

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-353-49>

УДК 621.395.72+004.056.53

ГАЛИКА КАРІНА

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

<https://orcid.org/0009-0003-5891-4438>e-mail: malinovskaya.yuliya2017@gmail.com**БОЙКО ОЛЕГ**

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

<https://orcid.org/0009-0001-3761-7528>**МАДІНОВ МИКОЛА**

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

<https://orcid.org/0009-0005-5910-8774>**ВОЛОШИН ВАСИЛЬ**

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

<https://orcid.org/0009-0008-6906-6370>**ГАЛАГАН НАТАЛІЯ**

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

<https://orcid.org/0000-0001-8582-3126>e-mail: n.halahan@duikt.edu.ua

МЕТОДИ ПОКРАЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ КОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ У СКЛАДНИХ УМОВАХ

Стаття присвячена дослідженню методів підвищення стійкості та ефективності комунікаційних мереж у складних умовах, з акцентом на моніторинг технічного стану інфраструктури та оптимізацію роботи мереж за допомогою передових технологій. Основні наукові результати включають розробку моделі моніторингу з кількома замкненими контурами управління, яка дозволяє виявляти та ізолювати збої, прогнозувати ризики та оптимізувати розподіл ресурсів. Упровадження формату DP-QPSK забезпечило підвищення спектральної ефективності, дозволяючи передавати 4 біти на символ без зміни частотного плану, а технологія Flexgrid у поєднанні з програмно-визначальними транспондерами (SDT) дала змогу адаптивно регулювати ширину каналів залежно від трафіку, підвищуючи стійкість мережі до перевантажень.

Ключові слова: стійкість мережі, ефективність передачі, когерентна модуляція, мультиагентні системи, спектральне управління, штучний інтелект.

HALYKA KARINA, BOYKO OLEG, MADINOV MYKOLA, VOLOSHYN VASYL, HALAHAN NATALIYA

State University of Information and Communication Technologies

METHODS FOR IMPROVING THE STABILITY AND EFFICIENCY OF COMMUNICATION NETWORKS IN DIFFICULT CONDITIONS

The article is devoted to the study of methods for increasing the stability and efficiency of communication networks in difficult conditions, with an emphasis on monitoring the technical condition of the infrastructure and optimizing network operation using advanced technologies. The purpose of the study is to create a comprehensive communication network management system that combines equipment condition monitoring, adaptive resource management and the use of highly efficient modulation formats to increase network throughput and stability. To achieve the goal, a multi-level approach to monitoring was used, which includes the analysis of network node parameters at the local, regional and global levels with the use of threshold values to assess the technical condition. The study considers coherent modulation formats, in particular DP-QPSK, and Flexgrid technology for flexible spectral management. Multi-agent system modeling is based on the principles of distributed artificial intelligence, which provides synergistic assessment of network parameters. The main scientific results include the development of a monitoring model with multiple closed control loops, which allows detecting and isolating failures, predicting risks and optimizing resource allocation. The introduction of the DP-QPSK format provided an increase in spectral efficiency, allowing the transmission of 4 bits per symbol without changing the frequency plan, and Flexgrid technology in combination with software-defined transponders (SDT) made it possible to adaptively adjust the channel width depending on the traffic, increasing the network's resilience to overloads. The prospects for further research are related to the improvement of multi-agent systems by integrating machine learning for anomaly prediction, as well as the development of ultra-complex modulation formats, such as DP-256QAM, to achieve data rates of up to 1 Tbit/s. A separate direction is the optimization of photonic integration to create energy-efficient and compact solutions that will facilitate the scaling of complex communication networks in the future.

Keywords: network resilience, transmission efficiency, coherent modulation, multi-agent systems, spectral management, artificial intelligence.

Стаття надійшла до редакції / Received 24.04.2025

Прийнята до друку / Accepted 22.05.2025

Постановка проблеми

У сучасних умовах стрімкої цифровізації усіх сфер життєдіяльності суспільства, безперервного зростання обсягів інформаційного обміну, а також з урахуванням посилення вимог до оперативності, безпеки та надійності передачі даних, комунікаційні мережі загального користування та спеціального призначення зазнають суттєвої трансформації, що виявляється у їх постійній модернізації, ускладненні архітектурних рішень і розширенні функціональних можливостей. Ці процеси реалізуються шляхом інтеграції багаторівневих моделей відкритих систем, цифрових мереж із суміщенням служб (ISDN), а також технологій мереж наступного покоління (NGN), що забезпечують універсальність і

масштабованість комунікаційних платформ навіть за умов високого рівня навантаження та потенційних загроз дестабілізації.

Водночас технічна структура таких мереж включає розгалужену інфраструктуру високошвидкісних каналів зв'язку, комутаційних вузлів, серверів послуг та інтелектуальних платформ керування, що функціонують у взаємодії з автоматизованими системами управління зв'язком. У складних і кризових умовах (зокрема, під час надзвичайних ситуацій, воєнних дій, природних катастроф чи кібератак) особливої ваги набуває забезпечення стійкості та безперервності функціонування таких мереж, що вимагає впровадження надійних методів моніторингу, оцінки та реконфігурації ресурсів з урахуванням динаміки їх технічного стану. Таким чином, актуальність дослідження обумовлена необхідністю формування нових науково обґрунтованих підходів до підвищення стійкості та ефективності функціонування комунікаційних мереж у нестабільному зовнішньому середовищі, що супроводжується зростанням технологічних, організаційних та інформаційних загроз.

