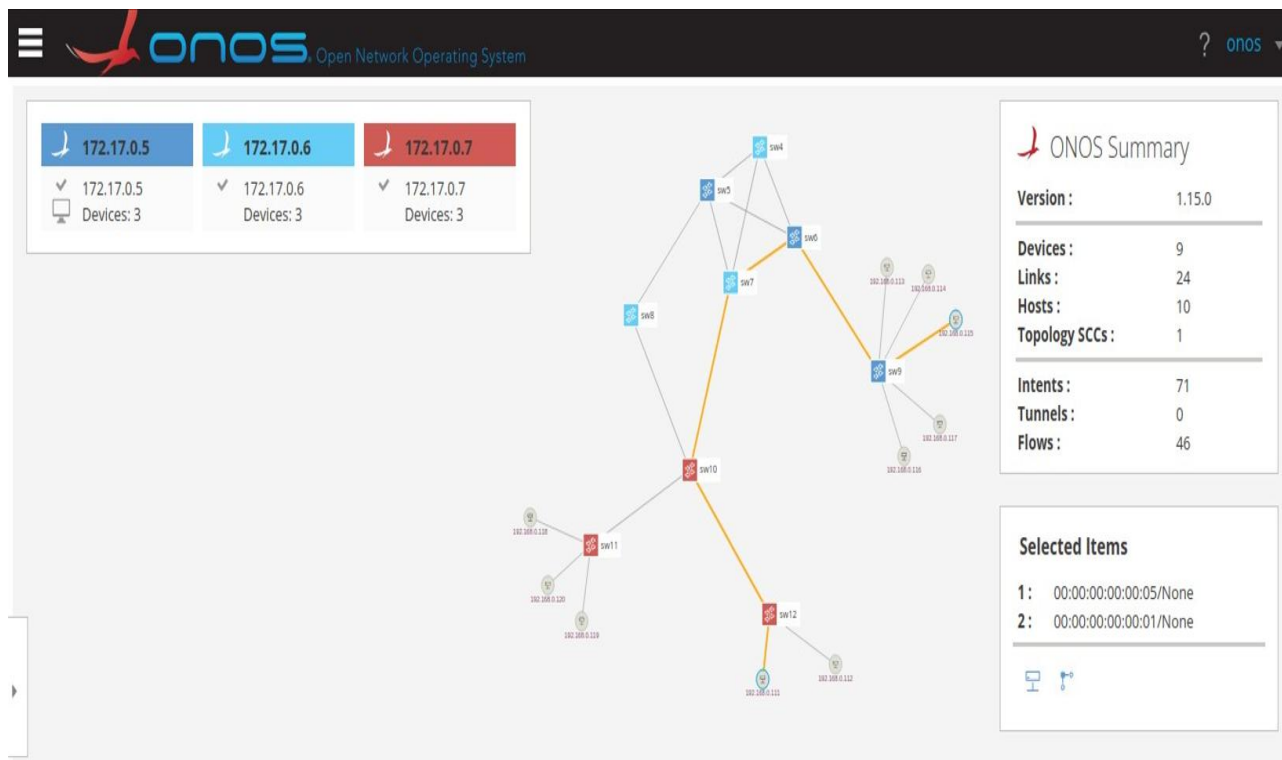


Рис. 4.10 Візуалізація інтенції між хостами WS1 та WS5

ONOS оперативна виявляє події виходу зі строю елементів SDN мережі та вирішує питання приведення її до нормального функціонування. Наприклад, якщо буде виведено з ладу зв'язок між свічами SW6 – SW7, то ONOS буде шукати новий шлях передавання даних. На рис. 4.11 можна побачити, що при розриві ланки мережі ONOS сформував новий маршрут проходження потоку даних.

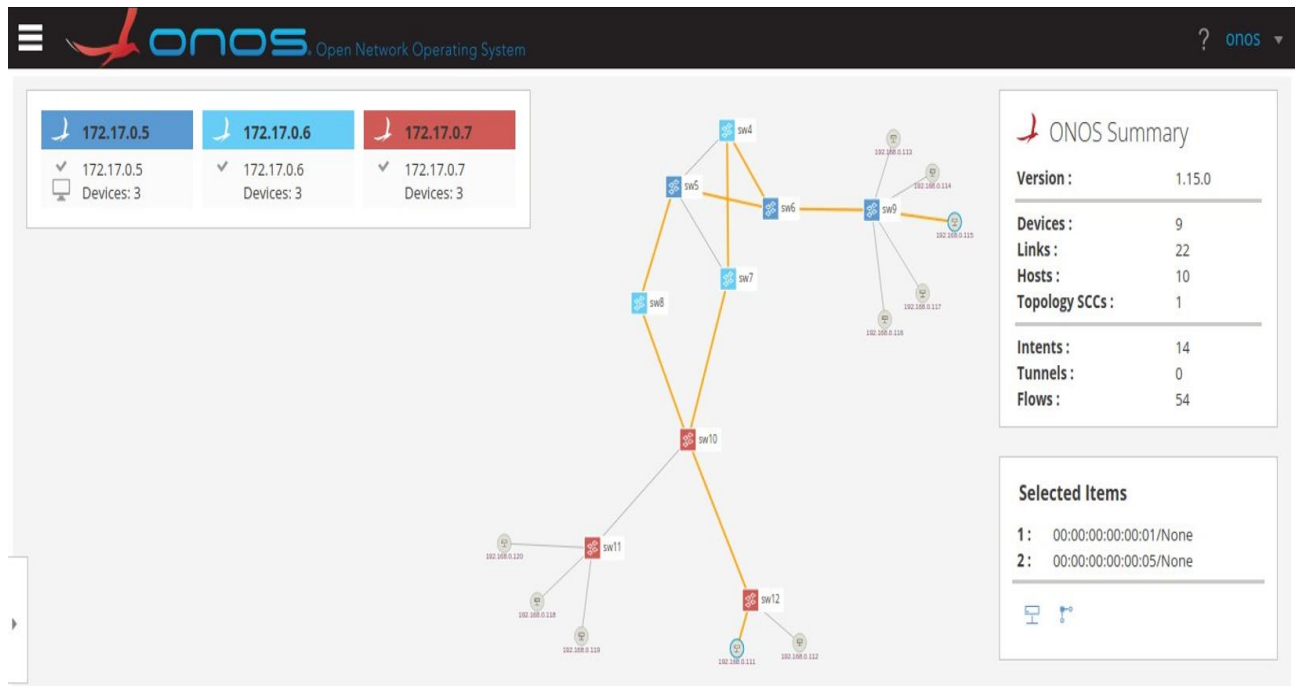


Рис. 4.11 Візуалізація інтенції між двома хостами при розриві зв'язку між свічами SW6 – SW7

Алгоритм роботи наступний. Коли було розірвано зв'язок між свічами SW6 – SW7, ONOS виявив цю зміну та повідомив усі композиції, які прослуховують події топології, що зв'язок припинився. Служба інтенцій є одним із таких компонентів, і коли вона отримує цю інформацію, вона виправляє будь-які інтенції, на які впливає ця зміна, забезпечуючи підключення за допомогою альтернативного шляху.

Цей простий приклад показує, що використання інтенцій ефективніше, ніж просто встановлення потоків. Інтенції враховують потреби, забезпечуючи, при цьому, виконання мережевих операцій якомога ефективніше.

