

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Кіберфізична система контролю опорної оптичної телекомунікаційної мережі з використанням «темних» оптичних волокон

Назва теми

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 12 «Інформаційні технології»

Шифр, назва

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»

Шифр, назва

Освітня програма «Комп'ютерна інженерія та програмування»

Назва

Шифр КвРКІ 2401227.21.01.46 ПЗ

Виконав здобувач II курсу, група КІ2м-24-1


Підпис

Дмитро МІТІН
Ім'я, прізвище

Керівник канд.-техн. наук, доцент
Науковий ступінь, учене звання


Підпис

Олексій ІВАНОВ
Ім'я, прізвище

Нормоконтролер канд.фіз.-мат.наук., доцент
Науковий ступінь, учене звання


Підпис

Тетяна КИСІЛЬ
Ім'я, прізвище

До захисту допускаю:
завідувач кафедри КІС


Підпис

Ольга ПАВЛОВА
Ім'я, прізвище

«01» травня 2026 р.

дата

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Рівень вищої освіти ДРУГИЙ (МАГІСТЕРСЬКИЙ)

Галузь знань 12 ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Спеціальність 123 КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

Освітня програма «КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ПРОГРАМУВАННЯ»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувачка кафедри КІПС

 Ольга ПАВЛОВА

“ 12 ” 01 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Мітін Дмитро Сергійович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Кіберфізична система контролю опорної оптичної телекомунікаційної мережі з використанням «темних» оптичних волокон

Керівник проекту (роботи) Іванов Олексій Валентинович, к.т.н., доцент.

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджена наказом ректора університету від 12.01.2026 р. № 6

2. Термін подання здобувачем роботи на кафедру 01.05.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи Завдання на кваліфікаційну роботу

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

Кіберфізична система контролю опорної оптичної телекомунікаційної мережі з використанням «темних» оптичних волокон

Проектування кіберфізичної система контролю опорної оптичної телекомунікаційної мережі з використанням «темних» оптичних волокон

Програмно-апаратна кіберфізична система контролю опорної оптичної телекомунікаційної мережі з використанням «темних» оптичних волокон

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) _____

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

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

7. Дата видачі завдання « 12 » 01 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№з/п	Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи магістра	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Вибір напрямку дослідження та узгодження тематики КвРМ з керівником	12.01.2026	виконано
2	Ознайомлення з предметною областю; формулювання мети та задач дослідження; визначення об'єкта та предмета дослідження	12.01.2026	виконано
3	Робота над розділом 1 – аналіз відомих моделей, методів за темою; постановка задачі	20.01.2026	виконано
4	Робота над розділом 2 – розробка моделей для вирішення поставленої задачі	01.02.2026	виконано
5	Робота над науковою статтею	01.03.2026	виконано
6	Робота над розділом 3 – розробка методів для вирішення поставленої задачі	15.03.2026	виконано
7	Робота над розділом 4 – проектування та розробка ПЗ для вирішення поставленої задачі, експериментальна частина	01.04.2026	виконано
8	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог	18.04.2026	виконано
9	Попередній захист ДРМ	29.04.2026	виконано
10	Захист ДРМ на засіданні ЕК	До 15.05.2026	

Здобувач


 Підпис

Дмитро МІТІН

Імя, ПРІЗВИЩЕ

Керівник кваліфікаційної роботи


 Підпис

Олексій ІВАНОВ

Імя, ПРІЗВИЩЕ

РЕФЕРАТ

Тема Кіберфізична система контролю опорної оптичної телекомунікаційної мережі з використанням «темних» оптичних волокон

Автор роботи: Семенюк Євгеній Валерійович

Керівник роботи: Савенко Олег Станіславович

Пояснювальна записка: 80 с., 11 рис., 81 джерел.

АНАЛІТИЧНИЙ МОДУЛЬ, ВИЯВЛЕННЯ АНОМАЛІЙ, ВОЛОКОННО-ОПТИЧНА ЛІНІЯ ЗВ'ЯЗКУ, КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА, МОНІТОРИНГ, NMS/OSS, ОПОРНА ОПТИЧНА МЕРЕЖА, ОПТИЧНА ІНФРАСТРУКТУРА, ТЕЛЕМЕТРІЯ, «ТЕМНІ» ОПТИЧНІ ВОЛОКНА.

Об'єктом роботи є процес контролю технічного стану опорної оптичної телекомунікаційної мережі.

Предметом роботи є моделі, методи та програмні засоби побудови кіберфізичної системи контролю опорної оптичної телекомунікаційної мережі з використанням «темних» оптичних волокон.

Метою кваліфікаційної роботи магістра є підвищення ефективності контролю технічного стану опорної оптичної телекомунікаційної мережі за рахунок розроблення кіберфізичної системи, яка поєднує фізичні вимірювання на «темних» оптичних волокнах, мережеву телеметрію, аналітичне опрацювання даних та підтримку експлуатаційних рішень.

Для розв'язання поставлених завдань використано методи системного аналізу, моделювання телекомунікаційних процесів, методи оброблення та інтеграції даних, методи кореляції подій, алгоритмічні підходи до виявлення аномалій, а також засоби програмної реалізації серверних застосунків, баз даних і веб-інтерфейсів.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що:

– запропоновано підхід до побудови кіберфізичної системи контролю опорної оптичної телекомунікаційної мережі, у межах якого «темні» оптичні

волокна використовуються як окремий контур фізичного спостереження за станом волоконно-оптичної інфраструктури;

- удосконалено метод поєднання результатів фізичних вимірювань і телеметричних параметрів активного обладнання в єдиному середовищі подій і метрик;

- дістали подальшого розвитку моделі та алгоритми виявлення аномалій, локалізації проблемних ділянок і формування пріоритету експлуатаційного реагування в системах контролю опорних мереж.

Практичне значення одержаних результатів полягає в розробленні програмно-аналітичної частини системи контролю, яка забезпечує приймання фізичних вимірювань і телеметричних даних, їх накопичення, аналітичне опрацювання, формування сповіщень для оператора та інтеграцію із зовнішнім середовищем керування мережею. Отримані результати можуть бути використані під час побудови або модернізації систем моніторингу опорної волоконно-оптичної інфраструктури.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, визначено об'єкт, предмет, мету та завдання роботи, наведено наукову новизну й практичне значення одержаних результатів, а також подано характеристику структури роботи.

У першому розділі виконано аналіз особливостей функціонування опорних оптичних телекомунікаційних мереж, розглянуто фактори впливу на технічний стан волоконно-оптичних ліній зв'язку, охарактеризовано сучасні методи моніторингу оптичної інфраструктури та використання телеметрії й кіберфізичних підходів у системах контролю мереж.

У другому розділі сформовано вимоги до структури та функціонування кіберфізичної системи контролю, розроблено її структурну схему, розглянуто організацію підсистеми фізичних вимірювань на основі «темних» оптичних волокон, побудову телеметричного контуру збору параметрів активного обладнання, модель інтеграції даних у єдиному середовищі подій і метрик та логіку функціонування системи за циклом «вимірювання - передавання - накопичення - аналіз - рішення - дія».

У третьому розділі розроблено модель подання стану волоконно-оптичної інфраструктури в цифровому середовищі, метод кореляції фізичних вимірювань і телеметричних даних, алгоритм виявлення аномалій та локалізації проблемних ділянок, метод підтримки прийняття експлуатаційних рішень, а також підхід до оцінювання ефективності функціонування системи контролю.

У четвертому розділі реалізовано програмно-аналітичну частину системи контролю, виконано налаштування середовища, розроблено модулі приймання та передавання даних, сховище подій, параметрів і результатів моніторингу, аналітичний модуль виявлення відхилень і формування сповіщень, забезпечено інтеграцію з операторським середовищем та NMS/OSS, а також наведено приклад функціонування системи в типовому експлуатаційному сценарії.

У висновках узагальнено результати роботи та підведено підсумки щодо досягнення поставленої мети й розв'язання визначених завдань.

ЗМІСТ

Список скорочень і умовних позначень	5
Вступ.....	6
1 Теоретичні основи досліджуваної проблеми	9
1.1 Роль та особливості функціонування опорних оптичних телекомунікаційних мереж	9
1.2 Фактори впливу на технічний стан волоконно-оптичних ліній зв'язку	11
1.3 Методи та засоби моніторингу стану оптичних ліній зв'язку.....	15
1.4 Використання телеметрії та кіберфізичних підходів у системах моніторингу телекомунікаційних мереж.....	19
1.5 Постановка задачі розроблення кіберфізичної системи контролю опорної оптичної мережі з використанням «темних» волокон	21
2 Методи та архітектурні підходи до побудови кіберфізичних систем контролю опорних оптичних мереж	25
2.1 Аналіз підходів до побудови систем контролю опорних оптичних мереж ...	25
2.2 Аналіз методів фізичного моніторингу волоконно-оптичних ліній	27
2.3 Аналіз телеметричних підходів до контролю стану мережевого обладнання ..	30
2.4 Підходи до інтеграції різнорідних даних у кіберфізичних системах контролю	33
2.5 Обґрунтування вибору архітектури кіберфізичної системи контролю	35
2.6 Формування узагальненої моделі функціонування системи контролю.....	38
2.7 Висновки до розділу 2	40
3 Моделі, методи та алгоритми оброблення даних у системі контролю.....	43
3.1 Модель подання стану волоконно-оптичної інфраструктури в цифровому середовищі	43
3.2 Метод кореляції фізичних вимірювань і телеметричних даних	46
3.3 Алгоритм виявлення аномалій та локалізації проблемних ділянок	49

3.4	Метод підтримки прийняття експлуатаційних рішень за результатами моніторингу.....	52
3.5	Оцінювання ефективності функціонування системи контролю.....	56
3.6	Постановка задачі практичної реалізації програмно-аналітичного модуля..	59
3.7	Висновки до розділу 3	62
4	Практична реалізація та налаштування системи контролю	65
4.1	Вибір засобів реалізації програмно-аналітичної частини системи	65
4.2	Реалізація модуля збору та передавання даних	67
4.3	Реалізація сховища подій, параметрів і результатів моніторингу	70
4.4	Реалізація аналітичного модуля виявлення відхилень і формування сповіщень	73
4.5	Інтеграція системи з операторським середовищем та nms/oss	77
4.6	Приклад функціонування системи в типовому експлуатаційному сценарії .	80
4.7	Висновки до розділу 4	82
	Висновки	84
	Перелік джерел посилань	86
	Додаток А Публікація тези	97
	Додаток Б Презентація.....	99

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ І УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- КФС – кіберфізична система
- ТМ – телеметрія мережі
- SDN – Software-Defined Networking, програмно-керована мережа
- OTDR – Optical Time-Domain Reflectometer, оптична рефлектометрія у часовій області
- DAS – Distributed Acoustic Sensing, розподілене акустичне зондування
- QoS – Quality of Service, якість обслуговування
- DWDM – Dense Wavelength Division Multiplexing, щільне спектральне ущільнення каналів
- NMS – Network Management System, система керування мережею
- OSS – Operations Support System, система підтримки експлуатації
- IP – Internet Protocol, міжмережевий протокол
- API – Application Programming Interface, програмний інтерфейс застосування
- БД – база даних
- ПЗ – програмне забезпечення
- ПП – програмний продукт
- ІТС – інформаційно-телекомунікаційна система
- ЛЗ – лінія зв'язку
- ВОК – волоконно-оптичний кабель
- РЧ – реальний час
- ЦД – цифровий двійник

ВСТУП

Опорні оптичні телекомунікаційні мережі традиційно експлуатуються з використанням засобів моніторингу, які орієнтовані переважно на активне мережеве обладнання. При цьому фізичний стан волоконно-оптичної інфраструктури часто контролюється епізодично або за допомогою окремих вимірювальних процедур. Такі підходи залишаються поширеними, однак сучасні вимоги до надійності та безперервності функціонування мереж вимагають постійного контролю як логічного, так і фізичного рівнів.

У процесі експлуатації опорних мереж можуть виникати приховані пошкодження волокон, деградація сигналу, несанкціоновані втручання або зовнішні впливи, які не завжди фіксуються стандартними засобами моніторингу. Наприклад, механічні навантаження на кабель або локальні дефекти можуть призводити до поступового погіршення параметрів передачі, що ускладнює своєчасне виявлення проблем і впливає на якість надання послуг. Це формує потребу в удосконаленні підходів до контролю стану мережі та впровадженні додаткових механізмів спостереження.

Перспективним напрямом є використання кіберфізичних систем контролю, які поєднують фізичні вимірювання та цифрову обробку даних. Зокрема, застосування «темних» оптичних волокон як сенсорного середовища дозволяє здійснювати безперервний моніторинг стану волоконно-оптичної інфраструктури без впливу на передавання трафіку. Поєднання таких вимірювань із телеметричними даними мережевого обладнання забезпечує формування цілісного уявлення про стан мережі.

Розширення масштабів оптичних мереж і зростання вимог до їх відмовостійкості підкреслює необхідність створення інтегрованих систем контролю, які здатні не лише фіксувати події, але й виконувати їх аналітичну обробку, виявляти аномалії та підтримувати прийняття експлуатаційних рішень. Використання кіберфізичного підходу дозволяє сформувати замкнений контур

оброблення інформації, у межах якого фізичні процеси в мережі безпосередньо впливають на цифрові механізми аналізу.

Актуальність роботи полягає в розробленні кіберфізичної системи контролю опорної оптичної телекомунікаційної мережі з використанням «темних» оптичних волокон, яка забезпечує підвищення ефективності виявлення відхилень і покращення якості експлуатаційного управління.

Метою кваліфікаційної роботи магістра є підвищення ефективності контролю технічного стану опорної оптичної телекомунікаційної мережі шляхом розроблення кіберфізичної системи, що інтегрує фізичні вимірювання, телеметричні дані та аналітичні механізми оброблення інформації.

Поставлена мета досягається розв'язанням таких основних завдань:

- проаналізувати особливості функціонування опорних оптичних телекомунікаційних мереж та існуючі підходи до їх моніторингу;
- розробити структуру кіберфізичної системи контролю з використанням «темних» оптичних волокон;
- сформулювати модель інтеграції фізичних вимірювань і телеметричних даних у єдиному інформаційному середовищі;
- реалізувати програмно-аналітичну частину системи контролю;
- здійснити оцінювання ефективності функціонування запропонованого рішення.

Об'єктом роботи є процес контролю технічного стану опорної оптичної телекомунікаційної мережі.

Предметом роботи є методи, моделі та програмні засоби побудови кіберфізичної системи контролю з використанням «темних» оптичних волокон.

Наукова новизна отриманих результатів:

- запропоновано підхід до побудови кіберфізичної системи контролю опорної мережі з використанням «темних» оптичних волокон як незалежного сенсорного контуру;
- удосконалено метод інтеграції фізичних вимірювань і телеметричних даних у єдиному аналітичному середовищі;

– дістали подальшого розвитку алгоритми виявлення аномалій та локалізації пошкоджень у волоконно-оптичній інфраструктурі.

Практична значимість отриманих результатів полягає в розробленні програмно-аналітичної частини системи контролю, яка забезпечує збір, оброблення та аналіз даних про стан мережі, формування сповіщень та підтримку прийняття експлуатаційних рішень.

Для розв'язання поставлених завдань використано методи системного аналізу, моделювання телекомунікаційних процесів, оброблення та кореляції даних, а також методи програмної реалізації серверних систем і аналітичних модулів.

За темою кваліфікаційної роботи опубліковано одну публікацію [81] у Збірнику наукових праць за матеріалами XIX Всеукраїнська науково-практична web конференція аспірантів, студентів та молодих вчених комп'ютерні інтелектуальні системи та мережі. (Кривий ріг – 2026. – С. 285 - 288).

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖУВАНОЇ ПРОБЛЕМИ

1.1 Роль та особливості функціонування опорних оптичних телекомунікаційних мереж

Опорні оптичні телекомунікаційні мережі формують основу сучасної інформаційно-комунікаційної інфраструктури, забезпечуючи передавання значних обсягів даних між регіональними вузлами зв'язку, центрами обробки даних, мобільними мережами доступу та міжнародними каналами обміну інформацією. Саме транспортний рівень мережі визначає можливість стабільного функціонування цифрових сервісів, електронного урядування, корпоративних інформаційних систем і хмарних платформ. У процесі розвитку телекомунікацій відбулося суттєве зростання вимог до пропускнуої здатності, затримок передачі даних і відмовостійкості інфраструктури, що зумовило широке впровадження волоконно-оптичних технологій як базового середовища передачі інформації [10, 36].

Опорна мережа виконує функцію агрегування та транспортування трафіку між великомасштабними сегментами мереж доступу. На відміну від локальних або абонентських ділянок, вона характеризується значною протяжністю ліній, складною топологічною структурою та високою концентрацією інформаційних потоків. Порушення роботи навіть окремої ділянки магістрального оптичного тракту може призводити до деградації сервісів на значних територіях, що підвищує вимоги до контролю технічного стану інфраструктури та оперативності реагування на відхилення параметрів функціонування [17, 18].

Функціонування опорних оптичних мереж базується на використанні високошвидкісних систем спектрального ущільнення каналів, програмно-керованих транспортних платформ і автоматизованих засобів маршрутизації трафіку. Сучасні архітектури передбачають інтеграцію технологій SDN та мережевої телеметрії, що дозволяє централізовано керувати ресурсами мережі та адаптувати параметри передачі відповідно до поточного навантаження. Водночас ефективність таких підходів значною мірою залежить від достовірності інформації

про фізичний стан лінійної інфраструктури, оскільки деградація оптичного середовища безпосередньо впливає на якість передачі сигналу [9, 15].