Аналіз досліджень та публікацій

У контексті наукових пошуків, спрямованих на підвищення стійкості та ефективності функціонування комунікаційних мереж (КМ), що діють в умовах підвищеної складності, значна увага дослідницьких шкіл протягом останніх десятиліть зосереджувалася на питаннях моделювання оптимальних систем контролю та діагностики, які виступають фундаментальною складовою загальної архітектури комунікаційних систем. Підходи до побудови таких систем розглядаються у працях [1], [2], які акцентували увагу на структурних і функціональних особливостях мережових середовищ, зокрема, розподілених систем зв'язку та керування. У публікації [3] підкреслюється важливість розробки адаптивних моделей управління ресурсами мережі в режимі реального часу, що ґрунтуються на принципах багаторівневого моніторингу, самодіагностики та проактивної реконфігурації топологій зв'язку.

В межах наукових напрацювань [4], [5] було розроблено і апробовано низку методів збору, обробки та передачі вимірювальної інформації, яка характеризує технічний стан комунікаційного обладнання, зокрема з використанням телеметричних систем, інформаційно-вимірювальних модулів, а також технологій віддаленого технічного моніторингу. Дослідники наголошують, що ефективне функціонування таких систем можливе лише за умов застосування інтегрованого підходу до проектування, в якому поєднуються інструменти математичного моделювання, цифрової ідентифікації та штучного інтелекту, що особливо актуально в контексті автоматизованого управління комунікаційною інфраструктурою у критичних середовищах.

Окремі дослідження [7], [8] висвітлюють синтез інфраструктурних рішень для таких мереж з урахуванням адаптивної маршрутизації, резервування каналів, динамічного балансування навантаження та використання протоколів, стійких до зовнішніх впливів. Таким чином, наявний науковий доробок підтверджує наявність сталого інтересу до проблематики надійного функціонування телекомунікаційних систем, проте потребує подальшого розширення в частині інтеграції інтелектуальних механізмів аналізу даних у реальному часі.

Формулювання цілей статті

Мета статті – дослідити та обґрунтувати доцільність використання активних методів зростання рівня стійкості та робочої ефективності комунікаційних мереж в агресивних умовах.

Виклад основного матеріалу

Під моніторингом технічного стану комунікаційної інфраструктури, згідно з сучасними дослідницькими підходами, слід розуміти системну діяльність з безперервного спостереження за характеристиками мережових об'єктів, що дозволяє фіксувати критичні зміни у параметрах роботи обладнання, прогнозувати ризики виходу з ладу та вчасно ініціювати адаптивні технічні або програмні заходи. При цьому важливо розрізнити поняття «стану мережі» як цілісної системи взаємопов'язаних компонентів та «технічного стану» окремих мережових пристроїв, що формує підґрунтя для прийняття рішень щодо оптимізації конфігурацій мережових топологій, маршрутизації та балансування навантаження.

У процесі підвищення надійності функціонування КМ в умовах дестабілізаційного впливу внутрішніх і зовнішніх чинників, доцільно формувати модель підсистеми моніторингу з урахуванням кількох замкнених контурів управління, які формуються залежно від просторового розміщення мережового обладнання відносно серверів, що здійснюють спостереження та аналітичну обробку. З урахуванням того, що КМ являє собою складну територіально-розподілену систему, яка поєднує в собі $N_{(k)}$ підсистем (або підмереж) та значну кількість мережових пристроїв на кожному з k -х рівнів управління (де k може відповідати локальному, регіональному або глобальному рівню), доцільно реалізовувати багаторівневий контроль на K рівнях, де $K > 3$, $a k = 1, 2, \dots, K$. Кожен $n_{(k)}$ -ий мережевий вузол у межах підсистеми характеризується множиною контрольованих параметрів у кількості $M(k, n)$, для яких заздалегідь задаються припустимі порогові значення $Z^{nop}(k, n, m)$, де $n_{(k)} = 1, 2, \dots, N_{(k)}$, а $m = 1, 2, \dots, M(k, n)$ [9].

1. Метод діагностики. Під час виконання процедур діагностики й моніторингу стану КМ, відповідні сервери моніторингу здійснюють збір поточних значень метрик $z(k, n, m)$ на всіх рівнях