4.6 Візуалізація та моніторинг трафіку в SDN-мережі

За допомогою графічного інтерфейсу відтворимо вже описану інтенцію між хостами 192.168.0.111 (WS1) і 192.168.0.115 (WS5). Це фактично встановлює зв'язок між хостами та виділяє шлях, який використовує інтенція (рис.4.12):

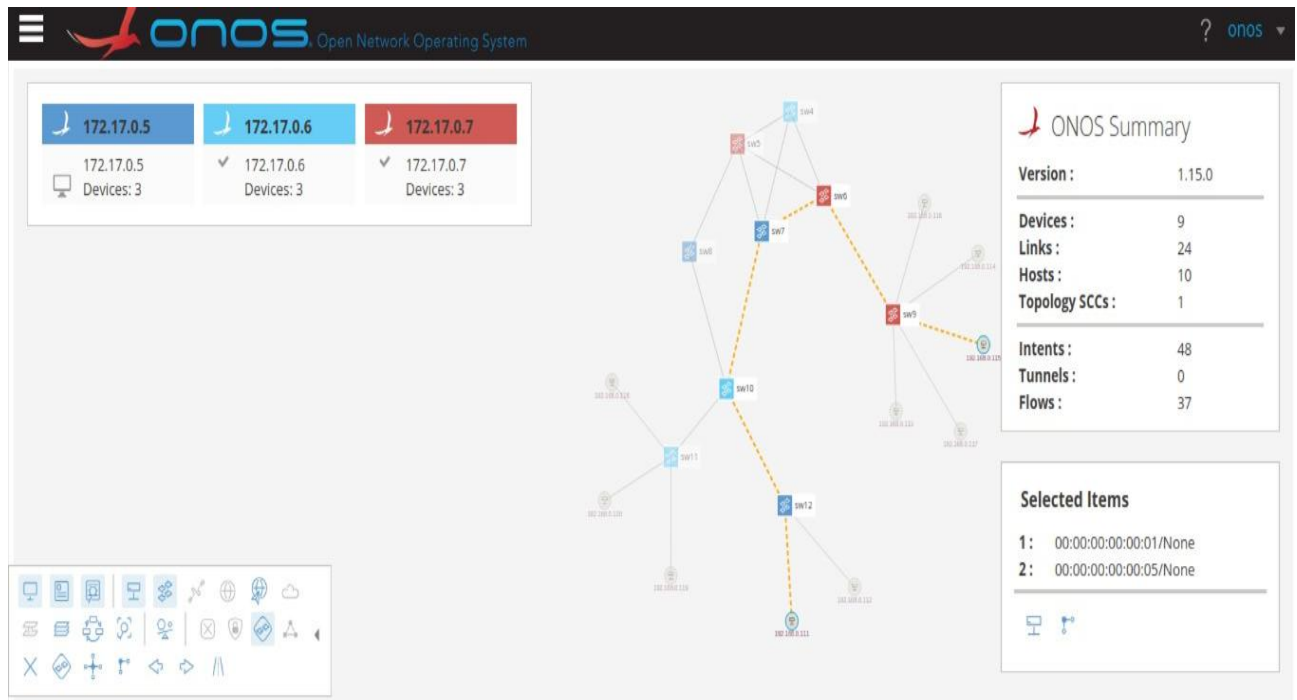


Рис. 4.12 Візуалізація інтенції між двома хостами

Щоб надіслати більш значний обсяг трафіку, ніж простий *ping* за протоколом ICMP, між двома хостами, можна використати команду *iperfudp* в терміналі MININET. На рис. 4.13 приведено виконання команди *iperfudp*.

```
mininet> iperfudp 5M ws5 ws1
*** Iperf: testing UDP bandwidth between ws5 and ws1
*** Results: ['5M', '5.00 Mbits/sec', '5.00 Mbits/sec']
mininet>
```

Рис. 4.13 Результат виконання команди *iperfudp* у вікні терміналу Mininet

Навантаження в SDN мережі можливе відслідкувати завдяки Візуалізація проходження трафіку, що ми бачимо на рис. 4.14.

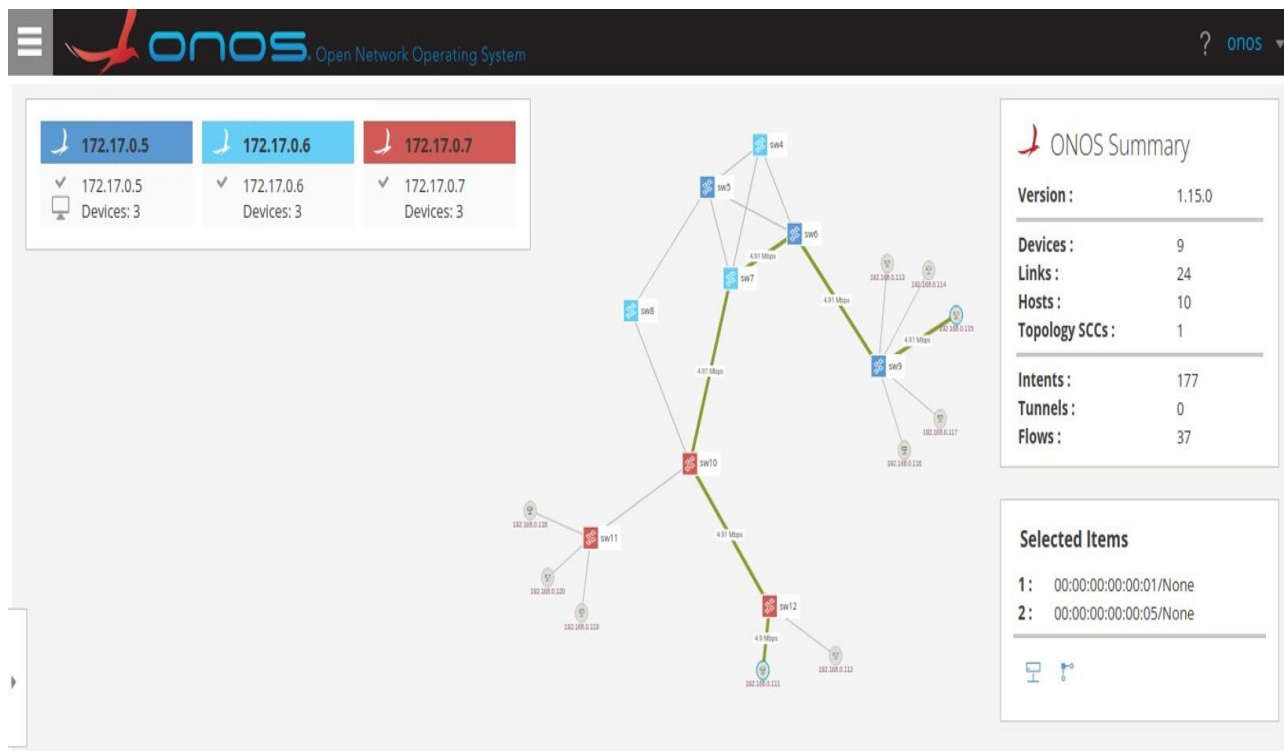


Рис. 4.14 Візуалізація проходження трафіку інтенцією між двома хостами

Можливо включити більше двох хостів у наведену вище команду, і трафік буде згенеровано між усіма ними попарно. Однак перед тим, як це зробити, потрібно переконатися, що вони можуть зв'язатися один з одним, створивши відповідні інтенції підключення (рис.4.15).