Особливістю експлуатації магістральних волоконно-оптичних ліній є їх розміщення у складних умовах навколишнього середовища. Кабельні траси прокладаються у ґрунті, кабельній каналізації, вздовж автомобільних шляхів, мостових переходів або промислових територій. У таких умовах на оптичне волокно впливають температурні коливання, механічні навантаження, зміни вологості, вібрації та техногенні фактори. Навіть незначні фізичні зміни можуть викликати збільшення загасання або появу додаткових відбиттів сигналу, що поступово знижує запас за якістю передачі та створює передумови для виникнення аварійних ситуацій [24, 31].

Важливою характеристикою опорних мереж є їх безперервний режим роботи. На відміну від окремих інформаційних систем, зупинка транспортної мережі практично не допускається, оскільки вона забезпечує функціонування великої кількості залежних сервісів. Унаслідок цього експлуатаційні підрозділи операторів зв'язку змушені підтримувати постійний контроль параметрів обладнання, каналів передачі та фізичного стану кабельної інфраструктури. Традиційні методи обслуговування, що базуються на періодичних перевірках або реагуванні після виникнення пошкоджень, поступово втрачають ефективність у мережах великої протяжності та складності [25, 36].

Окремою особливістю сучасних транспортних мереж є наявність резервних або незадіяних оптичних волокон, які можуть використовуватися для технологічних задач контролю інфраструктури. Використання таких ресурсів дозволяє здійснювати вимірювання параметрів лінії без впливу на передавання користувацького трафіку. Це створює передумови для організації безперервного моніторингу стану кабельної траси, локалізації аномалій та накопичення статистичних даних щодо зміни характеристик оптичного середовища в часі [45, 46].

Розвиток телеметричних технологій і засобів інтелектуального аналізу даних сприяв переходу від ізольованих систем контролю до інтегрованих платформ

управління мережею. У сучасних умовах ефективна експлуатація опорної інфраструктури передбачає поєднання фізичних вимірювань параметрів волокна з програмними засобами оброблення інформації, прогнозування відмов і підтримки прийняття експлуатаційних рішень. Такий підхід відповідає концепції кіберфізичних систем, у межах яких фізичні процеси мережевого середовища взаємодіють із цифровими моделями та автоматизованими механізмами керування [14, 17].

У підсумку особливості функціонування опорних оптичних телекомунікаційних мереж визначають необхідність впровадження сучасних підходів до контролю технічного стану інфраструктури, здатних забезпечувати безперервний моніторинг, раннє виявлення деградаційних процесів і підвищення стійкості транспортної мережі до зовнішніх впливів. Це створює обґрунтовані передумови для розгляду застосування кіберфізичних систем моніторингу, що становить одну з ключових задач, розв'язання яких розглядається у межах даної роботи.

1.2 Фактори впливу на технічний стан волоконно-оптичних ліній зв'язку

Надійність функціонування опорних оптичних телекомунікаційних мереж безпосередньо залежить від технічного стану волоконно-оптичних ліній зв'язку, які виступають основним середовищем передавання інформації на значні відстані. Незважаючи на високі експлуатаційні характеристики оптичного волокна, у реальних умовах його параметри змінюються під впливом зовнішніх і внутрішніх факторів, що можуть спричиняти як поступове погіршення характеристик передачі сигналу, так і раптові відмови мережевої інфраструктури. Контроль таких процесів є важливою складовою забезпечення стабільності транспортних телекомунікаційних систем [24, 25].

До основних факторів, що впливають на технічний стан волоконно-оптичних ліній, належать механічні навантаження, які виникають під час експлуатації кабельних трас. Зовнішній тиск ґрунту, просідання поверхні, транспортні

навантаження або проведення будівельних робіт можуть спричиняти деформації кабелю та появу мікрозгинань оптичного волокна. Такі зміни часто не призводять до негайного пошкодження лінії, однак викликають збільшення загасання сигналу та поступове зниження запасу енергетичного балансу каналу передачі [31, 40].

Суттєвий вплив на параметри волоконно-оптичних ліній мають температурні фактори. Добові та сезонні коливання температури викликають теплове розширення матеріалів кабельної конструкції, зміну механічного натягу волокна та варіації показника заломлення середовища (рисунок 1.1). Особливо помітними такі процеси стають на протяжних ділянках мережі або в умовах прокладання кабелів у відкритому середовищі. Температурні градієнти здатні змінювати характеристики поширення сигналу, що проявляється у вигляді додаткових втрат або нестабільності параметрів передачі [22, 23].



Рисунок 1.1 – Приклад пошкодження волоконно-оптичної лінії під час проведення земляних робіт

Окрему групу становлять вібраційні та акустичні впливи, пов'язані з рухом транспорту, роботою промислового обладнання або природними явищами.

Коливання ґрунту можуть передаватися кабельній інфраструктурі та викликати короточасні зміни стану волокна (рисунок 1.2). У сучасних умовах подібні ефекти розглядаються не лише як фактор ризику пошкодження, але й як джерело інформації для систем розподіленого акустичного моніторингу, які дозволяють реєструвати події вздовж траси прокладання кабелю [19, 33].

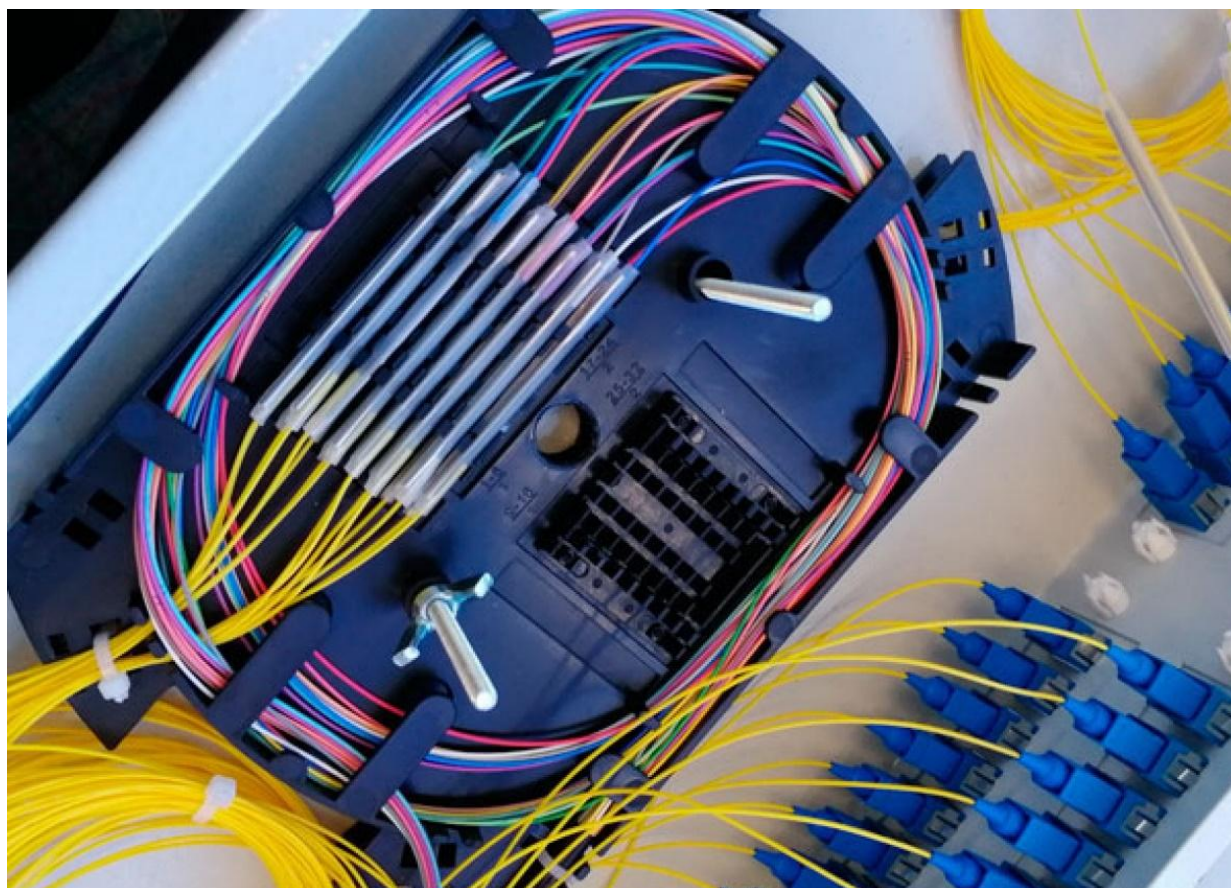


Рисунок 1.2 - Приклад прокладання волоконно-оптичної лінії зв'язку в умовах експлуатації

Важливим чинником деградації є вплив навколишнього середовища, зокрема підвищена вологість, корозійні процеси елементів кабельної конструкції та порушення герметичності захисних оболонок. Потрапляння вологи всередину кабелю здатне призводити до довготривалого погіршення механічних властивостей матеріалів і збільшення втрат сигналу. Подібні процеси зазвичай мають накопичувальний характер і можуть залишатися непомітними протягом тривалого часу до моменту виникнення суттєвих експлуатаційних проблем [25, 31].

Значну небезпеку для телекомунікаційної інфраструктури становлять антропогенні фактори, серед яких найбільш поширеними є несанкціоновані земляні роботи, пошкодження кабельної каналізації або навмисне втручання в інфраструктуру зв'язку. Практика експлуатації магістральних мереж показує, що саме людський фактор залишається однією з основних причин аварій волоконно-оптичних ліній. У таких випадках швидкість локалізації пошкодження безпосередньо визначає тривалість відновлення роботи мережі та масштаби впливу на користувацькі сервіси [79, 80].

Крім зовнішніх впливів, технічний стан лінії визначається також внутрішніми технологічними факторами, пов'язаними з якістю монтажу та експлуатації мережі. До них належать втрати у зварних з'єднаннях, деградація оптичних конекторів, старіння матеріалів кабелю та накопичення дефектів у місцях з'єднання сегментів тракту. Навіть незначні відхилення параметрів у вузлових точках можуть поступово призводити до зниження якості передачі сигналу або обмеження можливості використання високошвидкісних форматів модуляції [9, 36].

З урахуванням великої протяжності опорних мереж і складності умов їх експлуатації більшість перелічених факторів проявляється у динаміці часу, що ускладнює їх своєчасне виявлення традиційними методами контролю. Періодичні вимірювання не завжди дозволяють зафіксувати початкові стадії деградаційних процесів, унаслідок чого несправності часто виявляються вже після суттєвого погіршення параметрів каналу. Це обумовлює необхідність застосування безперервного моніторингу та використання інтелектуальних систем аналізу стану волоконно-оптичної інфраструктури [15, 45].

У підсумку сукупний вплив механічних, кліматичних, технологічних і антропогенних факторів формує складну багатофакторну модель зміни характеристик волоконно-оптичних ліній зв'язку. Забезпечення стабільної роботи транспортних телекомунікаційних мереж потребує застосування підходів, здатних здійснювати постійне спостереження за фізичним станом кабельної траси, локалізацію потенційно небезпечних ділянок і прогнозування можливих відмов,

що створює передумови для подальшого розгляду сучасних методів моніторингу оптичної інфраструктури.

1.3 Методи та засоби моніторингу стану оптичних ліній зв'язку

Ефективна експлуатація опорних волоконно-оптичних ліній зв'язку неможлива без застосування спеціалізованих засобів контролю, призначених для оцінювання технічного стану кабельної інфраструктури та параметрів передачі сигналу. Зі збільшенням протяжності транспортних мереж і зростанням обсягів передаваного трафіку вимоги до систем моніторингу істотно підвищилися, оскільки своєчасне виявлення дефектів дозволяє запобігати аварійним ситуаціям і мінімізувати перерви у наданні телекомунікаційних послуг. Сучасні підходи до контролю оптичних ліній поєднують вимірювальні технології фізичного рівня, системи мережевої телеметрії та програмні засоби аналізу отриманих даних [9, 10].

Одним із найбільш поширених методів діагностики волоконно-оптичних ліній є оптична рефлектометрія у часовій області (OTDR) (рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 – Прилад для проведення вимірювань параметрів волоконно-оптичної лінії зв'язку

Принцип її роботи ґрунтується на аналізі зворотно розсіяного та відбитого оптичного сигналу, що дозволяє визначати загасання волокна, локалізувати місця зварних з'єднань, конекторів або пошкоджень кабелю. Використання рефлектометричних вимірювань забезпечує можливість визначення координат дефектів із достатньо високою точністю навіть на значних відстанях. Водночас класичні OTDR-вимірювання зазвичай виконуються періодично, що обмежує можливість оперативного виявлення швидкоплинних або поступових змін параметрів лінії [25, 26] (рисунок 1.4).

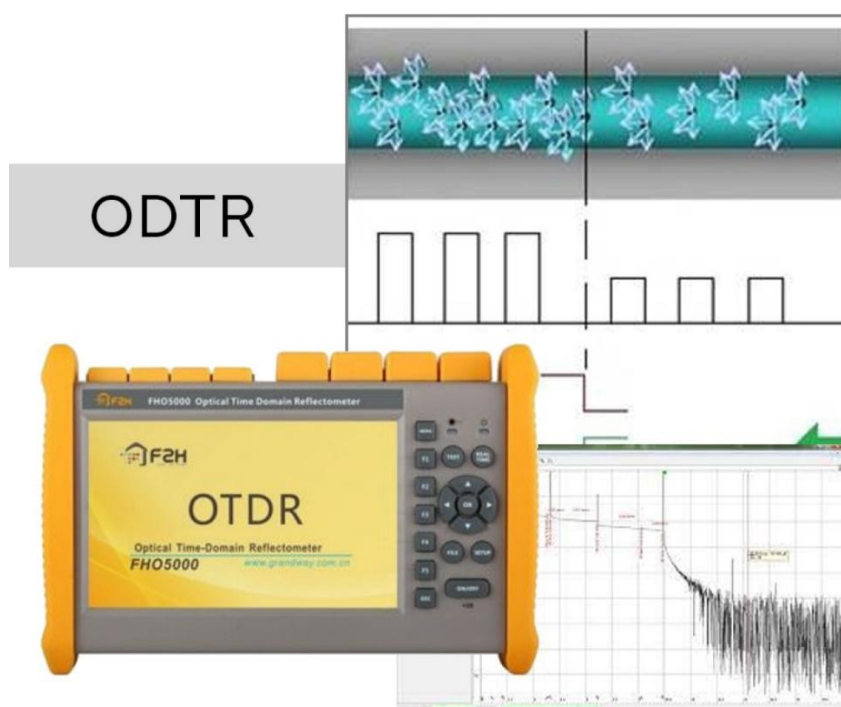


Рисунок 1.4 – Принцип контролю волоконно-оптичної лінії методом рефлектометрії

Подальший розвиток отримали фазочутливі методи рефлектометрії (ф-OTDR), які дозволяють реєструвати зміни фазових характеристик розсіяного сигналу вздовж волокна. Такі системи забезпечують значно вищу чутливість до механічних впливів і здатні фіксувати вібрації, переміщення ґрунту або зовнішні втручання в безпосередній близькості до кабельної траси. Завдяки цьому оптичне волокно може використовуватися як розподілений сенсор великої протяжності, що

відкриває можливість створення систем раннього попередження про потенційні пошкодження інфраструктури [13, 40].

Окремий напрям розвитку становлять технології розподіленого акустичного зондування (Distributed Acoustic Sensing - DAS) (рисунок 1.5), у яких волоконно-оптична лінія використовується як безперервний датчик подій уздовж усієї траси прокладання.



Рисунок 1.5 – Конвертор DAS [19]

Такі системи дозволяють виявляти рух транспорту, земляні роботи, спроби несанкціонованого доступу або інші зовнішні впливи на інфраструктуру. Практичне застосування DAS підтверджує можливість використання існуючих телекомунікаційних кабелів для задач моніторингу інженерних споруд, транспортних коридорів і критичної інфраструктури без встановлення додаткових сенсорних пристроїв [19, 33].

Поряд із фізичними методами вимірювання значного розвитку набули системи експлуатаційного моніторингу мережевого обладнання, що базуються на зборі телеметричних даних у режимі реального часу. Сучасні транспортні платформи підтримують потокову передачу параметрів функціонування каналів зв'язку, включаючи рівень оптичної потужності, показники помилок, запас за якістю сигналу та характеристики роботи активного обладнання. Використання мережевої телеметрії дозволяє оцінювати стан оптичного каналу без прямого втручання у фізичну структуру лінії та забезпечує інтеграцію отриманої інформації у системи централізованого управління мережею [1, 15].

Важливим напрямом розвитку систем контролю є застосування безперервного моніторингу із використанням резервних або незадіяних оптичних волокон. Так звані «темні» волокна можуть використовуватися для постійного виконання вимірювань без впливу на передавання користувацького трафіку. Це дозволяє організувати довготривале спостереження за змінами параметрів лінії, накопичувати історичні дані та аналізувати тенденції деградації інфраструктури. Подібний підхід створює основу для переходу від реактивного усунення несправностей до прогнозованого технічного обслуговування мережі [45, 46].