управління для їхнього порівняння із попередньо визначеними пороговими значеннями $Z^{пор}(k, n, m)$. Оцінювання технічного стану усієї мережевої інфраструктури виконується послідовно, проходячи K етапів. У контексті підвищення стійкості КМ, особливо за умов дії зовнішніх дестабілізуючих факторів, особливу актуальність набуває впровадження когерентних систем передачі даних, які дозволяють максимально ефективно використовувати всі чотири ступені свободи електромагнітного сигналу, а саме амплітуду, фазу та обидві взаємно ортогональні поляризації. Такі дії забезпечують суттєве збільшення пропускної здатності мережі без необхідності збільшення символічної швидкості або модифікації частотного плану мультиплексування за довжинами хвиль, який нині широко використовується і базується на кроку 50 ГГц. Зокрема, використання формату модуляції DP-QPSK (Dual Polarization – Quadrature Phase Shift Keying) дозволяє передавати 4 біти інформації на кожен символ, що досягається завдяки застосуванню одного рівня потужності та поєднанню фазової модуляції з поляризаційним мультиплексуванням. Це дозволяє забезпечити високу щільність спектрального заповнення каналів, не порушуючи гармонійного функціонування мережевої інфраструктури, та є однією з ключових умов підвищення енергетичної та спектральної ефективності мереж у режимі високих навантажень або при обмежених ресурсах. У результаті за останні роки в телекомунікаційній галузі спостерігається стрімке витіснення форматів модуляції з керуванням лише потужністю (наприклад, OOK – On-Off Keying), що працювали зі швидкістю до 10 Гбіт/с, більш ефективними когерентними форматами з повторною частотою 40 та 100 Гбіт/с, які стали стандартом у сучасних оптичних мережах передачі [10].

Структура сигналу у форматі DP-QPSK, яка ґрунтується на подвійному ортогональному кодуванні, передбачає використання двох незалежних компонентів сигналу, кожна з яких модулюється за методом QPSK та передається по окремій поляризаційній площині. Такий підхід, який у технічній літературі часто додатково позначається терміном PM-QPSK (Polarization Multiplexed QPSK), реалізує ідею поляризаційного мультиплексування. Водночас кожен з сигналів QPSK, переданий через одну з поляризацій, може бути представлений як поєднання двох фазових компонентів BPSK (Binary Phase Shift Keying), які відрізняються між собою зсувом фази на $\pi/2$, що створює ефект квадратурного модуляційного сигналу із покращеною стійкістю до завад (рис. 1.).

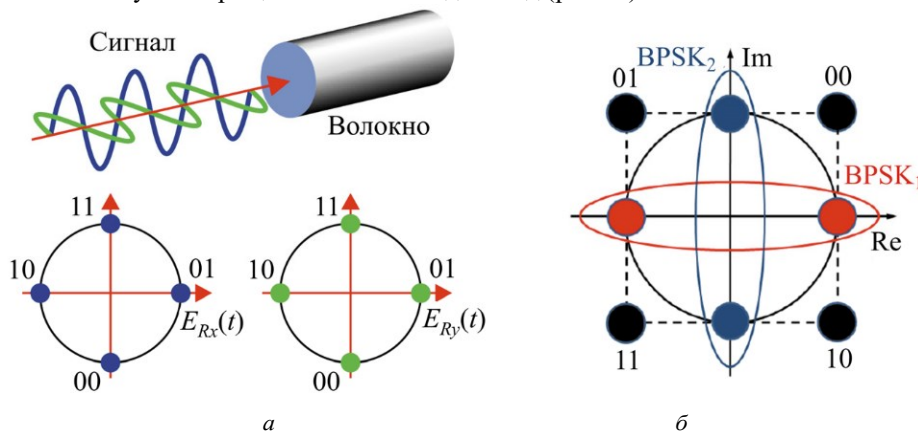


Рис. 1. Структура когерентного оптичного сигналу для підвищення стійкості комунікаційної мережі: а – реалізація поляризаційного мультиплексування двох сигналів у форматі QPSK; б – внутрішня структура QPSK-сигналу як поєднання фазових компонент [10]

Якщо отримані дані не виходять за межі встановлених порогів, мережу вважають стабільною та працездатною. У разі фіксації відхилень від допустимих меж ініціюється створення інтелектуального агента (ІА), який здійснює послідовну оцінку технічного стану вузлів КМ на вищих логічних рівнях. З цією метою повторно порівнюються актуальні вимірювання з відповідними порогоми для k -го рівня. Якщо параметри перебувають у допустимих межах, відповідна підсистема вважається працездатною; якщо ж ні тоді фіксується несправність з точним виявленням тих параметрів, які вийшли за межі допустимих значень. У відповідь на ці результати здійснюється генерація нового інтелектуального агента, функціонал якого спрямовано на реалізацію дій з резервування компонентів та відновлення нормального функціонування мережевої інфраструктури [11]. Варто зазначити, що допустимі значення метрик задаються на основі апріорної інформації про актуальний стан КМ на відповідному логічному рівні, що дає змогу реалізувати зворотний зв'язок у системі контролю.

2. Модель мультиагентної системи. Під час проектування висококомплексних технічних систем, якими є сучасні КМ, все більшого поширення набуває використання моделей мультиагентних систем (МАС) як інтелектуальних інструментів підтримки процесу прийняття рішень, у яких враховується синергетичний ефект та цілісна оцінка всіх ключових параметрів як окремих підсистем, так і загальної системи. Архітектура таких мультиагентних систем базується на принципах розподіленого штучного інтелекту (РШІ) і побудована на логіці прецедентів, де кожен агент виконує роль автономної знаннєво-орієнтованої підсистеми з підтримкою модулів безпеки, надійності,

управління якістю обслуговування, а також здатності до міжагентної взаємодії та адаптивного використання ресурсів мережі (рис. 2.) [12].