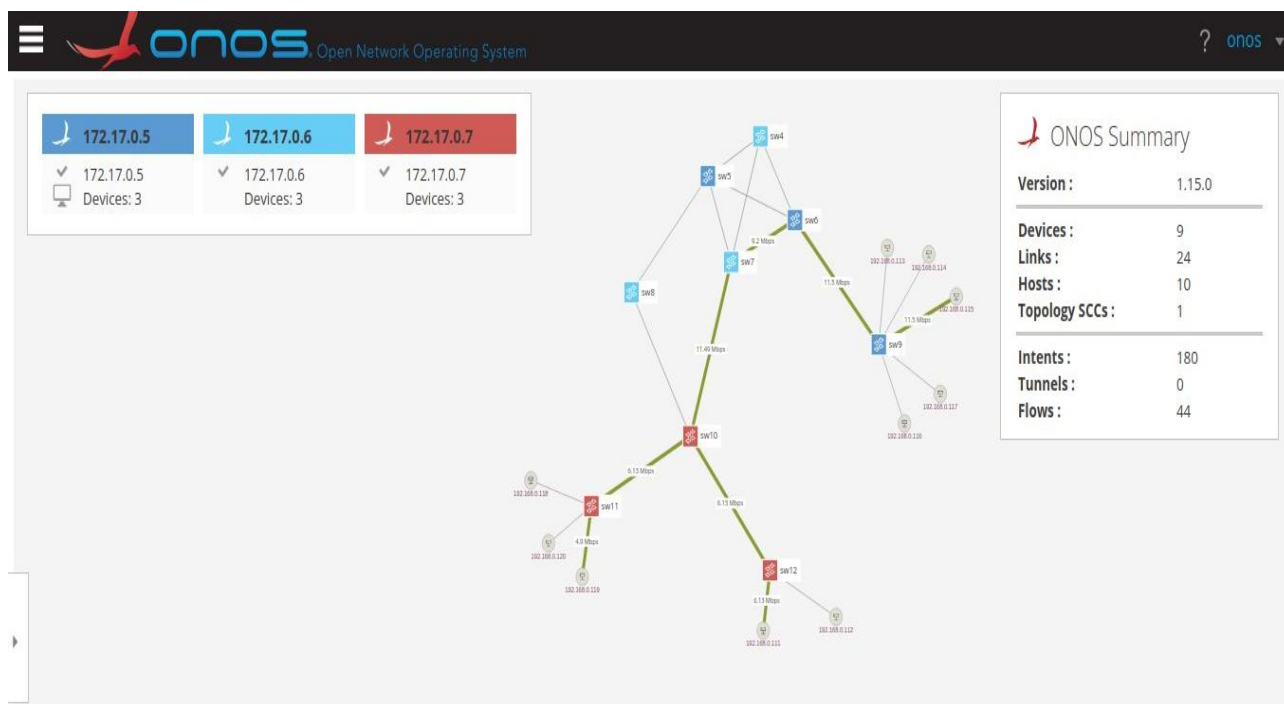


Рис. 4.15 Візуалізація проходження трафіку інтенцією між трьома хостами

Також можна візуально моніторити мережевий трафік в інтерфейсі користувача, переключатися між різними режимами, наприклад, статистика портів, потоків у біт/с або пакет/с (рис. 4.16).

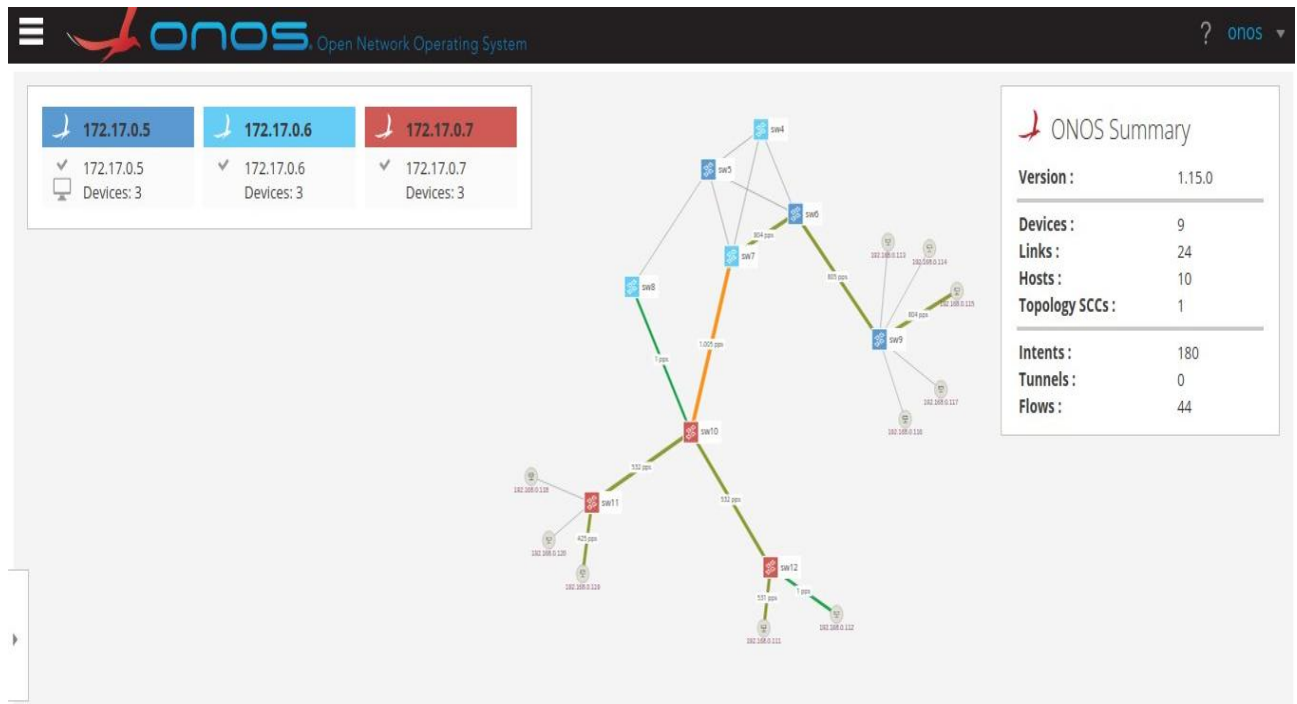


Рис. 4.16 Моніторинг мережевого трафіку між трьома хостами

4.7 Аналіз можливостей балансування трафіку в мережі SDN СУТРА в умовах виходу з ладу мережевих вузлів.

Одне із важливих завдань ONOS у кластерній конфігурації є рішення задач в умовах збоїв мережевих вузлів. Промодельюємо ситуацію виходу з ладу елементів мережі.

Для цього, використовуючи ONOS CLI, потрібно завершити роботу одного з екземплярів контролера, наприклад першого (172.17.0.5), використовуючи команду *shutdown*:

```
onos> shutdown
```

```
Confirm: halt instance root (yes/no): yes
```

```
onos> Connection to 172.17.0.5 closed by remote host.
```

Після цього на графічному інтерфейсі 2-го або 3-го контролера можна побачити процес переключення з'єднання. Вибраний контролер кластера ONOS, головний пристрій буде переназначено, а піктограма 1-го вузла на панелі екземплярів стане неактивною, щоб вказати, що контролер недоступний. На рис.

4.17 показано процес переключення з'єднання і перерозподіл завдань контролерам кластера ONOS у зв'язку з недоступністю одного елемента.