Попри значну ефективність існуючих засобів контролю, більшість із них функціонує як окремі інструменти, орієнтовані на вирішення вузьких експлуатаційних задач. Рефлектометричні системи забезпечують точну локалізацію дефектів, однак не завжди інтегруються із системами управління мережею. Телеметричні платформи дозволяють аналізувати параметри передачі сигналу, проте мають обмежені можливості щодо оцінювання фізичних впливів на кабельну трасу. Відсутність єдиного середовища збору та оброблення інформації ускладнює формування комплексної картини стану інфраструктури та своєчасне прийняття експлуатаційних рішень [9, 14].

Сучасні тенденції розвитку телекомунікацій передбачають інтеграцію вимірювальних технологій із програмними платформами аналізу даних, цифровими моделями мережі та автоматизованими системами управління. Поєднання фізичних сенсорних методів контролю з телеметрією та

інтелектуальною обробкою інформації дозволяє підвищити точність діагностики, скоротити час локалізації пошкоджень і забезпечити прогнозування технічного стану волоконно-оптичних ліній. Саме така інтеграція створює передумови для застосування кіберфізичних систем моніторингу транспортної інфраструктури, розгляд яких є логічним продовженням подальшого аналізу [14, 17].

1.4 Використання телеметрії та кіберфізичних підходів у системах моніторингу телекомунікаційних мереж

Подальший розвиток телекомунікаційних мереж супроводжується суттєвим зростанням складності їх архітектури, обсягів передаваних даних і кількості взаємопов'язаних мережевих елементів. За таких умов традиційні підходи до експлуатаційного контролю, що базуються на періодичному зборі статистики або локальних вимірюваннях, поступово втрачають ефективність. Забезпечення стабільної роботи транспортної інфраструктури потребує безперервного отримання інформації про стан як активного обладнання, так і фізичного середовища передачі сигналу. Саме тому вагомого значення набуває використання мережевої телеметрії та кіберфізичних підходів до організації систем моніторингу [9, 15].

Телеметрія у сучасних телекомунікаційних мережах розглядається як процес автоматизованого збору, передачі та аналізу параметрів функціонування мережевих компонентів у режимі, близькому до реального часу. На відміну від традиційних механізмів опитування обладнання, сучасна потокова телеметрія забезпечує безперервну передачу даних про стан мережі без значного навантаження на керуючі канали. До таких параметрів належать рівні оптичної потужності, показники помилок передачі, затримки сигналу, використання ресурсів мережевих вузлів і характеристики роботи транспортних каналів. Накопичення подібної інформації створює основу для оперативного аналізу стану мережі та виявлення відхилень у її роботі [1, 10].

Значний розвиток телеметричних технологій пов'язаний із впровадженням програмно-керованих мереж (SDN), у яких функції керування відокремлюються від фізичної інфраструктури. Централізовані контролери отримують можливість аналізувати параметри функціонування мережі в масштабі всієї транспортної системи та адаптувати її конфігурацію відповідно до поточних умов експлуатації. Використання потокової телеметрії у поєднанні з SDN-підходами дозволяє формувати замкнені цикли управління, у межах яких виявлення відхилень автоматично супроводжується прийняттям коригувальних рішень [10, 36].

Разом із розвитком телеметрії активно формується напрям застосування кіберфізичних систем у телекомунікаційній галузі. Кіберфізична система передбачає інтеграцію фізичних процесів із цифровими засобами спостереження, оброблення даних і керування. У контексті телекомунікаційних мереж це означає поєднання сенсорних методів контролю оптичної інфраструктури, каналів передачі телеметричних даних, програмних платформ аналізу та моделей стану мережі в єдиному інформаційному середовищі [14, 17].

Однією з ключових переваг кіберфізичного підходу є можливість формування цифрового представлення інфраструктури, яке відображає її поточний технічний стан. Використання цифрових моделей або так званих цифрових двійників дозволяє аналізувати поведінку мережі за різних умов експлуатації, прогнозувати розвиток деградаційних процесів і оцінювати наслідки потенційних відмов ще до їх фактичного виникнення. Поєднання телеметричних даних із такими моделями значно підвищує точність прийняття експлуатаційних рішень і дозволяє переходити до проактивного управління інфраструктурою [17, 18].

Особливу роль у кіберфізичних системах моніторингу відіграє інтеграція інформації з різних джерел спостереження. Дані рефлектометричних вимірювань, систем розподіленого акустичного зондування, параметри роботи мережевого обладнання та експлуатаційна статистика можуть об'єднуватися у межах єдиної аналітичної платформи. Такий підхід забезпечує комплексне оцінювання стану мережі, дозволяючи встановлювати взаємозв'язки між фізичними подіями на кабельній трасі та змінами характеристик передачі сигналу [9, 45].

Використання телеметрії також створює передумови для застосування методів інтелектуального аналізу даних і машинного навчання у задачах експлуатації телекомунікаційних систем. Аналіз накопичених параметрів дозволяє виявляти приховані закономірності зміни характеристик оптичних ліній, автоматично визначати аномальні режими роботи та прогнозувати ймовірність виникнення відмов. Подібні підходи поступово стають основою автоматизованих систем управління мережею нового покоління [11, 14].

Попри значні переваги телеметричних і кіберфізичних рішень, їх впровадження супроводжується рядом технічних викликів. До них належать необхідність оброблення великих обсягів даних, забезпечення синхронізації інформації з різних джерел, масштабованість програмних платформ та вимоги до інформаційної безпеки мережевої інфраструктури [32, 36].

У результаті застосування телеметрії у поєднанні з кіберфізичними підходами формується нова концепція експлуатації телекомунікаційних мереж, орієнтована на безперервне спостереження, аналіз стану інфраструктури та автоматизоване реагування на відхилення параметрів функціонування. Такий підхід створює основу для побудови інтегрованих систем контролю опорних оптичних мереж, здатних забезпечувати підвищення надійності транспортної інфраструктури та ефективно управління її ресурсами в умовах зростаючих навантажень і складності мережевого середовища.

1.5 Постановка задачі розроблення кіберфізичної системи контролю опорної оптичної мережі з використанням «темних» волокон

Проведений аналіз особливостей функціонування опорних оптичних телекомунікаційних мереж, факторів впливу на технічний стан волоконно-оптичних ліній зв'язку та сучасних методів їх моніторингу показує, що забезпечення стабільної роботи транспортної інфраструктури безпосередньо залежить від можливості своєчасного виявлення деградаційних процесів і зовнішніх впливів на кабельні траси. Зростання обсягів передавання даних,

підвищення вимог до безперервності надання послуг і збільшення протяжності мереж ускладнюють експлуатаційний контроль традиційними засобами, які переважно орієнтовані на локальні вимірювання або реагування після виникнення несправностей [9, 36].

Існуючі системи контролю оптичної інфраструктури, зокрема рефлектометричні комплекси та засоби експлуатаційного моніторингу мережевого обладнання, забезпечують отримання важливої інформації про стан окремих ділянок мережі. Разом із тим їх використання часто має фрагментарний характер. Фізичний контроль волоконно-оптичної лінії, аналіз параметрів передачі сигналу та управління мережею реалізуються у різних підсистемах, що ускладнює формування цілісної картини технічного стану інфраструктури. Унаслідок цього процес прийняття експлуатаційних рішень значною мірою залежить від ручного аналізу даних і досвіду технічного персоналу [14, 15].

Додатковою проблемою є обмежені можливості безперервного спостереження за фізичним станом кабельної траси. Періодичні вимірювання дозволяють локалізувати вже сформовані дефекти, однак не завжди забезпечують фіксацію початкових стадій деградації або короткочасних зовнішніх впливів. За умов складного середовища прокладання магістральних ліній це може призводити до раптових аварій або зниження якості передачі сигналу без попередніх ознак у системах експлуатаційного контролю [24, 25].

Перспективним напрямом підвищення ефективності моніторингу є використання резервних або незадіяних оптичних волокон, які присутні у більшості магістральних кабельних систем. Так звані «темні» волокна можуть застосовуватися для виконання безперервних вимірювань параметрів лінії без впливу на передавання користувачького трафіку. Використання такого ресурсу дозволяє реалізувати постійне спостереження за станом інфраструктури, здійснювати локалізацію подій уздовж траси та накопичувати історичні дані щодо зміни характеристик волокна у часі [45, 46].

Разом із розвитком телеметричних технологій з'являється можливість інтеграції результатів фізичних вимірювань із програмними платформами аналізу

даних і централізованими системами управління мережею. Поєднання сенсорних методів контролю, каналів передачі телеметричної інформації та аналітичних механізмів оброблення даних відповідає концепції кіберфізичних систем, у межах яких фізичні процеси інфраструктури взаємодіють із цифровими компонентами спостереження та керування [14, 17].

З огляду на виявлені обмеження існуючих підходів виникає необхідність створення інтегрованої системи контролю, здатної забезпечувати безперервний моніторинг технічного стану опорної оптичної мережі, автоматизований збір і оброблення даних, а також підтримку прийняття експлуатаційних рішень. Реалізація такої системи передбачає використання кіберфізичного підходу із залученням «темних» волокон як розподіленого сенсорного середовища.

У межах поставленої задачі передбачається виконання комплексного аналізу існуючих підходів до контролю волоконно-оптичних ліній зв'язку, формування структурної моделі кіберфізичної системи моніторингу та визначення складу її основних функціональних компонентів із урахуванням принципів їх взаємодії. Особлива увага приділяється організації процесів збору, передавання й оброблення телеметричних даних, а також обґрунтуванню доцільності використання «темних» оптичних волокон як сенсорного середовища безперервного контролю технічного стану мережевої інфраструктури. Отримані результати створюють передумови для подальшого переходу до етапу проектування та розроблення архітектури кіберфізичної системи контролю опорної оптичної мережі, що розглядається у наступному розділі роботи.

Запропонована постановка задачі формує основу для подальшого розроблення моделі та архітектури кіберфізичної системи контролю опорної оптичної мережі. У межах подальшої роботи передбачається виконання аналізу існуючих підходів до контролю волоконно-оптичних ліній зв'язку, формування структурної моделі системи моніторингу та визначення складу її функціональних компонентів із урахуванням принципів їх взаємодії. Особлива увага приділяється організації процесів збору, передавання та оброблення телеметричних даних, а також обґрунтуванню використання «темних» оптичних волокон як елемента

сенсорної підсистеми контролю. Реалізація зазначених положень забезпечує перехід до етапу проектування кіберфізичної системи, що розглядається у наступному розділі роботи.

Важливим аспектом під час розроблення кіберфізичної системи контролю є забезпечення взаємодії між фізичним рівнем вимірювань і програмними засобами аналітичної обробки інформації. У сучасних телекомунікаційних мережах обсяги телеметричних даних постійно зростають, що потребує застосування централізованих механізмів їх накопичення, оброблення та інтерпретації. Використання автоматизованих алгоритмів аналізу дозволяє не лише фіксувати поточний стан волоконно-оптичної лінії, але й визначати тенденції зміни параметрів у часі, що створює можливість прогнозування потенційних відмов і планування профілактичного обслуговування мережевої інфраструктури [11, 14].

Окремої уваги потребує питання інтеграції систем фізичного моніторингу з існуючими платформами управління телекомунікаційними мережами оператора зв'язку. Поєднання даних, отриманих із сенсорних підсистем на основі оптичного волокна, із параметрами роботи активного мережевого обладнання дозволяє сформулювати комплексне уявлення про стан транспортної мережі. Такий підхід сприяє підвищенню оперативності реагування на аварійні ситуації, зменшенню часу локалізації пошкоджень та оптимізації експлуатаційних процесів за рахунок використання єдиного інформаційного середовища управління [9, 15].

Крім цього, застосування кіберфізичної моделі контролю створює передумови для подальшого розвитку інтелектуальних систем експлуатації телекомунікаційної інфраструктури, у яких процеси моніторингу, аналізу та прийняття рішень частково автоматизуються.

2 МЕТОДИ ТА АРХІТЕКТУРНІ ПІДХОДИ ДО ПОБУДОВИ КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ОПОРНИХ ОПТИЧНИХ МЕРЕЖ

2.1 Аналіз підходів до побудови систем контролю опорних оптичних мереж

Сучасні опорні оптичні телекомунікаційні мережі формують основу інформаційної інфраструктури та забезпечують передавання значних обсягів даних між регіональними сегментами, центрами обробки інформації та вузлами доступу. Їх функціонування характеризується високими вимогами до надійності, пропускну здатності та безперервності роботи. У зв'язку з цим контроль технічного стану мережі набуває особливого значення, оскільки навіть незначні відхилення можуть призводити до деградації якості послуг або повної втрати зв'язку на окремих ділянках.

Традиційно системи контролю в телекомунікаційних мережах будуються на основі централізованого підходу, при якому інформація про стан мережевих елементів збирається у єдиному центрі управління. У таких системах застосовуються засоби опитування обладнання, журнали подій, а також інструменти візуалізації стану мережі. Централізація забезпечує узгодженість даних і зручність адміністрування, однак у випадку масштабних мереж виникають проблеми, пов'язані з перевантаженням каналів передачі службової інформації та збільшенням затримок під час оброблення даних.

Розвиток мережевих технологій та зростання обсягів трафіку призвели до появи розподілених підходів до організації контролю. У межах таких підходів частина функцій аналізу переноситься ближче до джерела даних, тобто до мережевих вузлів або проміжних елементів інфраструктури. Це дозволяє оперативніше виявляти відхилення та зменшувати навантаження на центральні системи. Разом із тим виникає проблема узгодження результатів аналізу, оскільки різні вузли можуть використовувати різні алгоритми або часові інтервали оброблення даних.

Подальший розвиток отримали підходи, орієнтовані на потокову телеметрію, які передбачають безперервне передавання параметрів функціонування мережевого обладнання у режимі, наближеному до реального часу. На відміну від класичних методів опитування, потокова телеметрія забезпечує більш високу частоту оновлення даних і дозволяє отримувати детальні часові ряди параметрів. Це створює передумови для застосування аналітичних методів, зокрема для виявлення аномалій та прогнозування стану мережі.

Незважаючи на переваги телеметричних підходів, вони здебільшого орієнтовані на логічний рівень мережі, тобто на параметри роботи активного обладнання. Фізичний стан волоконно-оптичних ліній зв'язку при цьому або не враховується, або контролюється окремими засобами, що не інтегровані в єдину систему. Це створює розрив між інформацією про логічний та фізичний рівні мережі, що ускладнює локалізацію проблем і знижує ефективність експлуатації.

У практиці також застосовуються підходи, засновані на періодичному тестуванні ліній зв'язку, зокрема з використанням рефлектометричних методів. Такі методи дозволяють визначати місця пошкоджень або деградації сигналу, однак їх застосування часто пов'язане з необхідністю виведення окремих каналів з експлуатації або виконанням вимірювань у неробочий час. Це обмежує можливість їх використання для безперервного моніторингу.

Окрему групу становлять підходи, що передбачають використання додаткової сенсорної інфраструктури, зокрема встановлення датчиків уздовж ліній зв'язку. Такі рішення дозволяють отримувати інформацію про зовнішні впливи на кабельні траси, однак їх впровадження потребує значних витрат і ускладнює експлуатацію системи.

Аналіз існуючих підходів свідчить про те, що сучасні системи контролю опорних мереж мають фрагментований характер. Окремі рішення забезпечують контроль логічного рівня, інші - фізичного стану інфраструктури, однак відсутність єдиного інтегрованого підходу призводить до втрати частини інформації та ускладнює процес прийняття рішень.

У цих умовах доцільним є застосування кіберфізичного підходу, який передбачає інтеграцію фізичних вимірювань, телеметричних даних та аналітичних механізмів у межах єдиної системи. Такий підхід дозволяє сформувати цілісне уявлення про стан мережі, забезпечити кореляцію подій різної природи та підвищити ефективність експлуатаційного контролю.

У підсумку встановлено, що ефективна система контролю опорної оптичної мережі повинна поєднувати переваги централізованих і розподілених підходів, використовувати потокову телеметрію та доповнювати її інформацією про фізичний стан волоконно-оптичної інфраструктури. Це дозволяє перейти до формування узагальненого підходу до побудови кіберфізичної системи контролю, який розглядається у наступних підрозділах.

Важливим аспектом формування вимог до системи контролю є врахування умов експлуатації опорних мереж, які характеризуються значною протяжністю, складною топологією та різноманітністю використовуваного обладнання. У таких умовах система повинна забезпечувати стабільне функціонування незалежно від змін у структурі мережі, що передбачає гнучкість конфігурації та можливість адаптації до нових джерел даних.

Крім того, визначено необхідність забезпечення сумісності системи з існуючими інфраструктурними рішеннями, зокрема системами управління мережею та моніторингу. Це дозволяє інтегрувати розроблювану систему без суттєвих змін у поточній архітектурі та забезпечує поступове впровадження з мінімальними експлуатаційними ризиками.

2.2 Аналіз методів фізичного моніторингу волоконно-оптичних ліній

Контроль фізичного стану волоконно-оптичних ліній зв'язку є важливою складовою забезпечення надійності функціонування опорних телекомунікаційних мереж. На відміну від логічного рівня, де параметри можуть бути отримані безпосередньо з активного обладнання, фізичний рівень вимагає застосування

спеціалізованих методів вимірювання, здатних виявляти деградацію сигналу, механічні пошкодження або зовнішні впливи на кабельну інфраструктуру.