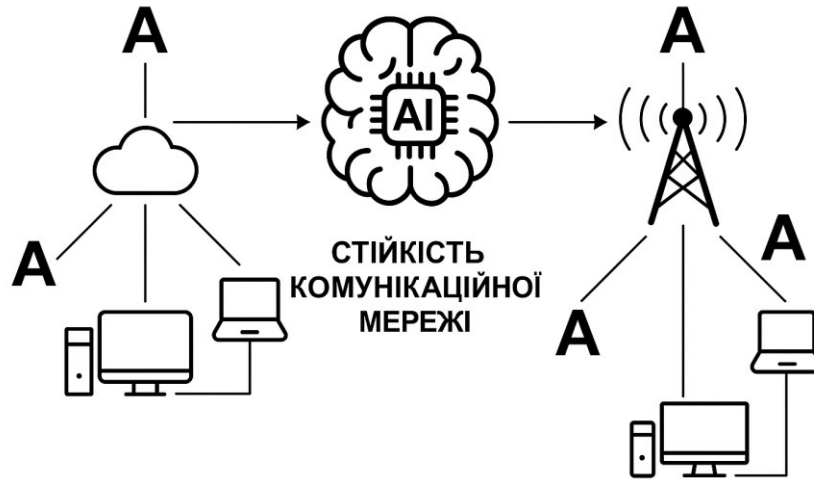


Рис. 2. Використання розподіленого штучного інтелекту для забезпечення стійкості комунікаційної мережі

Фактично така структура MAC реалізує інформаційну архітектуру функціональної моделі FCAPS, яка передбачає п'ять ключових проєкцій функціонального управління: Fault Management (управління відмовами), Configuration Management (керування конфігурацією), Accounting Management (облік ресурсів), Performance Management (управління продуктивністю), та Security Management (керування безпекою) (табл. 1).

Таблиця 1

Система управління стійкістю та ефективністю комунікаційних мереж у складних умовах (побудовано автором)

F (Управління відмовами)	C (Управління конфігурацією)	A (Доступність / Продуктивність)	P (Управління ресурсами)	S (Безпека)
Моніторинг збоїв мережі	Моніторинг змін конфігурації	Моніторинг продуктивності мережі	Моніторинг використання ресурсів	Моніторинг безпеки мережі
Виявлення та ізоляція відмов	Автоматизоване виявлення топології	Моніторинг доступності (uptime)	Оптимізація розподілу ресурсів	Сканування вразливостей
Кореляція причин збоїв	Синхронізація конфігурацій	Аналіз затримок пропускну здатності	Прогнозування потреб у ресурсах	Аналіз журналів безпеки
Генерація попереджень про збої	Перевірка відповідності конфігурацій	Аудит якості обслуговування (QoS)	Балансування навантаження	Попередження про кібератаки
Автоматизована діагностика	Резервне копіювання конфігурацій	Аналіз трендів продуктивності	Моніторинг енергоспоживання	Реагування на інциденти безпеки
Фільтрація критичних подій	Відкат до стабільної конфігурації	Прогнозування перевантажень	Адаптивне виділення ресурсів	Шифрування каналів зв'язку
Тестування стійкості мережі	Аудит конфігураційних змін	Моніторинг резервних каналів	Управління віртуалізованими ресурсами	Аутентифікація та контроль доступу
Фіксація збоїв	Аналіз впливу змін топології	Ретроспективний аналіз доступності	Моніторинг відмов обладнання	Аудит прав доступу
Обробка та ескалація помилок	Прогнозування конфігураційних ризиків	Оптимізація маршрутизації	Планування резервних ресурсів	Виявлення аномалій поведінки
Статистика стійкості мережі	Документація конфігурацій	Звіти про ефективність мережі	Аналіз ефективності ресурсів	Звіти про безпекові інциденти

Застосування моделі забезпечує високу інтегрованість із сучасними підходами до представлення знань, що розроблялися у рамках штучного інтелекту, і дає змогу ефективно координувати управління складними телекомунікаційними структурами у режимі реального часу навіть в умовах невизначеності та ризику.

3. Високорівнева модуляція для підвищення ефективності комунікаційних мереж. У сучасних дослідженнях, що зосереджені на покращенні стійкості та ефективності функціонування волоконно-

оптичних комунікаційних мереж, значна увага приділяється впровадженню багаторівневих форматів модуляції, які здатні істотно збільшити спектральну ефективність без необхідності розширення частотного діапазону, що вже активно експлуатується операторами зв'язку. Зокрема, формати модуляції типу DP-16QAM, DP-64QAM та інші, що передбачають передачу значної кількості бітів на один символ, відкривають перспективи значного підвищення пропускної здатності мереж без зміни ширини смуги пропускання. Проте зростання складності форматів модуляції закономірно супроводжується зменшенням максимальної відстані надійної передачі, що зумовлює потребу в додаткових рішеннях щодо компенсації згасання, дисперсії та завад [13].