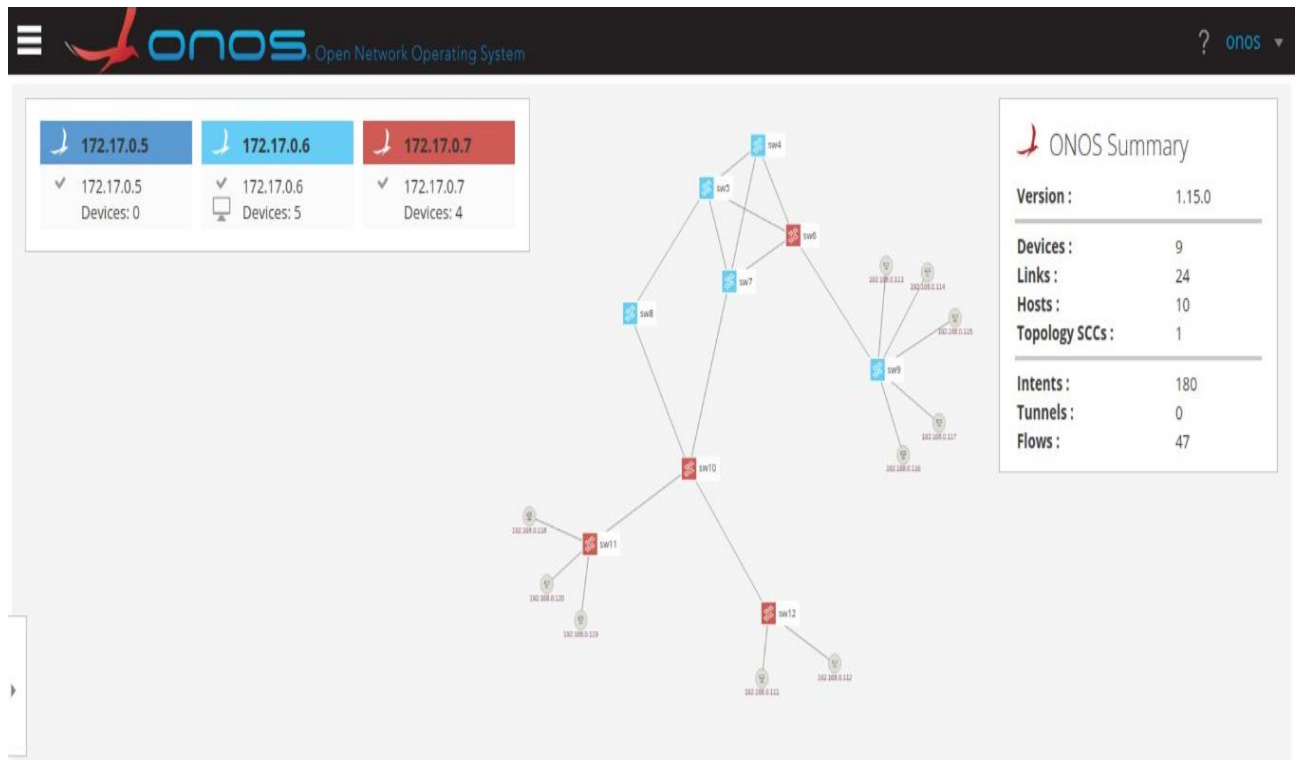


Рис. 4.17 Процес переключення з'єднання у зв'язку з недоступністю вузла кластеру

У даному випадку було здійснено переключення на 2-ий контролер, і два комутатори, якими раніше керував 1-ий контролер (контролер 172.17.0.5 був вимкнтий), який зараз вимкнено, також були призначені до 2-го контролера. В іншому випадку всі операції мають відбуватися як зазвичай; це включає графічний інтерфейси користувача.

Потрібно зауважити, що оскільки контролер налаштовано на автозапуск, він незабаром запуститься та приєднається до кластера. Якщо ж знову потрібно здійснити балансування, можна скористатися графічним інтерфейсом користувача або наступною командою CLI:

```
onos> balance-masters
```

Також можна активувати програму Master Load Balancer, щоб періодично автоматично здійснювалось балансування:

```
onos> app activate mlb
```

Висновки до четвертого розділу

1. В розділі проведено моделювання SDN мережі управління повітряним транспортом аеропорту з використанням SDN-контролерів на базі операційної системи ONOS. Для цього структура SDN мережі управління повітряним транспортом аеропорту була спрощена, проведено її формалізований опис і згенерований необхідний перелік елементів, відповідно до структури.

2. Конфігурація екосистеми ONOS була встановлена з використанням Mininet і засобів віртуалізації Oracle VirtualBox. Спроектовано кластер з магістральних OpenFlow – комутаторів, OpenFlow – комутаторів рівня локальних мереж і хостів диспетчерів різного призначення. Здійснено перевірку зв'язку між хостами за допомогою активації додатку для переадресації потоків.

3. Була запущена підсистеми інтенції та перевірена робота рівня управління в умовах аварійних ситуацій двох видів:

- В кластері вийшов з ладу один з ONOS контролерів. В цьому випадку кластер ONOS автоматично перезначив головний ONOS контролер, а потім зробив перерозподіл підлеглих OpenFlow – комутаторів. При чому, це питання було вирішено з урахуванням рівномірного розподілу навантаження між працюючими ONOS контролерами.

- В SDN мережі вийшов з ладу лінк між OpenFlow – комутаторами. В цьому випадку кластер ONOS автоматично відпрацював алгоритм зміни маршруту проходження зв'язку між нодами. Це доводить ефективність використання інтенцій, на відміну від простого встановлення потоків.

4. Також було надіслано значний обсяг трафіку між хостами для відтворення основного функціоналу моніторингу ONOS. Як фінальна частина, було розглянуто кластерні операції, однією з яких є операція автоматичного балансування.

5. Варто зауважити, що ONOS має багато додатків и велику бібліотеку вирішення різних завдань управління мережами. Однак опис бібліотеки достатньо складний и потрібно багато часу, щоб розібратися и використати цей обширний ресурс.

6. Операційна система ONOS має зручний графічний інтерфейс. За допомогою графічного інтерфейсу ми можемо візуалізувати процеси, які відбуваються в мережі, та вести моніторинг обслуговування трафіку в SDN мережі.

7. ONOS контролер може бути інтегрований з іншими операційними системами та іншими проєктами ONF. ONOS контролер може взаємодіяти з контролером, який вбудований в MININET або з контролерами інших типів, наприклад контролер Ryu.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Сучасний аеропорт є критично важливою інфраструктурою в архітектурі системи управління повітряним транспортом. Тому вимоги міжнародних документів і стандартів до якості його функціонування достатньо високі. Один з основних елементів, від якого залежить якість рішення завдань управління є його телекомунікаційна складова. Вона забезпечує безперервність операцій управління, підтримку заданого режиму польотів і взаємодію служб. Однак зростання трафіку, вимог до безпеки та інтеграції сервісів підсилює навантаження на мережу, яка історично будувалась як набір розрізнених підсистем. Це призводить до обмеженої масштабованості, складності управління через жорстку прив'язку до апаратних платформ вендорів мережевого обладнання, неузгодженість конфігурацій і як наслідок - неефективне використання ресурсів. Додатково зростають витрати на підтримку OPEX через переважання ручного адміністрування, уповільнює зміни та реагування на інциденти, а інерційна модернізація гальмує впровадження нових сервісів і QoS. Паралельно погіршується кіберстійкість. А апаратно-орієнтованість підвищує інвестиційні витрати на створення та купівлю мережевої інфраструктура та обладнання.

2. Обмеження традиційної телекомунікаційної архітектури, пошук ефективних напрямків модернізації показали, що перспективним рішенням щодо підвищення якості функціонування телекомунікаційної платформи аеропорту є використання технологій SDN/NFV. Такий підхід відокремлює площину керування від передачі даних, забезпечує централізований програмний контроль і управління, єдину політику, узгодженість конфігурацій та глобальну видимість мережевого стану для швидшої діагностики і управління ресурсами. Наявність API створює основу для автоматизації, реконфігурації та масштабування, зменшуючи поточні операційні витрати на. NFV забезпечує перенос частини мережевих функцій зі спеціалізованого обладнання на стандартні платформи, що дає змогу швидко розгортати й масштабувати функції та скоротити час

відновлення компонентів. Синергія SDN і NFV формує основу для комплексного рішення завдань управління.

4. Аналіз обмежень традиційної архітектури телекомунікацій аеропорту дозволило визначити, що при використанні технологій SDN і NFV ми можемо уніфікувати телекомунікаційну платформу аеропорту. В роботі запропоновано систему зв'язку, яка складається з обмеженої кількості локальних LAN_{ACCES} та базової мереж WAN_{CORE} аеропорту, які обслуговують певні групи операторів (диспетчерів). Це дозволяє значно підвищити гнучкість, надійність та якість зв'язку між органами та об'єктами управління.