Найбільш поширеним методом контролю є оптична рефлектометрія, яка дозволяє визначати розподіл втрат уздовж волоконно-оптичної лінії. Принцип роботи такого підходу базується на аналізі відбитого сигналу, що виникає внаслідок неоднорідностей середовища передачі. Це дає змогу локалізувати місця пошкоджень, визначати їх характер і оцінювати ступінь впливу на якість передачі даних. Водночас застосування рефлектометричних методів у класичному вигляді часто обмежується необхідністю переривання передачі або використання окремих тестових волокон.

Подальший розвиток отримали методи розподіленого акустичного моніторингу, які дозволяють використовувати оптичне волокно як сенсорне середовище. У таких системах аналізуються зміни параметрів сигналу, що виникають під впливом механічних коливань або температурних змін. Це дозволяє виявляти сторонні впливи, такі як земляні роботи, вібрації або спроби несанкціонованого доступу до кабельної інфраструктури.

Разом із тим застосування зазначених методів у діючих мережах часто ускладнюється необхідністю інтеграції вимірювального обладнання в існуючу інфраструктуру. У випадку використання робочих волокон виникає ризик впливу на передавання трафіку, що є неприйнятним для опорних мереж із високими вимогами до безперервності роботи.

У зв'язку з цим особливого значення набуває використання «темних» оптичних волокон, які не задіяні в передачі корисного трафіку. Такі волокна можуть бути використані як постійне сенсорне середовище без впливу на експлуатаційні характеристики мережі. Це відкриває можливість реалізації безперервного моніторингу фізичного стану інфраструктури в режимі реального часу.

Використання «темних» волокон дозволяє поєднати переваги рефлектометричних і розподілених сенсорних методів, забезпечуючи як локалізацію пошкоджень, так і виявлення зовнішніх впливів. Крім того, відсутність

необхідності втручання в роботу активних каналів значно спрощує впровадження таких рішень у діючих мережах.

Для узагальнення розглянутих підходів до фізичного моніторингу доцільно представити їх у вигляді структурованої схеми, яка відображає взаємозв'язок між джерелами вимірювань, типами параметрів і результатами аналізу (рисунки 2.1).



Рисунки 2.1 – Класифікація методів фізичного моніторингу волоконно-оптичних ліній (рефлектометричні, розподілені сенсорні, на основі «темних» волокон).

Аналіз методів фізичного моніторингу показує, що найбільш перспективним є підхід, заснований на використанні «темних» оптичних волокон як сенсорного середовища. Він забезпечує безперервність вимірювань, відсутність впливу на передавання трафіку та можливість інтеграції з іншими джерелами даних у межах кіберфізичної системи.

У підсумку встановлено, що ефективний контроль фізичного стану опорної мережі повинен базуватися на поєднанні сучасних методів вимірювання з можливістю їх безперервного застосування. Це створює передумови для інтеграції фізичних вимірювань із телеметричними даними, що розглядається у наступному підрозділі.

У процесі розроблення структурної схеми було враховано необхідність чіткого розмежування функціональних рівнів системи, що дозволяє спростити її подальшу реалізацію та супровід. Виділення окремих підсистем збору, передавання, оброблення та аналізу даних забезпечує модульність і підвищує надійність функціонування всієї системи в цілому.

Також було передбачено можливість масштабування структурної схеми за рахунок додавання нових джерел даних або аналітичних модулів без зміни базових принципів функціонування. Це створює передумови для розвитку системи відповідно до зростання вимог до контролю мережевої інфраструктури.

2.3 Аналіз телеметричних підходів до контролю стану мережевого обладнання

Контроль стану мережевого обладнання є невід'ємною складовою забезпечення стабільного функціонування опорних телекомунікаційних мереж. На відміну від фізичного рівня, де основну роль відіграють параметри волоконно-оптичної інфраструктури, телеметричні підходи орієнтовані на отримання інформації про роботу активних елементів мережі, зокрема маршрутизаторів, комутаторів та серверного обладнання.

Традиційно для збору телеметричних даних використовуються протоколи опитування, які дозволяють періодично отримувати інформацію про стан пристроїв. У межах такого підходу формується набір показників, що характеризують завантаження інтерфейсів, рівень використання ресурсів, наявність помилок і загальний стан обладнання. Перевагою цього підходу є простота реалізації та сумісність із більшістю мережевих пристроїв. Разом із тим періодичний характер опитування обмежує оперативність виявлення відхилень, особливо у випадку короткочасних аномалій.

З розвитком мережевих технологій все більшого поширення набувають підходи, засновані на потоковій телеметрії. У таких системах дані передаються безперервно або з мінімальними затримками, що дозволяє формувати детальні

часові ряди параметрів. Це створює можливість більш точного аналізу стану мережі, виявлення тенденцій і прогнозування можливих відмов. Потокова телеметрія також зменшує навантаження, пов'язане з ініціацією запитів, оскільки передавання даних здійснюється за принципом підписки.

Окрему роль відіграють системи довготривалого моніторингу, які забезпечують накопичення історичних даних і дозволяють аналізувати поведінку мережі в динаміці. Такі системи орієнтовані на побудову графіків змін параметрів, виявлення сезонних або періодичних закономірностей, а також оцінювання ефективності використання ресурсів. Вони є важливим джерелом інформації для планування розвитку мережі та оптимізації її роботи.

Разом із тим телеметричні підходи мають ряд обмежень, пов'язаних із тим, що вони відображають лише логічний рівень функціонування мережі. У випадку виникнення проблем на фізичному рівні, наприклад деградації волокна або зовнішніх впливів, телеметричні показники можуть лише опосередковано сигналізувати про наявність відхилень. Це ускладнює процес локалізації проблем і потребує додаткових джерел інформації.

Крім того, значні обсяги телеметричних даних створюють додаткові вимоги до систем їх оброблення та зберігання. Необхідно забезпечити ефективну агрегацію, фільтрацію та кореляцію даних, щоб уникнути перевантаження аналітичних модулів і забезпечити своєчасне виявлення критичних подій.

Для узагальнення принципів організації телеметричного моніторингу доцільно використати графічне представлення потоків даних, яке відображає взаємодію між джерелами телеметрії, каналами передавання та системами оброблення(рисунок 2.2).



Рисунок 2.2 – Схема телеметричного моніторингу мережевого обладнання (джерела даних, передавання, оброблення, зберігання, візуалізація).

Аналіз телеметричних підходів показує, що найбільш ефективними є рішення, які поєднують потокову передачу даних із можливістю їх довготривалого зберігання та подальшого аналізу. Це дозволяє не лише оперативно реагувати на відхилення, але й формувати аналітичні висновки щодо тенденцій розвитку мережі.

Особливу роль у підсистемі фізичних вимірювань відіграє можливість виявлення не лише явних пошкоджень, але й прихованих змін у стані волоконно-оптичної лінії, які можуть передувати відмовам. Це дозволяє переходити від реактивного до проактивного підходу в обслуговуванні мережі.

Додатково встановлено, що використання «темних» волокон як сенсорного середовища забезпечує незалежність процесу вимірювання від основного трафіку, що виключає вплив системи контролю на якість надання телекомунікаційних послуг.

У підсумку встановлено, що телеметрія є необхідною складовою системи контролю, однак її використання без урахування фізичного рівня не забезпечує повноцінного уявлення про стан мережі. Це обґрунтовує необхідність інтеграції телеметричних і фізичних даних у межах єдиного підходу, що розглядається у наступному підрозділі.

2.4 Підходи до інтеграції різнорідних даних у кіберфізичних системах контролю

У сучасних телекомунікаційних мережах дані про стан інфраструктури формуються з різних джерел, які відрізняються за природою, частотою оновлення та структурою. До таких джерел належать фізичні вимірювання волоконно-оптичних ліній, телеметричні параметри мережевого обладнання, журнали подій, а також зовнішні фактори, що можуть впливати на роботу інфраструктури. У результаті виникає задача інтеграції цих даних у єдине середовище, що забезпечує їх узгоджене використання.

Однією з основних проблем інтеграції є неоднорідність даних. Фізичні вимірювання, як правило, представлені у вигляді просторово-розподілених сигналів або профілів, тоді як телеметричні дані мають вигляд дискретних часових рядів. Журнали подій, у свою чергу, містять текстову або структуровану інформацію, що описує окремі ситуації або зміни стану системи. Це ускладнює їх безпосереднє поєднання та вимагає застосування спеціальних підходів до уніфікації.

Важливим аспектом є також різниця у часових характеристиках даних. Телеметричні параметри можуть надходити з високою частотою, тоді як фізичні вимірювання можуть виконуватися періодично або за подією. Для коректної інтеграції необхідно забезпечити синхронізацію часових міток і узгодження даних у межах єдиного інтервалу спостереження.

Одним із підходів до вирішення цієї задачі є використання моделі подій і метрик, у якій усі дані представляються у вигляді уніфікованих записів із часовою прив'язкою. Метрики відображають кількісні параметри функціонування системи, тоді як події фіксують окремі зміни стану або виникнення відхилень. Такий підхід дозволяє поєднати різнорідні дані у межах єдиного інформаційного простору.

Подальший розвиток інтеграційних підходів пов'язаний із застосуванням методів кореляції, які дозволяють встановлювати взаємозв'язки між подіями та змінами параметрів. Наприклад, зниження рівня сигналу в оптичному волокні може

супроводжуватися збільшенням кількості помилок на мережевому інтерфейсі. Виявлення таких залежностей дозволяє більш точно визначати причини відхилень і скорочувати час їх локалізації.

Окрему увагу приділяють побудові узагальнених моделей стану системи, які дозволяють агрегувати інформацію з різних джерел і формувати єдине представлення про стан мережі. Такі моделі можуть бути представлені у вигляді набору параметрів, що характеризують окремі ділянки мережі, або у вигляді графових структур, які відображають топологію та взаємозв'язки між елементами інфраструктури.

Для наочного представлення процесу інтеграції даних доцільно використати структурну схему, яка відображає основні етапи перетворення інформації - від збору до аналітичної обробки(рисунок 2.3).



Рисунок 2.3 – Схема інтеграції різномірних даних у кіберфізичній системі (фізичні вимірювання, телеметрія, події → уніфікація → кореляція → аналітика).

Аналіз підходів до інтеграції показує, що ефективна система контролю повинна забезпечувати не лише збір даних, але й їх узгодження, уніфікацію та інтелектуальну обробку. Відсутність хоча б одного з цих етапів призводить до втрати частини інформації або зниження точності аналізу.

У процесі побудови телеметричного контуру важливим є забезпечення безперервності збору даних та мінімізації затримок їх передавання. Це дозволяє формувати актуальну картину стану мережі в режимі, наближеному до реального часу, що є критичним для оперативного реагування на відхилення.

Крім того, використання сучасних протоколів телеметрії сприяє зниженню навантаження на мережеву інфраструктуру та забезпечує ефективне використання ресурсів, що є важливим фактором при масштабуванні системи.

У підсумку встановлено, що інтеграція різнорідних даних є ключовою умовою побудови кіберфізичної системи контролю. Саме вона забезпечує формування цілісного уявлення про стан опорної мережі та створює основу для прийняття обґрунтованих експлуатаційних рішень. Це дозволяє перейти до обґрунтування архітектури системи, яка розглядається у наступному підрозділі.

2.5 Обґрунтування вибору архітектури кіберфізичної системи контролю

Аналіз підходів до побудови систем контролю, методів фізичного моніторингу та телеметричних рішень показав, що ефективний контроль опорної оптичної мережі можливий лише за умови інтеграції різнорідних джерел даних у межах єдиного інформаційного контуру. Окреме використання фізичних вимірювань або телеметрії не забезпечує достатньої повноти інформації для своєчасного виявлення та локалізації проблем.

У зв'язку з цим доцільним є застосування кіберфізичної архітектури, яка поєднує фізичний і цифровий рівні функціонування системи. Такий підхід дозволяє забезпечити безперервний моніторинг стану інфраструктури, узгодження даних різної природи та їх подальшу аналітичну обробку.

Основа запропонованої архітектури становить розподіл системи на кілька функціональних рівнів. Перший рівень формують джерела даних, до яких належать засоби фізичних вимірювань на основі «темних» оптичних волокон, а також мережеве обладнання, що генерує телеметричні параметри. Другий рівень

забезпечує передавання даних і включає механізми збору, агрегації та транспортування інформації до центрального середовища оброблення.

Наступний рівень представлений підсистемою зберігання та уніфікації даних, у межах якої здійснюється перетворення різнорідної інформації у єдиний формат подій і метрик. Це дозволяє забезпечити подальшу кореляцію даних і їх узгоджений аналіз. На цьому етапі також виконується фільтрація та агрегування інформації з метою зменшення обсягів оброблюваних даних.

Верхній рівень архітектури становить аналітична підсистема, яка виконує виявлення відхилень, кореляцію подій і формування рекомендацій щодо реагування. Результати аналізу передаються до операторського середовища, де забезпечується їх візуалізація та підтримка прийняття експлуатаційних рішень.

Важливою особливістю запропонованої архітектури є використання «темних» оптичних волокон як сенсорного середовища, що дозволяє здійснювати безперервний контроль фізичного стану інфраструктури без впливу на передавання трафіку. Це забезпечує додатковий рівень інформації, який відсутній у традиційних телеметричних системах.

Крім того, архітектура передбачає можливість масштабування за рахунок розподілення функцій оброблення даних між окремими вузлами системи. Це дозволяє адаптувати систему до різних обсягів інфраструктури та забезпечити її ефективне функціонування в умовах зростання кількості джерел даних.

Аналіз запропонованої архітектури показує, що вона забезпечує інтеграцію фізичних і телеметричних даних, підтримує безперервний моніторинг і створює основу для реалізації аналітичних механізмів. Це дозволяє підвищити ефективність контролю стану мережі та скоротити час реагування на відхилення.

Для узагальнення структури запропонованої архітектури доцільно використати графічне представлення, яке відображає взаємодію між основними функціональними рівнями системи(рисунок 2.4).

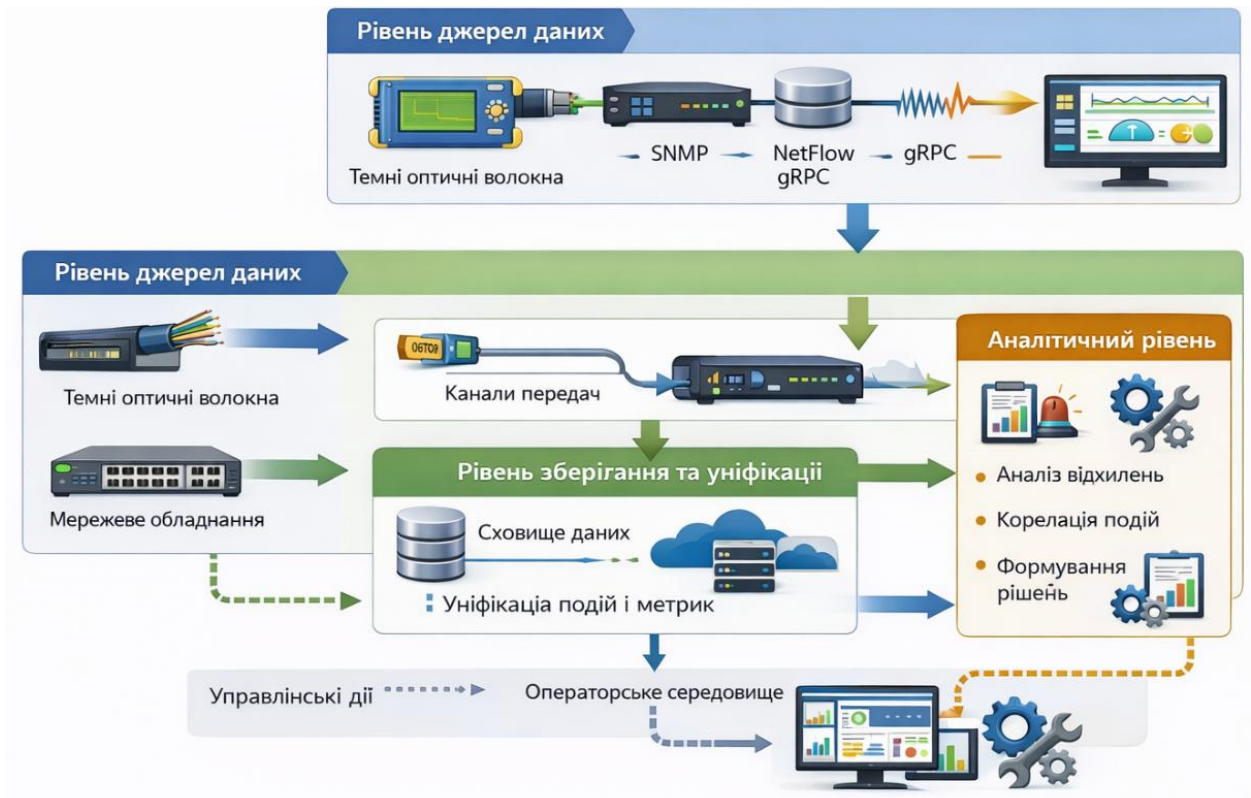


Рисунок 2.4 – Узагальнена архітектура кіберфізичної системи контролю опорної оптичної мережі.

У підсумку обґрунтовано вибір кіберфізичної архітектури як основи для побудови системи контролю опорної оптичної мережі. Такий підхід дозволяє забезпечити комплексний контроль стану інфраструктури та створює передумови для формування узагальненої моделі функціонування системи, що розглядається у наступному підрозділі.