Незважаючи на ці виклики, провідні дослідницькі центри та комерційні компанії активно експериментують із надскладними модуляційними форматами, такими як 128QAM і навіть 256QAM, які дозволяють передавати до 16 біт на символ у форматі DP-256QAM, що забезпечує надзвичайно високу швидкість обміну даними в межах коротких оптичних трас. У найближчому майбутньому можна очікувати широкомасштабного впровадження мережових рішень зі швидкістю 200 Гбіт/с та 400 Гбіт/с на основі формату DP-16QAM, що особливо актуально для побудови стійких міських та магістральних інфраструктур із високою щільністю передавання інформації.

4. Метод підвищення символної швидкості мережі. Для вдосконалення технічних характеристик транспондерів, ключових компонентів оптичних мереж – все ширше застосовуються символні швидкості у діапазоні 30-40 Гбод, причому саме ці значення наразі є стандартними для транспондерів, що працюють у режимі 100 Гбіт/с із використанням DP-QPSK. Збільшення символної швидкості не тільки підвищує ефективність використання спектра, а й сприяє оптимізації витрат на обладнання в опорних мережах, зменшенню енергоспоживання та потреб у просторових ресурсах у вузлах регенерації. Очікується, що наступним технологічним етапом стане перехід до 60 Гбод, що відкриє можливість досягнення швидкості 400 Гбіт/с в одному оптичному каналі шириною 100 ГГц, особливо за використання форматів DP-16QAM. Провідні виробники телекомунікаційних рішень, серед яких Alcatel, Huawei, ZTE, активно займаються розробкою транспондерів із символною швидкістю до 120 Гбод, що дозволить істотно покращити стійкість передачі даних у змінних або складних умовах [14].

5. Подолання обмежень через оптичні технології. Ключовим обмеженням у підвищенні символної швидкості залишається обмежене швидкодіяння електронних компонентів, однак цю проблему можна частково вирішити шляхом впровадження оптичних технологій, таких як спектральне склеювання або оптичне часове мультиплексування (OTDM). Попри це, практична реалізація технологій OTDM та спектрального склеювання залишається обмеженою через їх високу вартість, складність оптоелектронної інтеграції та нестабільність у промислових умовах.

6. Суперканали як рішення для масштабування швидкості. Іншим важливим напрямом у підвищенні ефективності комунікаційних мереж виступає застосування концепції оптичних суперканалів, що передбачає агрегування кількох несучих (піднесучих) у єдиний високошвидкісний канал. Такий підхід дає змогу досягати каналної швидкості 400 Гбіт/с або навіть 1 Тбіт/с без необхідності застосування надшвидкої електроніки, як це потрібно при використанні однієї несучої. Основною перевагою цієї технології є можливість значного масштабування швидкості передавання, а основним недоліком – ускладнення цифрової обробки сигналів, зокрема в частині синхронізації різних потоків даних на піднесучих. Разом із цим, ідея розподілу трафіку на паралельні потоки є вже давно застосовуваною практикою в багатьох рівнях комунікаційних систем. У магістральних мережах таке рішення дозволяє управляти групами каналів як єдиним логічним блоком без необхідності обробки кожної несучої окремо, що істотно спрощує управління та підвищує гнучкість мереж [15].

Досягнення максимальної щільності розміщення можливе за умови використання сигналів із прямокутним спектром модуляції, що мінімізує міжканальні завади. Формування таких сигналів є завданням спектральної інженерії, що забезпечує розробку структур з точно заданими спектральними характеристиками. У цьому контексті особливу увагу привертає технологія Nyquist-WDM, яка розглядається як перспективна як з теоретичного, так і з прикладного погляду та відкриває шлях до створення більш стійких, економічно доцільних і масштабованих систем зв'язку нового покоління.

У свою чергу, одним із найважливіших чинників, що забезпечують компактність, енергоефективність та економічну ефективність волоконно-оптичних систем, є зростаючий рівень фотонної інтеграції. Створення фотонних інтегральних схем дозволяє поєднати в межах одного чипа широкий спектр компонентів, від світлових джерел до детекторів, модуляторів, підсилювачів, поляризаторів, розгалужувачів і фільтрів, що дає змогу суттєво зменшити витрати на виробництво, знизити споживання енергії та забезпечити компактність пристроїв без втрати їх функціональних властивостей.

Інтеграція таких компонентів може відбуватись за двома основними архітектурними підходами: послідовним або паралельним. У першому випадку (що найбільш поширений у телекомунікаційних застосуваннях) елементи, такі як лазери, керуюча електроніка, модулятори та приймальні вузли, створюються та з'єднуються послідовно. У паралельній архітектурі йдеться про побудову інтегрального пристрою на основі набору фотодетекторів, підсилювачів та мультиплексорів, що дозволяє досягати вищої продуктивності при одночасній обробці даних. Найвищого рівня

мініатюризації й надійності досягають при монолітній інтеграції, коли усі оптичні та електронні елементи розміщуються на одній підкладці. Найбільш перспективними матеріалами для таких рішень у діапазоні 1550 нм вважаються кремній (Si) та фосфід індію (InP). Альтернативою є гібридна інтеграція, коли різні елементи виготовляються на окремих підкладках і поєднуються між собою за допомогою хвилеводів, переважно з використанням діелектричних матеріалів на основі кварцу, скла або ферроелектриків [16].