5. Основним показником якості функціонування локальних мереж LAN_{ACCES} є час затримки повідомлень в мережі та пропускна здатність. Тому запропоновано будувати локальні мережі диспетчерів на базі різновидів технології Ethernet. Це комутований Ethernet, Ethernet з протоколом доступу на базі CSMA/CD і сегментований Ethernet з протоколом МЦУС. В роботі було розроблено удосконалений методи оцінки часу затримки в обслуговуванні в мережах LAN_{ACCES} Ethernet різних технологій (комутований, CSMA/CD, МЦУС) в залежності від навантаження. З точки зору часу затримки, складності побудови, якості обслуговування і пропускної спроможності кожна технологія має свої недоліки і переваги. Для мережі SDN, яка має інтелектуальний контролер, пропонується прогнозувати часу обслуговування в мережі LAN_{ACCES} і оперативна змінювати алгоритм обслуговування в залежності від ситуації в мережі. Основними показниками якості функціонування базової мереж WAN_{CORE} аеропорту є надійність, час затримки повідомлень і пропускна спроможність. Для забезпечення надійності функціонування мережі пропонується використання базової мережі WAN_{CORE} аеропорту з кільцевою структурою типу FDDI. Ця мережа має досить велику надмірність, яка використовується для підвищення надійності. В роботі розроблений удосконалений метод обслуговування навантаження в базової мережі WAN_{CORE} аеропорту з кільцевою структурою на базі SDN/NFV, який забезпечує оптимальне співвідношення надійності та часу затримки. Для цього розроблено метод оцінки часу затримки в обслуговуванні в мережі кільцевої структури типу

FDDI в залежності від навантаження. Для мережі SDN, яка має інтелектуальний контролер, пропонується прогнозувати час обслуговування в мережі WAN_{CORE} і оперативна змінювати алгоритм обслуговування в залежності від ситуації в мережі кільцевої структури типу FDDI. В роботі запропоновано вдосконалений метод адаптивного керування потоками даних в радіолокаційних каналах повітряного спостереження за рахунок оптимізації довжини пакету. Розроблено модель, яка дозволяє визначити оптимальну довжину пакета від параметрів каналу зв'язку. Для мережі SDN, яка має інтелектуальний контролер, пропонується прогнозування оптимальних параметрів обслуговування для оперативної зміни алгоритму в залежності від ситуації в мережі.

6. В роботі проаналізовано роботу допитних РЛС у складі СУПР. Визначено, що їх можливо розглядати як асинхронну систему передавання, де критичним вузлом є бортовий транспондер, який за принципом функціонування еквівалентний відкритій одноканальній СМО з відмовами. Це безпосередньо обмежує пропускну здатність, підвищує ймовірність колізій і знижує завадостійкість.

7. В роботі проведено моделювання SDN мережі управління повітряним транспортом аеропорту з використанням SDN-контролерів на базі операційної системи ONOS, Mininet, засобів віртуалізації Oracle VirtualBox, кластеру з магістральних OpenFlow – комутаторів, OpenFlow – комутаторів рівня локальних мереж і хостів диспетчерів різного призначення. Моделювання SDN мережі було проведено умовах як нормального функціонування, так аварійних ситуацій різних видів. Контролер ONOS відпрацював всі нестандартні ситуації. Варто зауважити, що ONOS має багато додатків и велику бібліотеку програмного забезпечення для вирішення завдань управління. ONOS контролер може бути інтегрований з іншими мережевими операційними системами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. International Civil Aviation Organization. Annex 10 Aeronautical Telecommunications. Volume II: Communication Procedures including those with PANS status. Montreal: ICAO, 2022. 136 p. [Електронний ресурс]. <https://store.icao.int/>
2. International Civil Aviation Organization. Annex 10 Aeronautical Telecommunications. Volume III, Part I: Communication Systems. Montreal: ICAO, 2023. 274 p. [Електронний ресурс].
3. International Civil Aviation Organization. Annex 10 Aeronautical Telecommunications. Volume IV: Surveillance and Collision Avoidance Systems. Montreal: ICAO, 2020. 216 p. [Електронний ресурс]. <https://store.icao.int/>
4. International Civil Aviation Organization. Annex 11 Air Traffic Services. Montreal: ICAO, 2018. 136 p. [Електронний ресурс]. <https://store.icao.int/>
5. International Civil Aviation Organization. Procedures for Air Navigation Services Air Traffic Management (PANS-ATM), Doc 4444. Montreal: ICAO, 2016. 466 p. [Електронний ресурс]. <https://www.icao.int/>
6. International Civil Aviation Organization. Global Air Navigation Plan (GANP) 2016–2030, Doc 9750. Montreal: ICAO, 2016. 144 p. [Електронний ресурс]. <https://www.icao.int/airnavigation/Pages/GANP.aspx>.
7. International Civil Aviation Organization. Global Operational Data Link (GOLD) Manual, Doc 10037. Montreal: ICAO, 2017. 306 p. [Електронний ресурс]. <https://www.icao.int/>
8. International Civil Aviation Organization. Handbook on Radio Frequency Spectrum Requirements for Civil Aviation, Doc 9718. Montreal : ICAO, 2025. 632 p. [Електронний ресурс]. <https://www.icao.int/>
9. International Civil Aviation Organization. Manual on System Wide Information Management (SWIM) Implementation, Doc 10203. - Montreal : ICAO, 2024. 160 p. [Електронний ресурс]. <https://www.icao.int/> / <https://store.icao.int/>

10. EUROCONTROL. EUR AMHS Manual (Doc 020), Version 19.0. Brussels: EUROCONTROL, 2025. 175 p. [Електронний ресурс]. <https://www.eurocontrol.int/publication/eur-amhs-manual-doc-020>.
11. EUROCONTROL. Specification for ATS Messaging Handling System (AMHS) in Europe. Brussels: EUROCONTROL, 2018. 197 p. [Електронний ресурс]. <https://www.eurocontrol.int/>
12. EUROCONTROL. On-Line Data Interchange (OLDI) Specification. Brussels: EUROCONTROL, 2023. 142 p. [Електронний ресурс]. <https://www.eurocontrol.int/>
13. World Meteorological Organization. Guide to Instruments and Methods of Observation (WMO-No. 8). Geneva: WMO, 2018. 121 p. [Електронний ресурс]. <https://library.wmo.int/>
14. International Civil Aviation Organization. Annex 3 Meteorological Service for International Air Navigation. Montreal : ICAO, 2022. 218 p. [Електронний ресурс]. <https://store.icao.int/>
15. EUROCONTROL. A-SMGCS Specification Guidance (Edition 2.0). Brussels: EUROCONTROL, 2020. 97 p. [Електронний ресурс]. <https://www.eurocontrol.int/>
16. EUROCONTROL. ASTERIX: All Purpose Structured EUROCONTROL Surveillance Information Exchange Part 1. Brussels: EUROCONTROL, 2021. 226 p. [Електронний ресурс]. <https://www.eurocontrol.int/>
17. ARINC. ARINC Specification 618-8: Air Ground Datalink Communications. Annapolis, MD: ARINC, 2016. 332 p. [Електронний ресурс]. <https://www.arinc.com/>
18. EUROCAE. ED-137C: Standards for ATM/ATC VoIP and Voice Communication Systems. Saint-Denis: EUROCAE, 2017–2023. 389 p. [Електронний ресурс]. <https://www.eurocae.net/>
19. Mininet Project. Mininet: rapid prototyping for Software-Defined Networks: документація та репозиторій. [Електронний ресурс]. <http://mininet.org/>
20. Головін Ю. О. Основи радіозв'язку з рухомими об'єктами: навч. посіб. Запоріжжя : ЗНТУ, 2016. 180 с.