Інтеграція даних у єдиному середовищі подій і метрик передбачає не лише їх об'єднання, але й приведення до уніфікованого формату, що забезпечує можливість подальшого аналізу. Це дозволяє усунути неоднорідність даних, яка виникає внаслідок використання різних джерел та протоколів.

Додатково визначено, що централізоване зберігання та оброблення даних створює основу для реалізації складних аналітичних механізмів, зокрема алгоритмів кореляції та виявлення аномалій.

2.6 Формування узагальненої моделі функціонування системи контролю

На основі проведеного аналізу підходів до побудови систем контролю, методів фізичного моніторингу, телеметричних рішень та принципів інтеграції даних сформовано узагальнену модель функціонування кіберфізичної системи контролю опорної оптичної мережі. Така модель відображає послідовність основних процесів, що забезпечують отримання, оброблення та використання інформації про стан інфраструктури.

Функціонування системи доцільно розглядати як безперервний цикл, у межах якого реалізується взаємодія фізичних і цифрових компонентів. Початковим етапом цього циклу є отримання даних із різних джерел. До них належать результати фізичних вимірювань, отримані за допомогою «темних» оптичних волокон, а також телеметричні параметри, що характеризують роботу мережевого обладнання. Дані надходять у систему з різною частотою та мають різну структуру, що визначає необхідність їх подальшого узгодження.

Наступним етапом є передавання даних у середовище оброблення, де здійснюється їх агрегація та первинна фільтрація. На цьому етапі відбувається усунення надлишкової інформації, а також забезпечується синхронізація даних за часовими мітками. Це дозволяє сформувати узгоджений потік інформації, придатний для подальшого аналізу.

Після цього виконується накопичення даних у спеціалізованому сховищі, яке забезпечує їх збереження та доступ для аналітичних модулів. Наявність історичних даних дозволяє аналізувати поведінку системи в динаміці, виявляти тенденції та формувати базові характеристики нормального функціонування мережі.

Ключовим етапом є аналітичне оброблення даних, у межах якого здійснюється виявлення відхилень від нормального стану, кореляція подій та оцінювання впливу різних факторів на роботу мережі. На цьому етапі поєднуються дані фізичного та логічного рівнів, що дозволяє підвищити точність локалізації проблем і визначення їх причин.

Результати аналізу використовуються для формування управлінських рішень, спрямованих на усунення виявлених відхилень або запобігання їх виникненню. Це можуть бути як автоматизовані дії системи, так і рекомендації для оператора. Завершальним етапом циклу є реалізація відповідних дій, які впливають на стан мережі або її конфігурацію.

Описана послідовність процесів формує замкнений цикл функціонування системи, у якому результати виконаних дій впливають на подальший стан інфраструктури та, відповідно, на нові дані, що надходять у систему. Це забезпечує адаптивність і можливість постійного вдосконалення роботи системи контролю.

У межах побудованої кіберфізичної системи контролю ключову роль відіграє узгоджена послідовність оброблення даних, яка забезпечує перехід від первинних вимірювань до формування керуючих впливів. Такий підхід дозволяє організувати безперервний замкнений цикл функціонування, у якому результати аналізу безпосередньо впливають на подальший процес вимірювання та експлуатації мережі. Взаємозв'язок між окремими етапами цього циклу визначає ефективність виявлення відхилень, швидкість реагування на інциденти та загальну надійність функціонування системи контролю.

Ефективність функціонування циклу значною мірою залежить від узгодженості роботи всіх його етапів, що забезпечує безперервність оброблення інформації та своєчасність прийняття рішень. Порушення взаємодії між окремими етапами може призводити до втрати актуальності даних та зниження точності аналізу.

Також встановлено, що замкненість циклу функціонування створює можливість для самокорекції системи, коли результати аналізу впливають на подальші процеси вимірювання та оброблення, підвищуючи адаптивність системи до змін у стані мережі.

Для наочного представлення узагальненої моделі функціонування доцільно використати структурну схему, яка відображає послідовність основних етапів оброблення даних(рисунок 2.5).



Рисунок 2.5 – Узагальнений цикл функціонування кіберфізичної системи контролю («вимірювання - передавання - накопичення - аналіз - рішення - дія»).

У підсумку сформовано узагальнену модель функціонування системи контролю, яка поєднує процеси збору, оброблення та використання даних у межах єдиного інформаційного циклу. Запропонована модель створює основу для подальшого формування математичних моделей, методів і алгоритмів оброблення даних, що розглядаються у наступному розділі.

2.7 Висновки до розділу 2

У розділі було розглянуто підходи до побудови систем контролю опорних оптичних телекомунікаційних мереж та визначено основні принципи формування кіберфізичної системи контролю. Проаналізовано існуючі рішення, які базуються на централізованих, розподілених і телеметричних підходах, що дозволило виявити

їх переваги та обмеження при застосуванні в умовах сучасних мереж великої протяжності.

Показано, що традиційні методи контролю не забезпечують повноцінного уявлення про стан мережі, оскільки орієнтовані або на логічний, або на фізичний рівень функціонування. Це обумовлює необхідність поєднання різних джерел інформації в межах єдиного підходу, що дозволяє підвищити точність виявлення відхилень і ефективність експлуатаційного контролю.

Проаналізовано методи фізичного моніторингу волоконно-оптичних ліній, серед яких особливу увагу приділено рефлектометричним і розподіленим сенсорним підходам. Встановлено, що використання «темних» оптичних волокон як сенсорного середовища забезпечує можливість безперервного контролю без впливу на передавання трафіку, що є критично важливим для опорних мереж.

Розглянуто телеметричні підходи до контролю стану мережевого обладнання та визначено їх роль у формуванні оперативної інформації про функціонування мережі. Виявлено, що застосування потокової телеметрії дозволяє отримувати детальні часові ряди параметрів, однак без інтеграції з фізичними вимірюваннями не забезпечує повної картини стану інфраструктури.

Проаналізовано підходи до інтеграції різномірних даних, що дозволило визначити доцільність використання моделі подій і метрик як основи для уніфікації інформації. Встановлено, що кореляція даних різної природи є ключовим елементом підвищення ефективності системи контролю.

У результаті обґрунтовано вибір кіберфізичної архітектури системи контролю, яка поєднує фізичні вимірювання, телеметричні дані та аналітичні механізми у межах єдиного інформаційного середовища. Запропоновано узагальнену модель функціонування системи, що реалізується у вигляді циклу «вимірювання - передавання - накопичення - аналіз - рішення - дія».

Додатково було встановлено, що ефективність функціонування системи контролю значною мірою залежить від узгодженості часових характеристик даних, які надходять із різних джерел. Невідповідність часових інтервалів або відсутність синхронізації може призводити до некоректної інтерпретації подій та зниження

точності аналізу. Це визначає необхідність використання єдиного часово-орієнтованого підходу до оброблення інформації в межах системи.

Окрему увагу приділено питанням масштабованості та адаптивності системи контролю. Встановлено, що із зростанням кількості джерел даних та обсягів інформації виникає потреба у гнучких механізмах розподілу обчислювальних ресурсів і оптимізації процесів оброблення. Це обумовлює доцільність використання модульної архітектури, яка дозволяє розширювати функціональні можливості системи без суттєвих змін її базової структури.

Додатково було визначено, що ключовим фактором підвищення ефективності системи контролю є забезпечення узгодженості між процесами збору, передавання та оброблення даних. Порушення цілісності цього процесу призводить до втрати актуальності інформації та ускладнює своєчасне виявлення відхилень у роботі мережі. Це обумовлює необхідність впровадження механізмів контролю якості даних та їх попередньої обробки перед аналітичним етапом.

Також встановлено, що поєднання фізичних вимірювань із телеметричними даними створює передумови для більш точного визначення причин виникнення аномалій у мережі. Такий підхід дозволяє не лише фіксувати факт відхилення, але й встановлювати його джерело, що суттєво скорочує час локалізації та усунення несправностей у процесі експлуатації.

Крім того, сформовані у розділі підходи дозволяють створити основу для подальшого впровадження інтелектуальних методів оброблення даних, зокрема алгоритмів автоматизованого аналізу та прогнозування стану мережі. Це відкриває можливість переходу до більш високого рівня автоматизації процесів контролю та управління, що підвищує надійність функціонування опорної оптичної телекомунікаційної інфраструктури.

У підсумку сформовано теоретичну та методичну основу для подальшого розроблення моделей, методів і алгоритмів оброблення даних у кіберфізичній системі контролю, що розглядаються у наступному розділі.

3 МОДЕЛІ, МЕТОДИ ТА АЛГОРИТМИ ОБРОБЛЕННЯ ДАНИХ У СИСТЕМІ КОНТРОЛЮ

3.1 Модель подання стану волоконно-оптичної інфраструктури в цифровому середовищі

Побудова кіберфізичної системи контролю опорної оптичної телекомунікаційної мережі потребує не лише організації фізичних вимірювань і збору телеметрії, а й формування такої моделі подання даних, яка дозволяє відобразити технічний стан інфраструктури у цифровому середовищі. Саме за рахунок цієї моделі стає можливим перехід від розрізнених параметрів і подій до цілісного цифрового представлення мережі, придатного для спостереження, аналізу, виявлення відхилень і підтримки експлуатаційних рішень. Без такого подання система фактично залишалася б набором незалежних потоків даних, що ускладнює не лише їх аналітичне опрацювання, а й саме розуміння поточного стану контрольованої інфраструктури.

У межах запропонованого підходу стан волоконно-оптичної інфраструктури доцільно розглядати як сукупність взаємопов'язаних характеристик, що описують фізичний, топологічний і експлуатаційний рівні мережі. До фізичного рівня належать параметри, які безпосередньо відображають стан волокна та лінійної частини, зокрема загасання, відбиття, наявність локальних неоднорідностей, зміни сигналу вздовж траси та інші ознаки, що можуть свідчити про деградацію або зовнішній вплив. Топологічний рівень охоплює структуру мережі: вузли, сегменти, точки з'єднання, кабельні ділянки та просторову прив'язку елементів. Експлуатаційний рівень відображає телеметричні показники активного обладнання, події технічного супроводу, сигнали попередження та службові стани мережевих компонентів.

Модель цифрового подання повинна об'єднувати ці рівні в єдиному просторі опису. Це означає, що кожен елемент інфраструктури повинен мати власне цифрове представлення, пов'язане з його місцем у структурі мережі, набором контрольованих параметрів і поточним станом. У практичному сенсі такий підхід

дозволяє перейти від абстрактного зберігання окремих значень до формування цифрового образу мережі, в якому для кожної ділянки можна встановити, які параметри спостерігаються, як вони змінюються в часі та чи є підстави вважати їх нормальними або аномальними.

Основною одиницею такого подання доцільно вважати контрольований об'єкт. Ним може бути окрема ділянка волоконно-оптичної лінії, сегмент траси, вузол мережі, точка з'єднання або інший елемент, для якого накопичується інформація про технічний стан. Для кожного контрольованого об'єкта в цифровому середовищі повинні зберігатися ідентифікаційні відомості, просторово-топологічні характеристики, набір доступних параметрів та історія зафіксованих змін. Така організація дозволяє розглядати мережу як сукупність структурованих цифрових сутностей, кожна з яких має власний стан і власний зв'язок з іншими елементами інфраструктури.

Важливою властивістю моделі є динамічність. Стан мережі не може вважатися сталим, оскільки параметри лінії та обладнання змінюються під впливом зовнішніх умов, навантаження, експлуатаційних дій або аварійних подій. Через це цифрове подання повинно фіксувати не лише поточне значення параметрів, а й їх часову еволюцію. У такому разі для кожного контрольованого об'єкта можна розглядати стан не як одиничне значення, а як впорядкований у часі набір характеристик, що дозволяє аналізувати тенденції, повторюваність відхилень і поступове накопичення ознак деградації.

Не менш важливою є багатокomпонентність стану. У межах моделі він не повинен зводитися до одного інтегрального показника, оскільки реальна інфраструктура характеризується кількома групами параметрів, які мають різну природу та різну аналітичну цінність. Один і той самий сегмент мережі може одночасно мати допустимі телеметричні значення, але демонструвати підозрілу зміну фізичних параметрів волокна, або навпаки. Внаслідок цього цифрова модель повинна зберігати складений характер стану, коли для об'єкта паралельно існують фізичний стан, телеметричний стан, експлуатаційний статус і контекстні відомості, що уточнюють його інтерпретацію.

Для формалізації подання стану доцільно використати узагальнену модель, у якій стан окремого об'єкта можна описати як сукупність параметрів, подій і зв'язків:

$$S = \langle I, P, E, T, L \rangle, \quad (3.1)$$

де I - ідентифікаційні та топологічні характеристики об'єкта,

P - множина контрольованих параметрів,

E - множина подій, пов'язаних з об'єктом,

T - часові характеристики змін стану,

L - зв'язки з іншими елементами мережевої інфраструктури.

Наведене подання є узагальненим, однак воно дозволяє формально відобразити, що стан об'єкта визначається не окремим числовим значенням, а структурованим набором відомостей, достатнім для подальшого аналізу. За такої інтерпретації будь-яка зміна в інфраструктурі може бути розглянута як зміна однієї або кількох складових моделі стану.

Суттєве значення має також прив'язка моделі до просторової структури мережі. Для задач контролю опорної інфраструктури недостатньо зафіксувати сам факт відхилення. Потрібно встановити, до якої саме ділянки воно належить, які сусідні сегменти можуть бути пов'язані з цим відхиленням і як воно впливає на загальну конфігурацію транспортної мережі. Тому цифрове середовище повинно підтримувати відображення зв'язків між об'єктами, що дозволяє аналізувати не лише локальний стан окремого сегмента, а й розповсюдження наслідків події на пов'язані елементи інфраструктури.

Окрему роль у моделі відіграє поняття нормального та аномального стану. У цифровому середовищі доцільно передбачити не лише механізм збереження параметрів, а й засіб їх інтерпретації відносно певного базового профілю. Це означає, що для контрольованого об'єкта мають бути визначені характерні межі допустимих змін, історично типовий режим функціонування або набір умов, за яких стан вважається штатним. У такому випадку цифрова модель стає основою не

просто для накопичення даних, а для подальшого виявлення аномалій, що є ключовою функцією всієї системи контролю.

Запропонована модель подання стану інфраструктури в цифровому середовищі створює основу для наступного етапу - розроблення методів кореляції фізичних вимірювань і телеметричних даних. Саме завдяки наявності уніфікованого цифрового представлення стає можливим зіставлення параметрів різної природи, встановлення часових і просторових збігів, а також формування змістовних аналітичних висновків щодо стану опорної мережі.

У підсумку модель подання стану волоконно-оптичної інфраструктури в цифровому середовищі дозволяє відобразити контрольовану мережу як структуровану сукупність об'єктів, параметрів, подій і зв'язків, що змінюються в часі. Це забезпечує перехід від простого накопичення даних до формування повноцінного цифрового опису інфраструктури, придатного для аналітичного опрацювання, виявлення відхилень і підтримки технічного реагування.

3.2 Метод кореляції фізичних вимірювань і телеметричних даних

Однією з центральних задач у межах побудови кіберфізичної системи контролю є узгоджене опрацювання даних, що надходять із різних джерел. Фізичні вимірювання на «темних» оптичних волокнах відображають стан лінійної інфраструктури, тоді як телеметричні параметри активного обладнання характеризують експлуатаційний режим функціонування мережі. Окремий розгляд цих даних дає лише часткове уявлення про ситуацію. Саме тому для підвищення достовірності оцінювання технічного стану мережі необхідно застосувати метод кореляції, який дозволяє виявляти зв'язки між подіями фізичного рівня та змінами телеметричних показників.

Необхідність такого методу пояснюється тим, що одна й та сама проблема в мережі може проявлятися по-різному залежно від рівня спостереження. Наприклад, зовнішній механічний вплив на кабельну трасу може бути зафіксований у вигляді зміни параметрів волокна, але одночасно супроводжуватися погіршенням рівня

потужності, збільшенням кількості помилок або нестабільністю окремого інтерфейсу. Якщо ці сигнали розглядати ізольовано, частина з них може бути інтерпретована як випадкове відхилення або як локальний збій обладнання. У разі спільного аналізу виникає можливість виявити спільну причину та точніше оцінити характер події.

У загальному вигляді кореляцію доцільно розуміти як процедуру встановлення часових, просторових і змістових відповідностей між записами, що належать до одного фрагмента інфраструктури або до пов'язаних між собою елементів мережі. Це означає, що події фізичного рівня мають зіставлятися з телеметричними змінами не довільно, а за набором ознак, серед яких основними є час виникнення, місце фіксації та тип відхилення. Такий підхід дозволяє перейти від простого накопичення інформації до аналітичного встановлення взаємозв'язків між різнорідними проявами одного процесу.

Метод кореляції доцільно будувати поетапно. На першому етапі виконується відбір даних, які потенційно можуть бути пов'язаними між собою. Для цього із середовища подій і метрик вибираються записи, що відповідають визначеному часовому інтервалу та належать до однієї ділянки мережі або до пов'язаних сегментів. На другому етапі виконується нормалізація даних, тобто приведення параметрів різної природи до уніфікованого вигляду, придатного для спільного аналізу. На третьому етапі визначається рівень узгодженості між відібраними записами, після чого формується висновок щодо наявності або відсутності корельованої події.