7. Гнучке спектральне управління як засіб адаптивності мереж. У складних експлуатаційних умовах, де навантаження на комунікаційні мережі є динамічним, виникає об'єктивна потреба в гнучкому керуванні спектральними ресурсами, що дозволяє адаптувати смугу пропускання під змінні вимоги щодо швидкості передавання даних та використовуваного модуляційного формату. Сучасні системи DWDM оперують стандартною частотною сіткою з інтервалом 50 ГГц, що є достатнім для багатьох задач, проте обмеженим для реалізації масштабованих адаптивних рішень. На зміну цій концепції приходить технологія Flexgrid, яка передбачає поділ робочого спектру на вузькі спектральні слоти зазвичай 12,5 ГГц або 6,25 ГГц, що можуть об'єднуватися в блоки потрібного розміру для утворення динамічних каналів. Масове впровадження Flexgrid стало можливим завдяки появі спектрально селективних комутаторів (WSS), створених на основі технології рідких кристалів на кремнії (LCoS). Завдяки цьому обладнанню, оператор може виділяти спектральні канали довільної ширини від одного слоту до повної ширини C-діапазону ($\approx 4,5$ ТГц), що відкриває можливості для гнучкого балансування навантаження відповідно до трафікових змін (рис. 3.) [3].

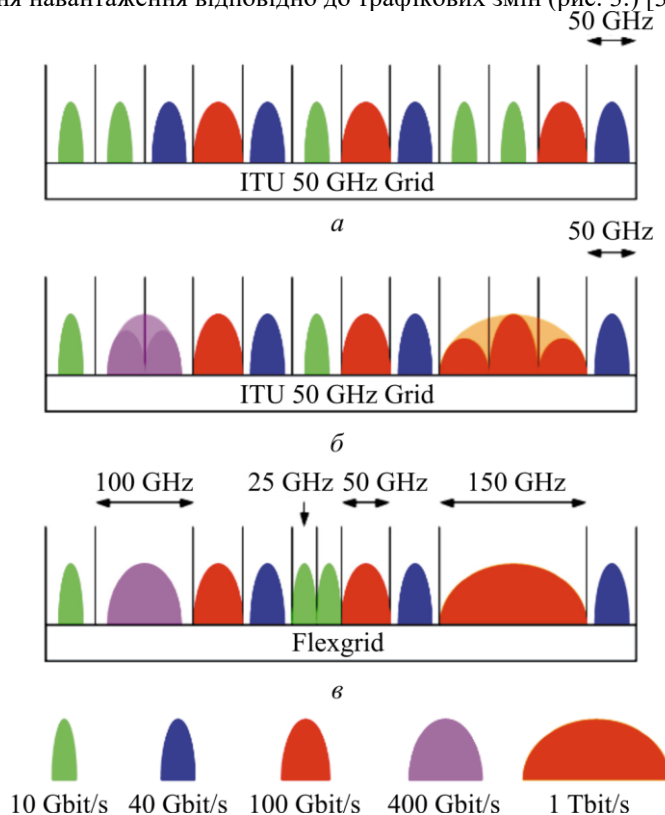


Рис. 3. Порівняння архітектур DWDM-систем з фіксованими та гнучкими спектральними сітками для забезпечення стійкої та високопродуктивної роботи комунікаційних мереж: а – функціонування гетерогенних мереж з каналними швидкостями до 100 Гбіт/с у межах фіксованої сітки 50 ГГц; б – обмеження передавання сигналів зі швидкістю 400 Гбіт/с і 1 Тбіт/с у фіксованій сітці; в – можливість адаптивного керування шириною спектральної смуги за допомогою технології Flexgrid

У складних умовах транспондери з регульованою швидкістю передачі даних (BVT, bitrate variable transponder) дозволяють змінювати лише швидкість передачі інформації, що забезпечує базову адаптацію до потреб мережі. Натомість транспондери з програмно-визначальною функціональністю (SDT, software defined transponder), завдяки інтегрованій системі управління, надають значно ширші можливості, дозволяючи гнучко налаштовувати не лише формат модуляції, але й символну швидкість і ширину спектральної смуги, що використовується для передачі даних [9]. Застосування SDT у мережах із технологією Flexgrid відкриває перспективи для додаткової оптимізації функціонування мережі в умовах, коли трафік зазнає динамічних змін, що є особливо актуальним у складних середовищах із нестабільними параметрами. Завдяки такій гнучкості канали зв'язку можуть адаптивно регулювати ширину своєї смуги пропускання залежно від поточного обсягу трафіку, що сприяє ефективному розподілу ресурсів, а вивільнена частина спектра може бути оперативно перерозподілена для використання сусідніми каналами, підвищуючи загальну пропускну здатність і стійкість мережі до перевантажень чи збоїв.

Висновки

Досліджено специфіку створення багаторівневої системи моніторингу стану комунікаційної мережі, яка забезпечує її надійну роботу навіть при несприятливих зовнішніх впливах, що саме досягається за рахунок послідовного аналізу параметрів на кожному рівні управління, де встановлено гнучкі порогові значення. Сам підхід дозволяє швидко виявляти критичні відхилення, запускати інтелектуальні діагностичні алгоритми та приймати обґрунтовані рішення щодо переконфігурації або резервування мережевих ресурсів. Розглянуто способи покращення надійності та продуктивності комунікаційних систем завдяки впровадженню мультиагентної моделі управління на базі розподіленого штучного інтелекту. Вказана модель реалізує функціональні підсистеми у відповідності до стандартної архітектури FCAPS, координує взаємодію між агентами, забезпечує адекватну реакцію мережі на всі види викликів та дозволяє динамічно налаштовувати конфігурації з урахуванням поточних навантажень і ризиків.