21. Обод І. І., Стрельницький О. О., Андрусевич В. А. Інформаційна мережа систем спостереження повітряного простору: монографія. Харків : ХНУРЕ, 2015. 270 с.
22. Свид І. В. Обробка радіолокаційної інформації систем спостереження повітряного простору: монографія. Дніпро. ЛПРА ЛТД, 2022. 224с.
23. Обод І. І., Свид І. В., Мальцев О. С. Обробка даних радіолокаційних систем спостереження повітряного простору: навч. посіб. Харків: Друкарня Мадрид, 2021. 255 с.
24. Мезенцев О. В., Миронюк С. В., Осіновий Г. Г., Козіс К. В. Структури адаптивних систем обробки сигналів для радіолокаційних датчиків зовнішньої інформації кореляційно-екстремальних систем навігації літальних апаратів. Космічна наука і технологія. 2024. Т. 29, № 6. С. 102–106. DOI: 10.15407/knit2023.06.102.
25. Yeremenko O., Persikov M., Lemeshko V., Altaki B. Research and development of the secure routing flow-based model with load balancing. Проблеми телекомунікацій. 2021. № 2 (29). С. 3–14.
26. Свид І. В., Обод І. І., Мальцев О. С., Ткач М. Г., Старокожев С. В., Глущенко А. О., Чумак В. С. Метод підвищення завадозахищеності радіолокаційних систем ідентифікації «свій-чужий» при дії навмисних корельованих завад. Радіотехніка. 2021. Вип. 205. С. 154–160. DOI: 10.30837/rt.2021.2.205.16.
27. Обод І. І., Свид І. В., Штих І. А. Просторовий метод підвищення завадостійкості запитальних систем спостереження повітряного простору. Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. 2015. Вип. 1 (42). С. 25–27.
28. Харченко В. П., Луппо С. М., Колотуша В. П. Принципи організації повітряного простору : навч. посіб. Кіровоград : ДЛАУ, 2006. 172 с.
29. Харченко В. П., Остроумов І. В. Авіоніка : навч. посіб. Київ : НАУ, 2013. 272 с.

30. Зуєв О. В., Красноружев В. М., Мелкумян В. Г. Радіонавігаційне обладнання аеропортів: навч. посіб. 2019. 124 с.
31. Чужа С. В., Ситник І. Ю., Хімін Р. В., Кожохіна О. М. Авіаційні радіоелектронні системи: навч. посіб. 2017. 124 с.
32. Зуєв О. В., Мелкумян В. Г., Семенов В. С. Радіолокаційне та радіонавігаційне обладнання аеропортів : навч. посіб. 2009. 344 с.
33. Лещенко Г. П. Авіаційна метеорологія: підручник. 6-е вид. Кропивницький: ЛА НАУ, 2017. 336 с.
34. Конахович Г. Ф. та ін. Експлуатація телекомунікаційних систем: підручник. Київ: Видавничий дім «Кондор», 2014. 372 с.
35. ONF. Accelerating the Adoption of SDN & NFV. Issue 1 June, 2016.
36. ONF TR-502. SDN architecture. Issue 1 June, 2014.
37. ONF TR-508. Requirements Analysis for Transport OpenFlow/SDN. V1.0 August 20, 2014. ONF TR-508.
38. ONF specification. OpenFlow Table Type Patterns. Version No. 1.0 15 August 2014.
39. IETF RFC 7426. Request for Comments: 7426. ISSN: 2070-1721 EICT. Category: Informational K. Pentikousis, Ed., ISSN: 2070-1721 EICT.
40. Optical Transport Protocol Extensions Version1.0 March 15, 2015 ONF TS-022.
41. ONF TR-539. OpenFlow Controller Benchmarking Methodologies Version 1.0 November 2016.
42. ONF TS-029. MPLS-TP OpenFlow Protocol Extensions for SPTN. Version 1.0 June 16, 2017.
43. Г. Конахович, А. Романов. "МОДЕЛЬ ВЗАЄМОДІЇ ПЛОСКОСТІ УПРАВЛІННЯ МЕРЕЖІ SDN З СИСТЕМАМИ УПРАВЛІННЯ МЕРЕЖАМИ ЗГІДНО КОНЦЕПЦІЇ TMN", Журнал «Наукоємні технології», розділ «Електроніка, електронні комунікації, приладобудування і радіотехніка» Том 67, випуск №3 2025, с.350-359. DOI: 10.18372/2310-5461.67.20243.

44. Romanov, O., Nesterenko, M., Mankivskyi, V. The Method of Redistributing Traffic in Mobile Network. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, p. 159–182, 2021.

45. Romanov O., Siemens E., Nesterenko M. and Mankivskyi V. Mathematical Description of Control Problems in SDN Networks. International Conference on Applied Innovations in IT (ICAIIIT), pp 33-40, 2021. DOI:10.25673/36582.

46. Білова М. О., Євсєєв С. П., Жученко О. С., Іванченко І. С., Шматко О. В. Технологія Ethernet : лабораторний практикум. Львів : Новий Світ-2000, 2025. 196 с. ISBN 978-617-7519-51-4.

47. Азаров О. Д., Захарченко С. М., Кадук О. В., Орлова М. М., Тарасенко В. П. Комп'ютерні мережі : підручник. Вінниця : ВНТУ, 2020. 378 с. ISBN 978-966-641-808-4.

48. Tanenbaum A. S., Feamster N., Wetherall D. J. Computer Networks. Global Edition. 6th ed. Harlow : Pearson Education Limited, 2021. 944 p. ISBN 978-1-292-37406-2.

49. Жураковський Б. Ю., Зенів І. О. Комп'ютерні мережі. Частина 1. Навчальний посібник. Київ : КПП ім. Ігоря Сікорського, 2020. 336 с.

50. Weiss G. Scheduling and Control of Queueing Networks. Cambridge : Cambridge University Press, 2022. 448 p. (Institute of Mathematical Statistics Textbooks ; 14). ISBN 978-1-108-41532-3 (Hardback). ISBN 978-1-108-40117-3 (Paperback). DOI: 10.1017/9781108233217.

51. Довгий С. О., Воробієнко П. П., Гуляєв К. Д. Сучасні телекомунікації: мережі, технології, безпека, економіка, регулювання: монографія, за заг. ред. С.О. Довгого. 2-ге вид., доповн. Київ: Азимут-Україна, 2013. 608 с. ISBN 978-966-1541-46-6.

52. Литвинов А. Л. Теорія систем масового обслуговування: навч. посібник ХНУМГ ім. О. М. Бекетова. – Харків, 2018. – 141 с.

53. Gao J., Zou J., Guo N. (2020) A Secondary Surveillance Radar Data Analysis Technique Based on Geometrical Method. In: Liang Q., Liu X., Na Z., Wang W., Mu J., Zhang B. (eds) Communications, Signal Processing, and Systems. CSPA

2018. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol 517. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-6508-9_85.

54. Svyd, I., Obod, I., Maltsev, O., Shtykh, I., Maistrenko, G., Zavolodko, G. (2019). Comparative quality analysis of the air objects detection by the Secondary Surveillance Radar. 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). doi:10.1109/elnano.2019.8783539

55. Du, X., Liao, K., & Shen, X. (2020). Secondary radar signal processing based on deep residual separable neural network. 2020 IEEE International Conference on Power, Intelligent Computing and Systems (ICPICS). doi:10.1109/icpics50287.2020.9202372.

56. Vidal, Luis. E., Concha, U. R., Solís, J., Piedra, J., Chávez, C., Cano, D. M., & Woolcott, J. C. (2023). Implementation of a transportable radar mode S of Monopulse Secondary Surveillance (MSSR-S) for the Peruvian Civil Aviation Surveillance. *Telecom*, 4(4), 693–708. doi:10.3390/telecom4040031.

57. Morales-Ferre, R., Richter, P., Falletti, E., de la Fuente, A., & Lohan, E. S. (2020). A survey on coping with intentional interference in satellite navigation for manned and Unmanned Aircraft. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 22(1), 249–291. doi:10.1109/comst.2019.2949178.

58. Romanov, O., Nesterenko, M., Veres, L., Kamarali, R., & Saychenko, I. (2020). Methods for calculating the performance indicators of IP Multimedia Subsystem (IMS). *Advances in Information and Communication Technology and Systems*, 229–256. doi:10.1007/978-3-030-58359-0_13.