Часова кореляція є першою й обов'язковою складовою методу. Вона ґрунтується на припущенні, що пов'язані події повинні виникати в одному часовому інтервалі або в межах допустимого проміжку, який враховує інерційність процесів, затримку вимірювання чи особливості передавання телеметрії. Якщо фізичне відхилення і зміна параметрів обладнання зафіксовані в близький момент часу, це створює початкову підставу для їх подальшого спільного розгляду. Якщо часовий інтервал між ними є надто великим, імовірність прямого зв'язку зменшується.

Другою складовою є просторова кореляція. Для її реалізації потрібно встановити, чи належать фізична подія та телеметричне відхилення до однієї і тієї самої ділянки мережі або до логічно пов'язаних елементів. Наприклад, зміна параметрів на певному відрізку траси повинна зіставлятися насамперед із тим обладнанням, яке обслуговує відповідний сегмент. Саме просторова прив'язка дозволяє уникнути хибних збігів, коли події відбуваються одночасно, але стосуються різних частин інфраструктури.

Третьою складовою виступає змістова кореляція. Вона пов'язана з тим, наскільки характер однієї події відповідає можливим наслідкам іншої. Якщо фізичні вимірювання свідчать про збільшення загасання або появу локальної неоднорідності, а телеметрія одночасно фіксує зниження потужності чи погіршення якості сигналу, такий зв'язок є змістовно обґрунтованим. Якщо ж типи відхилень не мають логічного зв'язку, навіть часовий і просторовий збіг не дає достатніх підстав вважати їх корельованими.

Для формалізації методу доцільно використати інтегральну оцінку кореляції, яка враховує часову, просторову та змістову узгодженість:

$$K = w_1 Kt + w_2 Ks + w_3 Kc, \quad (3.2)$$

де Kt - показник часової узгодженості,

Ks - показник просторової узгодженості,

Kc - показник змістової відповідності,

w_1, w_2, w_3 - вагові коефіцієнти складових, що визначають їхній внесок у підсумкову оцінку.

За такої побудови метод дозволяє отримати не лише бінарний висновок про наявність або відсутність зв'язку між подіями, а й кількісну оцінку рівня їхньої узгодженості. Це особливо важливо для складних експлуатаційних ситуацій, коли окремі ознаки можуть бути виражені нерівномірно. У практичному використанні порогове значення показника K може застосовуватися для відбору тих сукупностей подій, які слід вважати справді значущими для подальшого аналізу й реагування.

Запропонований метод кореляції є важливим тому, що він зменшує кількість хибних спрацьовувань та підвищує достовірність інтерпретації мережевого стану. Якщо система спирається лише на фізичні вимірювання, вона може зафіксувати подію без достатнього розуміння її реального впливу на функціонування мережі. Якщо ж аналізується лише телеметрія, то важко відрізнити симптом інфраструктурної проблеми від локального відхилення в роботі обладнання. Поєднання обох підходів у межах кореляційного методу дозволяє отримати більш повну картину та робить висновки системи значно надійнішими.

У підсумку метод кореляції фізичних вимірювань і телеметричних даних формує основу для подальшого автоматизованого виявлення аномалій та локалізації проблемних ділянок опорної мережі. Саме завдяки йому різномірні джерела інформації можуть бути перетворені на єдиний аналітичний механізм, здатний виявляти взаємопов'язані відхилення, оцінювати їхню значущість і підтримувати формування обґрунтованих експлуатаційних рішень.

3.3 Алгоритм виявлення аномалій та локалізації проблемних ділянок

Одним із ключових завдань кіберфізичної системи контролю є своєчасне виявлення аномалій у роботі опорної оптичної мережі та визначення тих ділянок інфраструктури, де виникає найбільша ймовірність пошкодження, деградації або стороннього впливу. Наявність фізичних вимірювань, телеметричних параметрів та інтегрованого середовища подій і метрик створює необхідну основу для розроблення відповідного алгоритму. Його призначення полягає в тому, щоб на підставі накопичених і зіставлених даних автоматично виділяти відхилення від нормального режиму функціонування та формувати висновок щодо місця їх виникнення.

У межах запропонованого підходу аномалією доцільно вважати такий стан контрольованого об'єкта або сукупності пов'язаних об'єктів, за якого поточні параметри, події чи їх комбінації істотно відрізняються від характерного профілю штатної роботи. Важливо, що йдеться не лише про різкі та очевидні відмови, а й

про поступові зміни, які самі по собі можуть не виглядати критичними, але в динаміці свідчать про початок деградаційного процесу. Саме тому алгоритм повинен бути орієнтований не тільки на фіксацію одиничних критичних подій, а й на оцінювання відхилень у часовому розвитку.

На першому етапі алгоритму виконується формування базового профілю нормального стану для кожного контрольованого об'єкта. Такий профіль створюється на підставі історичних даних, що відображають типовий режим функціонування ділянки мережі за відсутності аварійних або підозрілих подій. До його складу можуть входити допустимі межі фізичних параметрів волокна, характерні значення телеметричних показників, звичний рівень коливань і часові закономірності зміни окремих характеристик. Наявність такого профілю є необхідною умовою, оскільки без нього неможливо коректно визначити, чи є поточне відхилення справді аномальним.

Другий етап пов'язаний із поточним зчитуванням і попереднім аналізом нових даних. Система отримує чергові фізичні вимірювання та телеметричні записи, після чого виконує їх приведення до уніфікованого формату та перевіряє на повноту й коректність. Якщо дані є придатними до подальшого аналізу, вони зіставляються з базовим профілем відповідного об'єкта. На цьому рівні можуть бути виявлені первинні ознаки відхилення, наприклад перевищення допустимого порогу, нестандартна динаміка зміни параметра або поява комбінації подій, яка раніше не була характерною для нормального режиму.

Третій етап алгоритму полягає у визначенні ступеня аномальності. Для цього доцільно використовувати не окремий параметр, а сукупну оцінку, яка враховує відхилення фізичних характеристик, телеметричних значень, повторюваність подій і результати кореляції між ними. У такому разі аномалія трактується не як одиничний симптом, а як інтегральний прояв порушення нормального стану. Це підвищує стійкість алгоритму до випадкових коливань і зменшує ймовірність хибного спрацьовування в ситуаціях, коли окремий параметр змінився незначно або тимчасово.

Для формального подання рівня аномальності доцільно використати узагальнений показник:

$$A_i = \alpha * \Delta P_i + \beta * \Delta T_i + \gamma * K_i + \delta * H_i, \quad (3.3)$$

де A_i - інтегральний показник аномальності для i -го контрольованого об'єкта;
 ΔP_i - величина відхилення фізичних параметрів волоконно-оптичної лінії від базового профілю;

ΔT_i - величина відхилення телеметричних параметрів активного обладнання;

K_i - показник кореляції між фізичними та телеметричними подіями;

H_i - коефіцієнт урахування історії попередніх відхилень для i -го об'єкта;

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$ - вагові коефіцієнти впливу відповідних складових, причому $\alpha + \beta + \gamma + \delta = 1$.

У цій моделі значення показника A зростає зі збільшенням сумарного відхилення від нормального стану, посиленням кореляції між джерелами даних та наявністю в історії схожих або повторюваних проблем. Такий підхід дозволяє враховувати не лише поточну ситуацію, а й накопичений досвід функціонування конкретної ділянки мережі.

Після визначення рівня аномальності алгоритм переходить до локалізації проблемної ділянки. На цьому етапі використовується просторова прив'язка фізичних вимірювань, топологічна структура мережі та належність телеметричних подій до конкретних вузлів або сегментів. Якщо відхилення виявлені одночасно на кількох пов'язаних елементах, алгоритм повинен визначити ту ділянку, яка є найбільш імовірним джерелом проблеми. Це здійснюється через аналіз розташування об'єктів у мережі, послідовності появи подій і характеру зміни параметрів на сусідніх сегментах.

Важливо, що локалізація не завжди означає визначення точної фізичної точки пошкодження. У реальних умовах результатом алгоритму може бути виділення зони підвищеного ризику, окремого сегмента траси, групи пов'язаних елементів або конкретного мережевого вузла, що потребує додаткової перевірки. Такий

формат результату цілком придатний для експлуатаційного реагування, оскільки вже на цьому рівні дає змогу звужити область пошуку та скоротити час технічної діагностики.

З логічної точки зору послідовність роботи алгоритму можна подати так: отримання даних, перевірка коректності, зіставлення з базовим профілем, оцінювання відхилень, розрахунок рівня аномальності, виконання кореляції, просторовий аналіз і формування висновку про локалізацію.

Практична цінність запропонованого алгоритму полягає в тому, що він дозволяє поєднати контроль фізичного стану волоконно-оптичної інфраструктури з аналізом мережевих симптомів у межах єдиної процедури. Це підвищує достовірність виявлення аномалій, зменшує ризик пропуску прихованих процесів деградації та створює основу для більш точного технічного реагування. Окрім цього, алгоритм є придатним до подальшого розширення, зокрема шляхом уточнення критеріїв аномальності або включення додаткових джерел експлуатаційної інформації.

У підсумку алгоритм виявлення аномалій та локалізації проблемних ділянок є одним із центральних елементів аналітичного ядра системи контролю. Саме він забезпечує перехід від спостереження за станом мережі до виявлення відхилень, оцінювання їхньої значущості та визначення місця виникнення проблеми. Це створює основу для подальшого розгляду методів підтримки прийняття експлуатаційних рішень, у межах яких результати алгоритмічного аналізу мають бути перетворені на конкретні дії технічного супроводу.

3.4 Метод підтримки прийняття експлуатаційних рішень за результатами моніторингу

Результати фізичних вимірювань, телеметричного спостереження та аналітичного виявлення аномалій набувають практичної цінності лише тоді, коли вони можуть бути використані для формування обґрунтованих експлуатаційних рішень. Саме тому в межах кіберфізичної системи контролю необхідно

передбачити метод підтримки прийняття рішень, орієнтований на перетворення технічних даних і аналітичних висновків у придатну для практичного реагування форму. Його призначення полягає не в автоматичній заміні дій експлуатаційного персоналу, а у формуванні такої інформаційної основи, яка дозволяє швидше, точніше й більш обґрунтовано оцінити ситуацію та вибрати доцільний сценарій реагування.

Необхідність такого методу пояснюється тим, що навіть за наявності достовірного виявлення аномалії та локалізації проблемної ділянки залишається відкритим питання про характер подальших дій. Одна й та сама подія може вимагати різного реагування залежно від ступеня критичності, місця виникнення, поточного навантаження на мережу, наявності резервування, повторюваності подібних відхилень у минулому та умов експлуатації конкретної ділянки. Через це система контролю повинна підтримувати не лише фіксацію факту проблеми, а й її інтерпретацію в контексті подальшого технічного супроводу.

У межах запропонованого підходу рішення доцільно розглядати як результат багатофакторного оцінювання стану контрольованого об'єкта. Для його формування мають враховуватися щонайменше чотири групи чинників: рівень аномальності, просторове положення проблемної ділянки, вплив відхилення на функціонування мережі та історичний контекст. Рівень аномальності дозволяє оцінити вираженість поточного відхилення, просторова локалізація вказує на місце можливого виникнення проблеми, оцінка впливу відображає значущість цієї події для транспортної інфраструктури, а історичний контекст дозволяє врахувати повторюваність або накопичувальний характер аналогічних ситуацій.

На першому етапі методу формується набір вхідних ознак для підтримки рішення. До нього включаються результати алгоритму виявлення аномалій, показники кореляції між фізичними і телеметричними подіями, дані про критичність сегмента мережі, інформація про резервування, наявність попередніх інцидентів на цій ділянці та поточні службові стани пов'язаних елементів інфраструктури. Така сукупність ознак дозволяє оцінювати проблему не

ізолювано, а з урахуванням її місця в загальній структурі мережі та експлуатаційних наслідків.

На другому етапі виконується класифікація ситуації за рівнем пріоритету реагування. Для цього доцільно виділити щонайменше три категорії: низький, середній і високий пріоритет. До низького пріоритету можуть належати відхилення, що не мають вираженого впливу на працездатність мережі та не демонструють стійкої негативної динаміки. До середнього - ситуації, які вимагають спостереження, додаткової перевірки або підготовки до технічного втручання. До високого пріоритету повинні відноситися події, що супроводжуються високим рівнем аномальності, підтвердженою кореляцією між джерелами даних і потенційним впливом на критичні транспортні сегменти.

Для формалізації цього етапу доцільно використати інтегральний показник пріоритету реагування:

$$R_i = \mu * A_i + \nu * C_i + \rho * V_i + \sigma * H_i, \quad (3.4)$$

де R_i - показник пріоритету реагування для i -го контрольованого об'єкта;

A_i - інтегральний показник аномальності;

C_i - коефіцієнт критичності ділянки мережі;

V_i - оцінка впливу відхилення на функціонування транспортної інфраструктури;

H_i - коефіцієнт урахування історії попередніх інцидентів;

μ, ν, ρ, σ - вагові коефіцієнти складових, причому $\mu + \nu + \rho + \sigma = 1$.

Наведена модель дозволяє перейти від окремих технічних параметрів до єдиного показника, який характеризує доцільність і терміновість реагування. Важливо, що показник R_i не визначає конкретну технічну дію автоматично, а задає основу для вибору класу експлуатаційного рішення. За його значенням система може формувати рекомендацію щодо продовження моніторингу, ініціювання додаткової діагностики, переведення трафіку на резервний маршрут, виїзду технічної бригади або перевірки окремого вузла чи сегмента траси.

На наступному етапі метод повинен зіставити пріоритет реагування з допустимими сценаріями дій. Якщо значення R_i є низьким, доцільним рішенням може бути посилене спостереження за об'єктом без негайного втручання. За середнього значення пріоритету доцільно формувати рекомендацію щодо додаткової перевірки стану обладнання або конкретної ділянки траси. За високого значення пріоритету повинно формуватися рішення, орієнтоване на оперативне реагування, оскільки затримка в такій ситуації може призвести до переходу деградаційного процесу в аварійну фазу.

Особливістю запропонованого методу є те, що він дозволяє поєднувати автоматизовану оцінку ситуації з участю експлуатаційного персоналу. Це є важливим для критично важливих телекомунікаційних мереж, де остаточне рішення часто залежить не лише від технічних параметрів, а й від зовнішніх організаційних умов. Унаслідок цього система повинна надавати оператору не просто коротке повідомлення про подію, а структурований висновок: опис відхилення, його локалізацію, рівень аномальності, пріоритет реагування та рекомендований варіант дії. Саме такий формат робить аналітичні результати практично корисними.

Ще однією важливою рисою методу є зворотний зв'язок. Після реалізації певного експлуатаційного рішення інформація про його результат повинна повертатися до системи у вигляді нового запису в середовищі подій і метрик. Це дозволяє надалі уточнювати інтерпретацію подібних ситуацій, накопичувати досвід та підвищувати обґрунтованість майбутніх рішень. У такому разі система не лише підтримує поточне реагування, а й поступово вдосконалює власну базу знань про типові експлуатаційні сценарії.

У підсумку метод підтримки прийняття експлуатаційних рішень забезпечує завершення аналітичного контуру кіберфізичної системи контролю. Саме він переводить результати спостереження, кореляції та виявлення аномалій у практичну площину технічного реагування. Це дозволяє підвищити обґрунтованість дій експлуатаційного персоналу, скоротити час вибору сценарію

втручання та забезпечити більш цілеспрямоване управління станом опорної оптичної мережі.

3.5 Оцінювання ефективності функціонування системи контролю

Після побудови моделі подання стану інфраструктури, розроблення методу кореляції даних, алгоритму виявлення аномалій та підходу до підтримки експлуатаційних рішень постає необхідність оцінити, наскільки ефективно запропонована система здатна виконувати покладені на неї функції. Таке оцінювання є важливим не лише з позиції теоретичного обґрунтування, а й з погляду практичного впровадження, оскільки дозволяє встановити, чи забезпечує система реальне підвищення якості контролю опорної мережі порівняно з традиційними підходами, що базуються на періодичних вимірюваннях або локальному аналізі окремих параметрів.

У межах цієї роботи ефективність функціонування системи доцільно розглядати як комплексну характеристику, що відображає її здатність своєчасно виявляти відхилення, коректно локалізувати проблемні ділянки, формувати обґрунтовані висновки та підтримувати технічне реагування з мінімальними втратами часу й ресурсів. Такий підхід означає, що оцінювання не повинно зводитися до одного показника, оскільки система виконує кілька взаємопов'язаних функцій, кожна з яких впливає на загальний результат. Через це доцільно оцінювати її роботу за сукупністю критеріїв, що характеризують різні аспекти функціонування.

Першим важливим критерієм є своєчасність виявлення відхилень. Для системи контролю опорної мережі цей показник має особливе значення, оскільки раннє виявлення деградаційного процесу дозволяє запобігти переходу проблеми в аварійну фазу. Якщо система фіксує відхилення на початковому етапі, у технічного персоналу з'являється можливість виконати профілактичні або локалізаційні дії до того, як порушення призведе до втрати працездатності каналу. Внаслідок цього чим

меншим є інтервал між виникненням події та її фіксацією системою, тим вищою вважається ефективність контролю за цим критерієм.