Оцінено можливості застосування сучасних форматів модуляції DP-16QAM, DP-64QAM, DP-256QAM для підвищення спектральної ефективності оптичних мереж. Такі технології дозволяють суттєво збільшити пропускну здатність без розширення смуги пропускання, при цьому проблему зменшення дальності передачі можна вирішити за допомогою когерентних приймачів, багатоканального захисту від завад та оптимізації енергетичних параметрів. Підтверджена доцільність використання технологій Flexgrid та програмно-конфігурованих транспондерів (SDT) для адаптації мереж до мінливих умов роботи. Ці інструменти дають змогу гнучко змінювати параметри модуляції, символівну швидкість та ширину каналів, оптимізуючи розподіл ресурсів і підвищуючи загальну стійкість мережі до навантажень, перевантажень та інших критичних ситуацій у складному телекомунікаційному середовищі.

Література

1. Мадінов М., Руденко Н. Стандарти як основа інформаційно-комунікаційних технологій: дослідження міжнародних стандартів комунікаційних систем. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. (4(30)). 153-164. <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.4.153>
2. Zhang D., Men H., Zhang Z. Assessing the stability of collaboration networks: A structural cohesion analysis perspective. *Journal of Informetrics*. 2024. 18(1). Article 101490. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2024.101490>
3. Karaman B., Basturk I., Taskin S., Zeydan E., Kara F., Beyazit E. A., Camelo M., Björnson E., Yanikomeroglu H. Solutions for sustainable and resilient communication infrastructure in disaster relief and management scenarios. *arXiv preprint arXiv*. 2024. 2410.13977. <https://arxiv.org/abs/2410.13977>
4. Македон В. В., Байлова О. О. Планування і організація впровадження цифрових технологій в діяльність промислових підприємств. *Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія «Економічні науки»*. 2023. (47). 16-26. <https://doi.org/10.32999/ksu2307-8030/2023-47-3>
5. Alhammadi A., Shaye A., El-Saleh A. A., Azmi M. H., Ismail Z. H., Kouhalvandi L., Saad S. A. Artificial Intelligence in 6G Wireless Networks: Opportunities, Applications, and Challenges. *Journal of Computer Networks and Communications*. 2024. Article ID 8845070. <https://doi.org/10.1155/2024/8845070>
6. Зінченко А., Масесов М., Пантась І. Аналіз методів підвищення живучості телекомунікаційних мереж. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2021. 41(2). 5-10. <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2021-41-2-5-10>
7. Васильківський М. В., Будах М. В., Болдирева О. С. Забезпечення інформаційного захисту в телекомунікаційних мережах 6G. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. 2023. (50). 142-147. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-50-22>
8. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). *The environmental sustainability of communication networks* (OECD Digital Economy Papers. 2025. No. 372. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/d1cb2210-en>
9. Невлюдов І. Ш., Малик Б. О., Токарева О. В., Невлюдова В. В. Підвищення ефективності оптоволоконних каналів зв'язку. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2020. 1(59). 151-154. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.1.151>
10. Youssef A. A., Elsanadily S. I. Enhancing free-space optical communication networks using Generalized Low Density Parity Check codes. *Optics & Laser Technology*. 2024. 172. 111862. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.111862>
11. Makedon V., Myachin V., Plakhotnik O., Fisunen N., Mykhailenko O. Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. no 2(13(128)). 47-57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300796>
12. Wang J. Artificial intelligence in communication network management. In Y. Yue (Ed.), *Proceedings of the 2024 International Conference on Mechanics, Electronics Engineering and Automation. ICMEEA*. 2024. pp. 312-318. Atlantis Press. https://doi.org/10.2991/978-94-6463-518-8_31

13. Ashraf M. W. A., Singh A. R., Pandian A., Bajaj M., Zaitsev I., Rathore R. S. Enhancing network security with hybrid feedback systems in chaotic optical communication. *Scientific Reports*. 2024. 14. 24958. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-76391-0>
14. Imran M. A., Zennaro M., Popoola O. R., Chiaraviglio L., Zhang H., Manzoni P., van de Beek J., Stewart R., Cox M. A., Mendes L. L., Pietrosemoli E. Exploring the boundaries of connected systems: Communications for hard-to-reach areas and extreme conditions. *Proceedings of the IEEE*. Advance online publication. 2024. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2024.3402265>
15. Al-Mashhadani S. W. T., Kurnaz S. A novel function of a research process based on a power internet of things architecture intended for smart grid demand schemes. *Applied Sciences*. 2024. 14(13). 5799. <https://doi.org/10.3390/app14135799>
16. Pajak K., Omelyanenko V., Makedon V., Shevchenko V., Ovcharenko I. Raising the level of financial security of the enterprise based on the basic risks differentiation. *Journal of Security and Sustainability Issues*. 2020. №10 (1). 115-130. [https://doi.org/10.9770/jssi.2020.10.1\(9\)](https://doi.org/10.9770/jssi.2020.10.1(9)).