59. Tkach, M. G. (2021). Estimation of the relative throughput of aircraft transponders of Secondary Airspace Surveillance Radar Systems. *Radiotekhnika*, (207), 123–131. doi:10.30837/rt.2021.4.207.13.

60. Kim, H., Park, C., Lee, S., & Lee, D. (2021). Collision avoidance based on CPA algorithm using relative distance and azimuth of radar for unmanned aerial vehicles. 2021 21st International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). doi:10.23919/iccas52745.2021.9650061.

61. Romanov, O. I., Fediushyna, D. M., & Dong, T. T. (2018). Model and method of Li-Fi network calculation with Multipath Light Signals. 2018 International

Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo). doi:10.1109/ukrmico43733.2018.9047550.

62. Svyd, I., Obod, I., & Maltsev, O. (2021). Interference Immunity Assessment Identification Friend or foe systems. *Data-Centric Business and Applications*, 287–306. doi:10.1007/978-3-030-71892-3_12.

63. Starokozhev, S., et al. (2022). Comparative analysis of methods for processing data transmission information codes by secondary radar channels. 2022 IEEE 9th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T). doi:10.1109/picst57299.2022.10238651.

64. Leonardi, M., & Fausto, D. D. (2018). Secondary surveillance radar transponders classification by RF Fingerprinting. 2018 19th International Radar Symposium (IRS). doi:10.23919/irs.2018.8448244.

65. Starokozhev, S., et al. (2022). Signal provision of address systems identification friend or foe. 2022 IEEE 9th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T). doi:10.1109/picst57299.2022.10238675.

66. Leonardi, M., & Gerardi, F. (2020). Aircraft mode S transponder fingerprinting for intrusion detection. *Aerospace*, 7(3), 30. doi:10.3390/aerospace7030030.

67. Shevtsov, I., et al. (2022). Quality Evaluation of flight data transmission by the response channel of Secondary Radar. 2022 IEEE 9th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology. doi:10.1109/picst57299.2022.10238528.

68. Du, X., Shen, X., & Liao, K. (2020). Secondary surveillance radar signal processing based on two-channel deep residual network. 2020 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC). doi:10.1109/icspcc50002.2020.9259499.

69. Semenets, V., Svyd, I., Obod, I., Maltsev, O., & Tkach, M. (2021). Quality Assessment of measuring the coordinates of airborne objects with a secondary surveillance radar. *Data-Centric Business and Applications*, 105–125. doi:10.1007/978-3-030-71892-3_5.

70. Liu, W., Liu, J., Hao, C., Gao, Y., & Wang, Y.-L. (2022). Multichannel Adaptive Signal Detection: Basic Theory and Literature Review. *Science China Information Sciences*, 65(2). doi:10.1007/s11432-020-3211-8.
71. Svyd, I., Obod, I., Maltsev, O., Vorgul, O., Vorgul, I., & Shevtsov, I. (2022). Method for increasing the interference immunity of the channel for measuring of the short-range navigation radio system. 2022 IEEE 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET). doi:10.1109/tcset55632.2022.9767069.
72. Kim, E. (2018). Analysis of DME/DME navigation performance and ground network using stretched-front-leg pulse-based DME. *Sensors*, 18(10), 3275. doi:10.3390/s18103275.
73. Lee, G., Lee, S., Kim, K., & Kwak, N. (2018). Probabilistic track initiation algorithm using radar velocity information in heavy clutter environments. 2018 15th European Radar Conference (EuRAD). doi:10.23919/eurad.2018.8546666.
74. Yang, X., Zhang, H., & Luo, Q. (2020). Multi-path interference analysis and simulation of Secondary Surveillance Radar for Civil Aviation ATC. 2020 IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). doi:10.1109/itnec48623.2020.9084696.
75. Shevtsov, I., et al. (2022). A method for increasing the capacity of radio systems of short-range navigation. 2022 IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week (UkrMW). doi:10.1109/ukrmw58013.2022.10037138.
76. Alland, S., Stark, W., Ali, M., & Hegde, M. (2019). Interference in automotive radar systems: Characteristics, mitigation techniques, and current and future research. *IEEE Signal Processing Magazine*, 36(5), 45–59. doi:10.1109/msp.2019.2908214.
77. Obod, I., Svyd, I., Zavolodko, G., Maltsev, O., Bakumenko, B., & Chumak, V. (2021). Assessing SSR relative data capacity. 2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). doi:10.1109/ukrcon53503.2021.9575971.

78. Cohen, S., Gluck, T., Elovici, Y., & Shabtai, A. (2019). Security Analysis of Radar Systems. Proceedings of the ACM Workshop on Cyber-Physical Systems Security & Privacy - CPS-SPC'19. doi:10.1145/3338499.3357363.
79. Svyd, I., Obod, I., Maltsev, O., & Hlushchenko, A. (2020). Secondary Surveillance Radar Response Channel Information Security Improvement Method. 2020 IEEE 11th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT). doi:10.1109/dessert50317.2020.9125018.
80. Duan, H., Cheng, Y., Shen, B., He, K., & Bai, G. (2020). LFM interference cancellation algorithm based on MDPT-WC for mark XIIA mode 5. 2020 IEEE 20th International Conference on Communication Technology (ICCT). doi:10.1109/icct50939.2020.9295892.
81. Dave, G., Choudhary, G., Sihag, V., You, I., & Choo, K.-K. R. (2022). Cyber security challenges in aviation communication, navigation, and surveillance. Computers & Security, 112, 102516. doi:10.1016/j.cose.2021.102516.
82. Obod, I., Svyd, I., Maltsev, O., & Starokozhev, S. (2020). The effect of masking interference on the quality of request signal detection in aircraft responders of the identification friend or Foe Systems. 2020 IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T). doi:10.1109/picst51311.2020.9467955.
83. Starokozhev, S., et al. (2021). Optimization of the probability of transmission of flight data in the response channel of Secondary Radar Systems. 2021 IEEE 8th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T). doi:10.1109/picst54195.2021.9772199.
84. Pavlova, D. B., Zavolodko, G. E., Obod, I. I., Svyd, I. V., Maltsev, O. S., & Saikivska, L. F. (2019). Optimizing data processing in information networks of Airspace Surveillance Systems. 2019 10th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT). doi:10.1109/dessert.2019.8770022
85. Abd-Elfattah, E., El-Bardawiny, A.-E.-R., Girgis, N., Hussein, K., Hafez, A., Ahmed, F., & Mabrouk, M. (2020). An industrial design approach, implementation, and application: Perspectives of Surveillance Radar Systems [Plenary Session]. 2020

37th National Radio Science Conference (NRSC).
doi:10.1109/nrsc49500.2020.9235113.

86. Svyd, I., Obod, I., Maltsev, O., Andrusevich, V., Bakumenko, B., & Vorgul, O. (2021). Optimal measurement of signal data parameters of requesting radar systems. 2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). doi:10.1109/ukrcon53503.2021.9575235.

87. Hu, Y., Zhao, Y., & Chen, S. (2021). Incoherent integration detection method of airborne phased array radar in a multipath environment. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2021, 1–10. doi:10.1155/2021/8699512.

88. Obod, I., Svyd, I., Vorgul, O., Maltsev, O., Datsenko, O., & Boiko, N. (2021). Optimization of data processing structure for multi-position radar surveillance systems. 2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). doi:10.1109/ukrcon53503.2021.9575286.

89. Neindre, F. L., Ferre, G., Dallet, D., Letellier, F., & Pitois, K. (2022). A successive interference cancellation-based receiver for Secondary Surveillance Radar. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1–12. doi:10.1109/taes.2022.3193649.

90. Mahipathi, A. C., Pardhasaradhi, B., Pathipati, S., D'Souza, J., & Jena, P. (2023). LPI-based NLFM radar waveform design for a cooperative radar-communication system. 2023 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT). doi:10.1109/conecct57959.2023.10234785.