Другим критерієм є точність локалізації проблемної ділянки. У реальних умовах мережевої експлуатації недостатньо лише виявити факт наявності аномалії. Потрібно також установити, де саме вона виникла або принаймні звузити область пошуку до конкретного сегмента траси, вузла чи зони впливу. Саме точність локалізації безпосередньо визначає витрати часу на подальшу діагностику та ремонтно-відновлювальні дії. Якщо система здатна достовірно виділяти проблемну ділянку, це знижує трудомісткість технічного супроводу та зменшує час відновлення мережі.

Третім критерієм доцільно вважати достовірність аналітичних висновків. Йдеться про здатність системи правильно відрізнити реальні загрози від несуттєвих або випадкових коливань параметрів. Для цього важливо враховувати співвідношення між коректно виявленими проблемами, хибними спрацьовуваннями та пропущеними критичними подіями. У межах експлуатації надмірна кількість хибних тривог знижує довіру до системи й перевантажує персонал, тоді як пропуск реальної небезпечної події робить контроль недостатньо надійним. Саме тому ефективна система повинна підтримувати збалансований режим функціонування, у якому значущі відхилення виявляються з високою ймовірністю, а несуттєві події не спричиняють надлишкового реагування.

Ще одним важливим критерієм є повнота охоплення контрольованої інфраструктури. Для опорної мережі критично важливо, щоб спостереження не обмежувалося лише окремими вузлами або локальними ділянками, а дозволяло отримувати узгоджене уявлення про стан усієї транспортної системи або її ключових сегментів. Використання «темних» волокон, телеметричного контуру та інтегрованого середовища подій і метрик створює умови для більш широкого охоплення мережі, а отже, підвищує практичну значущість контролю.

П'ятий критерій пов'язаний із придатністю системи до підтримки експлуатаційних рішень. У цьому випадку оцінюється не лише факт виявлення аномалії, а й те, наскільки зрозуміло та своєчасно система формує результат для

оператора або суміжного експлуатаційного середовища. Якщо після аналітичного опрацювання формується чіткий висновок із зазначенням локалізації, рівня критичності та можливого сценарію дії, система виконує свою функцію повноцінно. Якщо ж користувач отримує лише фрагментарні параметри без змістовного висновку, ефективність такого рішення знижується.

Для узагальненого оцінювання ефективності доцільно використати інтегральний показник:

$$E = a * D + b * L + c * Q + d * C + e * R, \quad (3.5)$$

де E - інтегральний показник ефективності функціонування системи контролю;

D - показник своєчасності виявлення відхилень;

L - показник точності локалізації проблемної ділянки;

Q - показник достовірності аналітичних висновків;

C - показник повноти охоплення контрольованої інфраструктури;

R - показник придатності системи до підтримки експлуатаційних рішень;

a, b, c, d, e - вагові коефіцієнти відповідних складових, причому $a + b + c + d + e = 1$.

Наведена формула дозволяє подати ефективність не як абстрактну якість системи, а як зважений результат за кількома ключовими критеріями. Залежно від пріоритетів експлуатації значення вагових коефіцієнтів можуть змінюватися. Наприклад, для критично важливих сегментів мережі більшу вагу доцільно надати своєчасності виявлення та точності локалізації, тоді як для систем довготривалого профілактичного контролю важливішими можуть бути повнота охоплення й достовірність аналітичного висновку.

На практичному рівні оцінювання ефективності доцільно виконувати шляхом порівняння результатів роботи запропонованої системи з умовним базовим підходом, за якого використовуються лише розрізнені вимірювання або окремі телеметричні параметри без інтегрованого аналітичного контуру. Очікуваною

перевагою кіберфізичної системи в такому порівнянні є скорочення часу виявлення проблеми, підвищення точності локалізації, зменшення кількості хибних тривог і покращення придатності результатів до технічного реагування. Саме ці ефекти можна розглядати як основні критерії практичної доцільності впровадження запропонованого рішення.

Отже, оцінювання ефективності функціонування системи контролю дозволяє обґрунтувати її переваги як інтегрованого інструмента технічного спостереження за опорною оптичною мережею. Використання комплексного підходу до оцінювання створює можливість не лише якісно описати сильні сторони системи, а й формально показати її здатність забезпечувати більш результативний контроль інфраструктури. Це, у свою чергу, створює необхідне підґрунтя для переходу до підрозділу, у якому буде сформульовано задачу практичної реалізації програмно-аналітичного модуля системи.

3.6 Постановка задачі практичної реалізації програмно-аналітичного модуля

Розглянуті в попередніх підрозділах моделі, методи та алгоритмічні підходи формують теоретичну основу побудови кіберфізичної системи контролю опорної оптичної мережі. Проте для переходу від концептуального рівня до практичного використання необхідно конкретизувати задачу реалізації програмно-аналітичного модуля, який повинен забезпечувати взаємодію між контуром збору даних, середовищем їх накопичення, аналітичним опрацюванням і формуванням результатів для оператора або суміжних систем керування. Саме цей модуль виступає центральною цифровою ланкою всієї системи, оскільки він об'єднує інформаційні потоки та забезпечує виконання основних функцій контролю.

Потреба в такому модулі пояснюється тим, що наявність вимірювального обладнання та каналів отримання телеметрії сама по собі не створює завершеного рішення. Без програмно-аналітичного середовища результати фізичних вимірювань і мережевих параметрів залишаються розрізненими наборами значень,

які потребують ручного аналізу. Унаслідок цього втрачається значна частина потенційних переваг кіберфізичного підходу, зокрема можливість своєчасної кореляції подій, автоматизованого виявлення відхилень, накопичення історії спостережень та формування практично придатних експлуатаційних висновків. Через це задача практичної реалізації програмно-аналітичного модуля є логічним завершенням методичного опрацювання третього розділу.

У загальному вигляді програмно-аналітичний модуль повинен забезпечувати виконання кількох взаємопов'язаних функцій. По-перше, він має приймати дані з підсистеми фізичних вимірювань та телеметричного контуру, виконуючи їхнє приведення до узгодженого формату. По-друге, повинен підтримувати накопичення подій і параметрів у структурованому вигляді, придатному для подальшого аналізу. По-третє, у його межах має здійснюватися аналітичне опрацювання даних, що включає оцінювання стану об'єктів, кореляцію подій, виявлення аномалій та формування показників пріоритету реагування. По-четверте, модуль повинен забезпечувати подання результатів у зручній формі для експлуатаційного використання.

Під час постановки задачі реалізації необхідно враховувати, що програмно-аналітичний модуль не повинен розглядатися як ізольований додаток із локальною логікою роботи. Його доцільно трактувати як компонент загального цифрового середовища, який взаємодіє з джерелами даних, сховищем подій і метрик, засобами візуалізації та системами технічного супроводу. Саме така інтерпретація дозволяє пов'язати модуль з усією архітектурою запропонованої системи та уникнути фрагментарності під час подальшої реалізації.

На цьому етапі задача може бути сформульована як розроблення програмно-аналітичного модуля, призначеного для приймання, накопичення, інтеграції, аналізу та подання даних про стан опорної оптичної телекомунікаційної мережі, отриманих на основі фізичних вимірювань на «темних» волокнах і телеметрії активного обладнання. Такий модуль повинен забезпечувати підтримку виявлення аномалій, локалізації проблемних ділянок та формування інформаційної основи для експлуатаційних рішень.

Для досягнення цього в межах реалізації мають бути вирішені кілька конкретних підзадач. Передусім необхідно визначити спосіб подання вхідних даних і розробити структури, у яких будуть зберігатися результати фізичних вимірювань, телеметричні параметри, події та аналітичні висновки. Далі потрібно реалізувати механізм приймання та попередньої обробки інформації, який забезпечуватиме перевірку цілісності записів, часову синхронізацію та просторову прив'язку до конкретних елементів мережі. Окремим завданням є реалізація процедур кореляції, оцінювання аномальності та формування пріоритету реагування відповідно до моделей, розглянутих у попередніх підрозділах.

Не менш важливим є питання організації вихідного представлення результатів. Програмно-аналітичний модуль повинен не лише виконувати внутрішні обчислення, а й надавати результат у формі, придатній для практичного використання. Це означає, що в його межах має бути передбачене формування зведених повідомлень про стан мережі, відображення критичних подій, подання інформації про локалізацію проблемної ділянки та збереження історії раніше виявлених відхилень. У такому випадку результати роботи модуля будуть корисними як для безпосереднього спостереження, так і для подальшого аналізу або технічного супроводу.

З точки зору логіки роботи програмно-аналітичний модуль повинен реалізовувати послідовність, що відповідає загальному циклу функціонування системи: приймання даних, перевірка й нормалізація, запис до сховища, аналітичне опрацювання, формування висновку та подання результату. Така побудова забезпечує відповідність між теоретичною моделлю функціонування системи та її практичною реалізацією. Водночас вона спрощує подальше розширення модуля, оскільки кожен етап може бути деталізований або вдосконалений окремо.

У межах постановки задачі доцільно також визначити вимоги до програмно-аналітичного модуля. До основних із них належать структурна узгодженість із загальною архітектурою системи, можливість роботи з різномірними потоками даних, підтримка накопичення історії змін, придатність до реалізації алгоритмів аналітичного опрацювання, наочність результатів і можливість інтеграції з

операторським середовищем. Додатково слід враховувати вимоги до надійності функціонування, оскільки модуль повинен забезпечувати стабільну обробку даних навіть за умови збільшення їх обсягу або кількості контрольованих об'єктів.

У підсумку постановка задачі практичної реалізації програмно-аналітичного модуля завершує третій розділ і виконує роль переходу до наступного етапу роботи, присвяченого реалізації та налаштуванню системи. На цьому рівні вже сформовано теоретичну основу, визначено логіку функціонування, моделі подання даних, методи кореляції, алгоритми виявлення аномалій та підхід до підтримки рішень. Це створює достатню базу для переходу до практичного опрацювання цифрового ядра системи контролю.

3.7 Висновки до розділу 3

У третьому розділі було сформовано методичну основу аналітичного рівня кіберфізичної системи контролю опорної оптичної телекомунікаційної мережі. Основну увагу зосереджено на тих моделях, методах і алгоритмах, які забезпечують перехід від простого накопичення фізичних і телеметричних даних до їх змістовного опрацювання, виявлення відхилень та формування обґрунтованих експлуатаційних висновків. За рахунок цього розділ виконує центральну роль у побудові всієї логіки системи, оскільки саме тут було визначено, яким чином цифрове середовище повинно інтерпретувати стан контрольованої інфраструктури.

На початку розділу було розроблено модель подання стану волоконно-оптичної інфраструктури в цифровому середовищі. Показано, що стан мережі доцільно описувати не окремими фрагментарними параметрами, а у вигляді структурованої сукупності характеристик, подій, часових ознак та топологічних зв'язків. Такий підхід дозволяє подати контрольовану інфраструктуру як набір цифрових об'єктів, для кожного з яких може бути визначено поточний стан, історію змін і зв'язок із сусідніми елементами мережі. Це створює основу для подальшого аналітичного опрацювання та забезпечує узгоджене цифрове відображення фізичного середовища.

У подальшому було обґрунтовано метод кореляції фізичних вимірювань і телеметричних даних. Його застосування дозволяє поєднати результати спостереження за станом «темних» волокон із параметрами активного обладнання та розглядати їх не ізольовано, а як взаємопов'язані прояви єдиного процесу. За рахунок урахування часової, просторової та змістової узгодженості подій підвищується достовірність аналітичних висновків, знижується кількість хибних збігів і створюються умови для більш точного тлумачення ситуацій, що виникають у мережі.

Одним із найважливіших результатів розділу стало розроблення алгоритму виявлення аномалій та локалізації проблемних ділянок. У його межах було враховано базовий профіль нормального стану, поточні відхилення фізичних і телеметричних параметрів, а також результати кореляції між джерелами даних. Показано, що такий алгоритм дозволяє не лише фіксувати критичні порушення, а й виявляти початкові ознаки деградаційних процесів, які ще не перейшли в аварійну фазу. Практична цінність цього підходу полягає в можливості скоротити область пошуку проблеми та зменшити час технічної діагностики.

Наступним важливим елементом стало формування методу підтримки прийняття експлуатаційних рішень. Було встановлено, що аналітичний результат повинен містити не лише факт наявності аномалії, а й рівень її критичності, можливий вплив на функціонування мережі та підставу для вибору подальших дій. Унаслідок цього система контролю набуває практичної завершеності, оскільки результати оброблення можуть бути використані для організації технічного реагування, уточнення стану окремих ділянок або підготовки профілактичних заходів.

Окрему увагу в розділі було приділено оцінюванню ефективності функціонування системи контролю. Показано, що ефективність доцільно розглядати як комплексну характеристику, яка охоплює своєчасність виявлення відхилень, точність локалізації проблемних ділянок, достовірність аналітичних висновків, повноту охоплення контрольованої інфраструктури та придатність системи до підтримки експлуатаційних рішень. Такий підхід дозволяє оцінювати

запропоноване рішення не лише якісно, а й у формалізованому вигляді, що є важливим для подальшого обґрунтування його практичної доцільності.

Завершенням розділу стала постановка задачі практичної реалізації програмно-аналітичного модуля. У межах цього підходу було визначено, що цифрове ядро системи повинно забезпечувати приймання, нормалізацію, накопичення, аналітичне опрацювання та подання результатів моніторингу у формі, придатній для практичного використання. Це дозволило поєднати розглянуті теоретичні положення з майбутнім етапом реалізації та перейти від моделювання логіки роботи системи до її програмно-технічного втілення.

У підсумку третій розділ сформував цілісний аналітичний базис кіберфізичної системи контролю опорної мережі. Розроблені моделі, методи та алгоритми створюють достатню основу для подальшої практичної реалізації системи, її налаштування та демонстрації роботи в типовому експлуатаційному сценарії. Саме це визначає логічний перехід до четвертого розділу, у якому доцільно зосередитися на програмно-аналітичній реалізації та організації взаємодії основних компонентів запропонованого рішення.

4 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА НАЛАШТУВАННЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ

4.1 Вибір засобів реалізації програмно-аналітичної частини системи

У процесі практичної реалізації програмно-аналітичної частини системи контролю було обрано та налаштовано набір програмних засобів, які забезпечили приймання даних, їх накопичення, аналітичне опрацювання та подання результатів оператору. Під час вибору інструментів було враховано необхідність роботи з різнорідними потоками інформації, що надходять із підсистеми фізичних вимірювань і телеметричного контуру, а також потребу в реалізації серверної логіки, збереженні історії подій та формуванні підсумкових повідомлень про стан мережі.

Для реалізації серверної частини було використано мову програмування Python. Її застосування дало змогу реалізувати оброблення вхідних повідомлень, аналітичні процедури, взаємодію з базою даних та службову логіку системи в межах єдиного програмного середовища.

Для побудови серверного застосунку було використано фреймворк FastAPI. На його основі реалізовано приймання запитів від зовнішніх джерел даних, передавання інформації до внутрішніх модулів системи та формування відповідей у стандартизованому форматі. Завдяки цьому програмно-аналітична частина набула вигляду окремого сервісу, який об'єднує приймання фізичних вимірювань, телеметричних параметрів і подальше аналітичне опрацювання.

Для накопичення подій, метрик і результатів оброблення було використано PostgreSQL. У базі даних було організовано збереження відомостей про контрольовані об'єкти, результати фізичних вимірювань, телеметричні записи, аналітичні оцінки та журнали сповіщень.

У межах реалізації було сформовано кілька основних програмних модулів: модуль приймання фізичних вимірювань, модуль приймання телеметричних даних, модуль запису до бази даних, модуль кореляції подій, модуль оцінювання аномальності та модуль формування повідомлень для оператора.

На етапі налаштування середовища було створено окремий проєкт серверного застосунку з поділом на каталоги для моделей даних, маршрутів API, сервісної логіки та аналітичних процедур. Це дозволило відокремити оброблення вхідних повідомлень від алгоритмічної частини та зберегти зрозумілу структуру програмного коду.

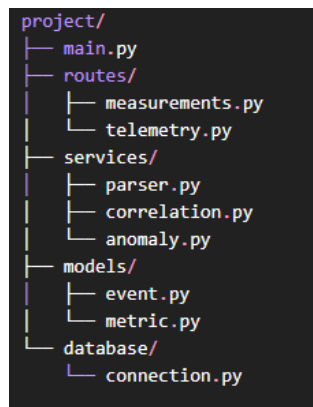


Рисунок 4.1 – Структура проєкту

Головний файл запуску серверної частини було реалізовано у вигляді окремого застосунку:

```

from fastapi import FastAPI
from routes.measurements import router as measurements_router
from routes.telemetry import router as telemetry_router

app = FastAPI(title="Optical Network Control System")

app.include_router(measurements_router, prefix="/measurements")
app.include_router(telemetry_router, prefix="/telemetry")
  
```

Налаштування підключення до бази даних було винесено в окремий модуль, що спростило подальшу роботу із запитамми та записом інформації:

```

import psycopg2

connection = psycopg2.connect(
    dbname="optic_monitoring",
    user="postgres",
    password="admin",
    host="localhost",
    port="5432"
  
```

)

Для запуску серверного застосунку було використано стандартну команду:

```
uvicorn main:app --reload
```

У результаті виконаного налаштування було створено програмне середовище, у межах якого реалізовано основні функції приймання, збереження та первинного опрацювання даних (рисунок 4.1). Це дало змогу перейти до наступного етапу - реалізації модуля збору та передавання даних від підсистем фізичних вимірювань і телеметрії до центрального аналітичного контуру системи.