References

1. Vasylykivskiy, M. V., Budash, M. V., & Boldyreva, O. S. (2023). Zabezpechennia informatsiynoho zakhystu v telekomunikatsiynyykh merezhakh 6G. *Komp'uterno-intehrovani tekhnologii: osvita, nauka, vyrobnytstvo*, (50), 142-147. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-50-22>
2. Zinchenko, A., Masesov, M., & Pantas', I. (2021). Analiz metodiv pidvyshchennia zhyvuchosti telekomunikatsiynyykh merezh. *Suchasni informatsiyni tekhnologii u sferi bezpeky ta oborony*, 41(2), 5-10. <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2021-41-2-5-10>
3. Madinov, M., & Rudenko, N. (2024). Standarty yak osnova informatsiyno-komunikatsiynyykh tekhnologii: doslidzhennia mizhnarodnykh standartiv komunikatsiynyykh system. *Suchasnyy stan naukovykh doslidzhen' ta tekhnologii v promyslovosti*, (4(30)), 153-164. <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.4.153>
4. Makedon, V. V., & Bailova, O. O. (2023). Planuvannia i orhanizatsiia vprovadzhennia tsyfrovyykh tekhnologii v dial'nist' promyslovykh pidpriemstv. *Naukovyy visnyk Kherson'skoho derzhavnoho universytetu. Seriya «Ekonomichni nauky»*, (47), 16-26. <https://doi.org/10.32999/ksu2307-8030/2023-47-3>
5. Nevliudov, I. Sh., Malyk, B. O., Tokarieva, O. V., & Nevliudova, V. V. (2020). Pidvyshchennia efektyvnosti optovolonnykh kanaliv zviazku. *Systemy upravlinnia, naviatsii ta zviazku*, 1(59), 151-154. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.1.151>
6. Alhamadi, A., Shaye'a, I., El-Saleh, A. A., Azmi, M. H., Ismail, Z. H., Kouhalvandi, L., Saad, S. A. (2024). Artificial Intelligence in 6G Wireless Networks: Opportunities, Applications, and Challenges. *Journal of Computer Networks and Communications*, 2024, Article ID 8845070. <https://doi.org/10.1155/2024/8845070>
7. Al-Mashhadani, S. W. T., & Kurnaz, S. (2024). A novel function of a research process based on a power internet of things architecture intended for smart grid demand schemes. *Applied Sciences*, 14(13), 5799. <https://doi.org/10.3390/app14135799>
8. Ashraf, M. W. A., Singh, A. R., Pandian, A., Bajaj, M., Zaitsev, I., & Rathore, R. S. (2024). Enhancing network security with hybrid feedback systems in chaotic optical communication. *Scientific Reports*, 14, 24958. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-76391-0>
9. Imran, M. A., Zennaro, M., Popoola, O. R., Chiaraviglio, L., Zhang, H., Manzoni, P., van de Beek, J., Stewart, R., Cox, M. A., Mendes, L. L., & Pietrosemoli, E. (2024). Exploring the boundaries of connected systems: Communications for hard-to-reach areas and extreme conditions. *Proceedings of the IEEE*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2024.3402265>
10. Karaman, B., Basturk, I., Taskin, S., Zeydan, E., Kara, F., Beyazit, E. A., Camelo, M., Björnson, E., & Yanikomeroglu, H. (2024). Solutions for sustainable and resilient communication infrastructure in disaster relief and management scenarios. *arXiv preprint arXiv:2410.13977*. <https://arxiv.org/abs/2410.13977>
11. Makedon, V., Myachin, V., Plakhotnik, O., Fisunenko, N., Mykhailenko, O. (2024). Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, no 2(13(128)), 47-57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300796>.
12. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2025). *The environmental sustainability of communication networks* (OECD Digital Economy Papers No. 372). OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/d1cb2210-en>
13. Pajak, K., Omelyanenko, V., Makedon, V., Shevchenko, V., Ovcharenko, I. (2020). Raising the level of financial security of the enterprise based on the basic risks differentiation. *Journal of Security and Sustainability Issues*, №10 (1), 115-130. [https://doi.org/10.9770/jssi.2020.10.1\(9\)](https://doi.org/10.9770/jssi.2020.10.1(9)).
14. Wang, J. (2024). Artificial intelligence in communication network management. In Y. Yue (Ed.), *Proceedings of the 2024 International Conference on Mechanics, Electronics Engineering and Automation (ICMEEA 2024)* (pp. 312-318). Atlantis Press. https://doi.org/10.2991/978-94-6463-518-8_31
15. Youssef, A. A., & Elsanadily, S. I. (2024). Enhancing free-space optical communication networks using Generalized Low Density Parity Check codes. *Optics & Laser Technology*, 172, 111862. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.111862>
16. Zhang, D., Men, H., & Zhang, Z. (2024). Assessing the stability of collaboration networks: A structural cohesion analysis perspective. *Journal of Informetrics*, 18(1), Article 101490. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2024.101490>