91. Jiang, G., Fan, Y., & Yuan, H. (2019). Assessing the capacity of Air Traffic Control Secondary Surveillance Radar System. 2019 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC). doi:10.1109/csqrwc.2019.8799146.

92. Dash, D., & Valarmathi, J. (2021). Radar emitter identification in multistatic radar system: A Review. *Advances in Automation, Signal Processing, Instrumentation, and Control*, 2655–2664. doi:10.1007/978-981-15-8221-9_248

93. I. Svyd, I. Obod, A.O. Romanov, O. Vorgul M., Romanov A, Ashish Yadav & Haider T.H. Salim ALRikabi. "A Model for Optimization Packet Length in

Airspace Surveillance Systems," Springer, Cham 12th International Conference on Applied Innovations in IT(ICAIIIT 2024), 18 April 2025, LNNS volume 1338, pp. 501-518. DOI: 10.1007/978-3-031-89296-7_25.

94. ONOS Overview - ONF Bootcamp [Електронний ресурс] – Режим доступу: ONOS Overview - ONF Bootcamp May 23, 2017

95. Платформа ONOS [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://opennetworking.org/onos/>

96. Документація ONOS [Електронний ресурс] wiki.onosproject.org. – Режим доступу: <https://wiki.onosproject.org/display/ONOS/Documentation>

97. Документація ONOS [Електронний ресурс] wiki.onosproject.org. – Режим доступу: A Beginner's Guide to Contribution - ONOS - Wiki

98. <https://wiki.onosproject.org/display/ONOS/Apps+and+Use+Cases>

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Г. Конахович, А.О. Романов. Модель взаємодії плоскості управління мережі SDN з системами управління мережами згідно концепції TMN. Наукоємні технології, Т.67, Вип. №3 2025, с.350-359. DOI: 10.18372/2310-5461.67.20243.
2. O. Romanov, V. Mankivskyi, A. Romanov, M. Nesterenko, O. Pidpaly. Performance Assessing of Dynamic Scaling of Containerized Applications When Using Kubernetes Cluster Autoscaler and Auto Scaling Group Together. International Scientific and Technical Conference - Modern Challenges in Telecommunications, MCT 2024. 29 July 2025. P.111-136. DOI: 10.1007/978-3-031-94799-5_7. ISSN: 2367-3370.
3. I. Svyd, I. Obod, A.O. Romanov, O. Vorgul M., Romanov A, Ashish Yadav & Haider T.H. Salim ALRikabi. A model for optimization packet length in airspace surveillance systems. International Conference on Applied Innovations in IT, Springer, Cham 12th, 18 April 2025, P. 501-518. DOI: 10.1007/978-3-031-89296-7_25. ISSN: 2367-3370.
4. I. Svyd, I. Obod, A.O. Romanov, O. Vorgul M., Romanov A, Ashish Yadav & Haider T.H. Salim ALRikabi. Using the interstage data processing method to improve the efficiency of airspace surveillance systems. International Conference on Applied Innovations in IT, Springer, Cham 12th, 18 April 2025, P. 519-535. DOI: 10.1007/978-3-031-89296-7_26. ISSN: 2367-3370.
5. Romanov O., Mankivskyi V., Skulysh M., Globa L, Romanov A. Enhancing Resource Availability: Indicators and Strategies for Optimizing the Kubernetes Network. 22nd International Scientific and practical conference information and communication technologies and sustainable development, 2023, P. 18-41. DOI: 10.1007/978-3-031-46880-3_2. ISSN 23673370. ISBN 978-303146879-7.
6. Романов О.І., Свид І.В., Корнієнко Н.І., Романов А.О. Управління

оптичною мережею контролером SDN на базі ONOS. Радіотехніка. 2022. № 210. С.184-192. DOI:10.30837/rt.2022.3.210.16.

7. Романов А.О., Кравченко А.В. Дослідження швидкості навчання нейронних мереж в залежності від функції активації. Міжнародна науково-технічна конференція «ПТ-25», 26 червня 2025 р., С. 136-138.

8. Романов А.О., Бушинський Д. Проблеми впровадження технології Li-Fi В мережі IOT. Міжнародна науково-технічна конференція «ПТ-25», 26 червня 2025 р., С. 139-142.

9. Романов А.О., Бушинський Д. Проблеми аналізу трафіку в мережі IOT з технологією LI-FI. Міжнародна науково-технічна конференція «ПТ-24», С.68-70.

10. Маньківський В.Б., Конахович Г.Ф., Романов А.О. Додатковий механізм мережевої взаємодії в KUBERNETES. XVII міжнародна науково-технічна конференція «Перспективи телекомунікацій», Київ, 2023 р., С 109-111.

11. I. Svyd, I. Obod, O. Vorgul, A. Romanov. Optimization of Data Transmission Packet Length in Secondary Radar Systems IEEE International conference on information and telecommunication technologies and radio Electronics, Kyiv, 2023. P. 166-170. DOI:10.1109/UkrMiCo61577.2023.10380404. ISBN: 979-835034848-4.

12. Романов А., Корнієнко Н. Побудова інформаційної моделі транспортної мережі SDN з використанням інтерфейсу T-API. XVI міжнародна науково-технічна конференція «Перспективи телекомунікацій», Київ, 2022 р., С.91-93.

13. Конахович Г.Ф., Романов А.О., Романов М.О. Аналіз технологій віртуалізації в телекомунікаціях. Проблеми експлуатації та захисту інформаційно-комунікаційних систем, м. Київ, 7-9 червня 2022 р., НАУ, К. С.96-98.



Проректор з навчальної роботи та якості освіти
ДУ «Київський авіаційний інститут»

Л.В. Шаульська

2026 року

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Результатів дисертаційної роботи здобувача наукового ступеня доктора філософії
Романової Тоні Олександрівни у навчальний процес Київського авіаційного інституту

Ми, що нижче підписалися, завідувач кафедри телекомунікаційних та радіоелектронних систем Факультету аеронавігації, електроніки та телекомунікацій, к.т.н., доц., В.О. Гнатюк, декан Факультету аеронавігації, електроніки та телекомунікацій, д.т.н. проф., Р.С. Одарченко склали цей акт про те, що результати наукових досліджень за темою дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора філософії Романової Тоні Олександрівни «Метод підвищення ефективності функціонування мережі для системи управління повітряним рухом на базі технологій SDN та NFV» за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка» використовуються у навчальному процесі на кафедрі телекомунікаційних та радіоелектронних систем Факультету аеронавігації, електроніки та телекомунікацій Київського авіаційного інституту.

Найменування впровадженого результату	Форма впровадження і досягнутий фактичний ефект
Метод побудови та оцінка ефективності функціонування мереж на основі технологій SDN та NFV	У навчальний процес як методичні рекомендації та програмні модулі при вивченні дисциплін пов'язаних з проектуванням та експлуатацією програмно-конфігурованих з застосуванням віртуалізації мережевих функцій. Підвищено ефективність засвоєння матеріалу студентами та забезпечено набуття практичних навичок проектування локальних та базових мереж.
Модель і метод керування потоками даних радіолокаційних каналах повітряного спостереження	У навчальних процес як теоретичну та методичну базу при викладанні дисциплін, пов'язаних із функціонуванням каналу зв'язку в радіолокаційних систем повітряного спостереження. Підвищено рівень підготовки студентів у сфері функціонування каналу зв'язку в РЛС, забезпечено формування компетентностей щодо вимог ефективності функціонування каналу, якості обслуговування, вразливостей та завадостійкості. Розроблений адаптивний алгоритм був врахований при створенні навчальних модулів для підготовки курсових та кваліфікаційних робіт студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Завідувач кафедри
телекомунікаційних та
радіоелектронних систем,
к.т.н., доц.

Декан Факультету
аеронавігації, електроніки та
телекомунікацій
д.т.н., проф.

В.О. Гнатюк

Р.С. Одарченко