4.2 Реалізація модуля збору та передавання даних

На наступному етапі було реалізовано модуль збору та передавання даних, який забезпечив надходження інформації від підсистеми фізичних вимірювань і телеметричного контуру до центральної програмно-аналітичної частини системи.

Під час реалізації було враховано, що дані надходять із різних джерел і мають неоднакову структуру. Результати фізичних вимірювань містять ідентифікатор ділянки, часову мітку, значення загасання, показник відбиття та службовий опис події.

Для приймання фізичних вимірювань було створено окремий серверний маршрут. Він приймає вхідне повідомлення у форматі JSON, перевіряє наявність основних полів, виконує первинне перетворення типів даних і передає результат у сервіс запису. У реалізованому варіанті це було оформлено так:

```
from fastapi import APIRouter
from pydantic import BaseModel
from services.parser import normalize_measurement
from services.storage import save_measurement

router = APIRouter()

class MeasurementIn(BaseModel):
    segment_id: str
    timestamp: str
    attenuation: float
```

```

    reflection: float
    event_type: str

    @router.post("/")
    def receive_measurement(data: MeasurementIn):
        normalized = normalize_measurement(data.dict())
        save_measurement(normalized)
        return {"status": "accepted"}

```

Наявність окремої вхідної моделі дозволила одразу обмежити склад повідомлення та уникнути потрапляння до системи неповних або некоректних записів. Після приймання кожен запис проходив процедуру нормалізації. На цьому етапі виконувалося приведення часу до єдиного формату, очищення службових полів, перетворення числових значень та формування уніфікованої внутрішньої структури даних.

Аналогічно було реалізовано маршрут приймання телеметрії. Його побудовано окремо, оскільки структура телеметричних повідомлень відрізняється від результатів фізичних вимірювань, але загальна логіка роботи залишилася однаковою:

```

from fastapi import APIRouter
from pydantic import BaseModel
from services.parser import normalize_telemetry
from services.storage import save_telemetry

router = APIRouter()

class TelemetryIn(BaseModel):
    node_id: str
    interface_id: str
    timestamp: str
    optical_power: float
    error_count: int
    channel_state: str

    @router.post("/")
    def receive_telemetry(data: TelemetryIn):
        normalized = normalize_telemetry(data.dict())
        save_telemetry(normalized)
        return {"status": "accepted"}

```

Окрему увагу було приділено нормалізації повідомлень. Без цього етапу подальше накопичення й аналітичне опрацювання були б ускладнені, оскільки різні

джерела могли б передавати час у різному форматі, використовувати неоднакові назви полів або мати службові значення, непридатні для прямого запису в базу даних. Для усунення цієї проблеми було реалізовано окремі функції нормалізації, одна з яких наведена нижче:

```
from datetime import datetime

def normalize_measurement(data: dict) -> dict:
    return {
        "object_type": "measurement",
        "object_id": data["segment_id"],
        "event_time":
datetime.fromisoformat(data["timestamp"]),
        "attenuation": float(data["attenuation"]),
        "reflection": float(data["reflection"]),
        "event_type": data["event_type"].strip().lower()
    }
```

Унаслідок цього фізичні вимірювання і телеметричні повідомлення вже на ранньому етапі набували спільної логіки подання.

Для передавання даних до підсистеми збереження було використано окремий сервісний шар. Такий підхід дозволив відокремити логіку роботи API від операцій запису й забезпечити більш зручну структуру програмного коду. Запис фізичних вимірювань до бази даних реалізовано через окрему функцію:

```
from database.connection import connection

def save_measurement(data: dict):
    cursor = connection.cursor()
    cursor.execute("""
        INSERT INTO measurements (object_id, event_time,
attenuation, reflection, event_type)
        VALUES (%s, %s, %s, %s, %s)
    """, (
        data["object_id"],
        data["event_time"],
        data["attenuation"],
        data["reflection"],
        data["event_type"]
    ))
    connection.commit()
    cursor.close()
```

Подібний підхід було застосовано і для телеметричних записів. Це дало змогу стандартизувати процедуру оброблення даних: приймання повідомлення, нормалізація, передавання до сервісу запису, підтвердження приймання. Така послідовність добре узгоджується з функціональною логікою всієї системи та забезпечує зрозумілу організацію програмного модуля.

Для перевірки роботи модуля було виконано тестове надсилання повідомлень до серверного застосунку. У результаті виконання такого запиту система приймала повідомлення, виконувала його нормалізацію, зберігала в базі даних і повертала службову відповідь про успішне приймання.

У підсумку реалізація модуля збору та передавання даних забезпечила практичне надходження фізичних вимірювань і телеметричних параметрів до центральної частини системи. Це створило технічну основу для наступного підпункту, у якому буде розглянуто реалізацію сховища подій, параметрів і результатів моніторингу.

4.3 Реалізація сховища подій, параметрів і результатів моніторингу

Після реалізації модуля збору та передавання даних було побудовано сховище, призначене для накопичення фізичних вимірювань, телеметричних параметрів, службових подій і результатів аналітичного опрацювання. Наявність такого сховища є обов'язковою умовою функціонування всієї системи, оскільки без нього отримані дані могли б використовуватися лише в момент надходження, без можливості подальшого аналізу, порівняння з попередніми станами та формування історії змін

У межах практичної реалізації було прийнято рішення розділити сховище на кілька логічно пов'язаних таблиць. За рахунок цього структура бази даних залишилася зрозумілою, придатною до розширення і зручною для подальших запитів. Окреме збереження різних типів інформації також спростило зв'язування подій із конкретними сегментами мережі та часовими мітками.

На першому етапі було створено таблицю контрольованих об'єктів. Вона зберігає основні відомості про сегменти мережі, які підлягають контролю: ідентифікатор, назву, тип об'єкта та короткий опис. Саме ця таблиця стала основою для подальшого зв'язування всіх інших даних, оскільки кожен запис фізичного вимірювання або телеметричної події повинен бути співвіднесений із конкретним об'єктом інфраструктури.

Після цього було реалізовано таблицю фізичних вимірювань, у якій накопичуються параметри, отримані з підсистеми контролю «темних» волокон. У її межах зберігаються ідентифікатор контрольованого об'єкта, час фіксації, значення загасання, показник відбиття та тип виявленої події. Така структура дозволяє не лише накопичувати окремі значення, а й простежувати їх зміну в часі для кожної ділянки мережі.

Окремо було створено таблицю телеметричних записів. У ній зберігаються дані, що надходять від активного обладнання: ідентифікатор вузла, інтерфейсу або сегмента, час фіксації, рівень оптичної потужності, кількість помилок та поточний стан каналу. Це дозволило накопичувати параметри експлуатаційного рівня окремо від фізичних вимірювань, але з можливістю подальшого аналітичного поєднання.

Для збереження результатів аналітичного опрацювання було реалізовано окрему таблицю аномалій. Завдяки цьому система отримала можливість не лише виявляти аномалії в поточний момент, а й накопичувати історію аналітичних оцінок, що є важливим для подальшого аналізу повторюваних інцидентів.

Окрему увагу було приділено службовим зв'язкам між таблицями. Хоча в наведеному варіанті прикладу для спрощення використовуються символічні ідентифікатори, у практичній реалізації записи було організовано так, щоб кожен аналітичний результат міг бути пов'язаний із відповідним контрольованим об'єктом і часовим інтервалом.

Після створення таблиць було реалізовано початкове наповнення довідника об'єктів. Це дало змогу одразу прив'язувати вхідні події до конкретних сегментів мережі без додаткового ручного уточнення.

На рівні серверної частини було реалізовано окремий модуль підключення до бази даних, який використовується всіма сервісами запису. Це дозволило винести налаштування з'єднання в окремий файл і не дублювати код у різних частинах застосунку. Для цього було створено такий фрагмент:

```
import psycopg2

def get_connection():
    return psycopg2.connect(
        dbname="optic_monitoring",
        user="postgres",
        password="admin",
        host="localhost",
        port="5432"
    )
```

Запис аналітичного результату до таблиці аномалій було реалізовано у вигляді окремої функції:

```
from database.connection import get_connection

def save_anomaly(object_id, detected_time, anomaly_score,
priority_score, status, conclusion):
    connection = get_connection()
    cursor = connection.cursor()
    cursor.execute("""
        INSERT INTO anomalies (object_id, detected_time,
anomaly_score, priority_score, status, conclusion)
        VALUES (%s, %s, %s, %s, %s, %s)
        """, (object_id, detected_time, anomaly_score,
priority_score, status, conclusion))
    connection.commit()
    cursor.close()
    connection.close()
```

Для перевірки коректності роботи сховища було виконано тестове зчитування останніх записів фізичних вимірювань. Це дозволило переконатися, що дані успішно накопичуються та можуть бути використані аналітичним модулем у подальшій роботі.

```
from database.connection import get_connection

connection = get_connection()
cursor = connection.cursor()
```

```

        cursor.execute("SELECT object_id, event_time, attenuation,
reflection FROM measurements ORDER BY event_time DESC LIMIT 5")
        rows = cursor.fetchall()
        for row in rows:
            print(row)
        cursor.close()
        connection.close()

```

У результаті реалізації сховища було сформовано стійку основу для збереження всієї інформації, з якою працює система контролю.

4.4 Реалізація аналітичного модуля виявлення відхилень і формування сповіщень

Після побудови сховища подій, параметрів і результатів моніторингу було реалізовано аналітичний модуль, який виконує виявлення відхилень у стані контрольованих об'єктів, оцінювання рівня аномальності та формування сповіщень для оператора.

На першому етапі роботи модуля було реалізовано механізм отримання останніх фізичних вимірювань і телеметричних записів для конкретного сегмента мережі. Це дозволило виконувати аналіз не над усім масивом накопичених даних одразу, а над обмеженим набором актуальних значень, що відповідає логіці поточного оцінювання стану. Для цього було створено функцію отримання останнього фізичного вимірювання:

```

from database.connection import get_connection

def get_latest_measurement(object_id):
    connection = get_connection()
    cursor = connection.cursor()
    cursor.execute("""
        SELECT attenuation, reflection, event_time
        FROM measurements
        WHERE object_id = %s
        ORDER BY event_time DESC
        LIMIT 1
    """, (object_id,))
    row = cursor.fetchone()
    cursor.close()
    connection.close()

```

```
return row
```

Аналогічно було реалізовано отримання останнього телеметричного запису, пов'язаного з відповідним сегментом або вузлом. У практичній реалізації такі запити стали основою для подальшого розрахунку аналітичних показників.

Після вибірки даних було реалізовано блок порівняння з базовими значеннями. Для спрощення реалізації базові профілі задано у вигляді нормативних порогів для фізичних і телеметричних параметрів. Відхилення фізичних параметрів було обчислено так:

```
def calculate_physical_deviation(attenuation, reflection):
    base_attenuation = 0.30
    base_reflection = -35.0

    delta_att = max(0, attenuation - base_attenuation)
    delta_ref = max(0, abs(reflection - base_reflection) / 10)

    return round(delta_att + delta_ref, 4)
```

У цьому фрагменті було прийнято, що перевищення базового рівня загасання та суттєве відхилення показника відбиття формують сумарний рівень фізичного відхилення. Такий підхід не претендує на роль універсальної моделі для всіх типів мереж, але є достатнім для демонстрації логіки функціонування аналітичного модуля в межах практичної реалізації.

Для телеметричних параметрів було реалізовано окрему функцію. У ній враховано рівень оптичної потужності та кількість помилок, що дозволило відобразити типові симптоми погіршення каналу:

```
def calculate_telemetry_deviation(optical_power, error_count):
    base_power = -18.0
    max_errors = 10

    delta_power = max(0, abs(optical_power - base_power) / 5)
    delta_errors = min(error_count / max_errors, 1)

    return round(delta_power + delta_errors, 4)
```

Після цього було реалізовано розрахунок інтегрального показника аномальності. У його основу покладено модель, сформовану в третьому розділі, але

в адаптованому для програмної реалізації вигляді. У межах цього модуля показник кореляції задається на основі збігу фізичних і телеметричних відхилень у межах одного часово-просторового інтервалу, а коефіцієнт історії визначається за кількістю подібних подій, раніше зафіксованих для цього об'єкта. Такий підхід дозволив не лише оцінювати поточний стан, а й урахувати накопичувальний характер проблеми.

Після визначення рівня аномальності було реалізовано процедуру формування пріоритету реагування. Для цього було використано спрощений варіант інтегральної оцінки, що враховує сам показник аномальності, критичність ділянки та повторюваність інцидентів. На практиці це було оформлено так:

```
def calculate_priority_score(anomaly_score, criticality,
history_score):
    mu = 0.5
    nu = 0.3
    sigma = 0.2

    priority = mu * anomaly_score + nu * criticality + sigma *
history_score
    return round(priority, 4)
```

Для практичної інтерпретації результатів було введено три рівні пріоритету: низький, середній і високий. Це дозволило відразу перетворювати числову оцінку на зрозумілий оператору статус. Класифікацію реалізовано в окремій функції:

```
def classify_priority(priority_score):
    if priority_score >= 0.75:
        return "high"
    elif priority_score >= 0.40:
        return "medium"
    return "low"
```

Після завершення розрахунків модуль формував текстовий висновок про стан контрольованого об'єкта. Для цього було використано короткий шаблон, який містить ідентифікатор сегмента, рівень аномальності та встановлений пріоритет реагування.

Отриманий висновок разом із числовими оцінками записувався до таблиці аномалій, що забезпечило не лише поточне інформування, а й накопичення історії

аналітичних рішень у базі даних. За рахунок цього система отримала можливість відстежувати повторювані ситуації та надалі використовувати їх як частину контексту під час наступних обчислень.

Для запуску повного циклу аналізу було реалізовано окрему процедуру, яка послідовно виконує зчитування актуальних даних, обчислення відхилень, визначення інтегральних показників і збереження результату:

```

from datetime import datetime
from services.storage import save_anomaly

def run_analysis(object_id, optical_power, error_count,
attenuation, reflection):
    delta_p = calculate_physical_deviation(attenuation,
reflection)
    delta_t = calculate_telemetry_deviation(optical_power,
error_count)

    correlation_score = 0.8 if delta_p > 0 and delta_t > 0 else
0.2
    history_score = 0.3
    criticality = 0.7

    anomaly_score = calculate_anomaly_score(delta_p, delta_t,
correlation_score, history_score)
    priority_score = calculate_priority_score(anomaly_score,
criticality, history_score)
    priority_status = classify_priority(priority_score)
    conclusion = build_conclusion(object_id, anomaly_score,
priority_status)

    save_anomaly(object_id, datetime.now(), anomaly_score,
priority_score, priority_status, conclusion)
    return conclusion

```

У результаті реалізації аналітичного модуля було забезпечено практичне виявлення відхилень і формування сповіщень на основі вже накопичених у системі даних. Це дозволило завершити побудову аналітичного ядра системи та підготувати підґрунтя для наступного етапу - інтеграції із середовищем оператора та зовнішніми системами керування мережею.

4.5 Інтеграція системи з операторським середовищем та NMS/OSS

Після реалізації модуля збору даних, побудови сховища та впровадження аналітичного контуру було виконано інтеграцію системи контролю з операторським середовищем і зовнішніми платформами керування мережею. Цей етап мав принципове значення, оскільки саме він забезпечив перехід від локально працюючого програмно-аналітичного модуля до повноцінного інструмента експлуатаційного використання. У результаті інтеграції сформовані системою події, попередження та аналітичні висновки стали доступними не лише всередині серверного застосунку, а й у середовищі, з яким безпосередньо працює оператор.

На практичному рівні інтеграція була реалізована у двох напрямках. Перший із них полягав у створенні операторського веб-інтерфейсу для перегляду поточного стану контрольованих об'єктів, журналу подій та результатів аналітичного опрацювання. Другий напрям передбачав передавання сформованих системою повідомлень до зовнішніх засобів керування мережею через API.

У межах операторського середовища було реалізовано окремий маршрут, який формує список останніх виявлених аномалій і передає його до веб-інтерфейсу. Для цього на серверному рівні було створено функцію вибірки останніх аналітичних записів із таблиці аномалій:

```
from database.connection import get_connection

def get_latest_anomalies(limit=20):
    connection = get_connection()
    cursor = connection.cursor()
    cursor.execute("""
        SELECT object_id, detected_time, anomaly_score,
priority_score, status, conclusion
        FROM anomalies
        ORDER BY detected_time DESC
        LIMIT %s
    """, (limit,))
    rows = cursor.fetchall()
    cursor.close()
    connection.close()
    return rows
```

На основі цієї функції було реалізовано маршрут для перегляду подій у веб-інтерфейсі.

Такий спосіб реалізації дав змогу швидко сформувавши просте операторське представлення без ускладнення інтерфейсу надлишковими елементами. У практичній частині цього виявилось достатньо для демонстрації того, що результати роботи аналітичного модуля стають доступними у зручному для перегляду форматі й можуть бути використані під час технічного супроводу мережі.

Окрім перегляду журналу подій, було реалізовано окремий маршрут для отримання зведеного стану конкретного контрольованого об'єкта. Для цього було створено такий маршрут:

```
from fastapi import APIRouter
from services.object_state import get_object_state

router = APIRouter()

@router.get("/object/{object_id}")
def object_state(object_id: str):
    state = get_object_state(object_id)
    return {
        "object_id": object_id,
        "latest_measurement": state["measurement"],
        "latest_telemetry": state["telemetry"],
        "latest_anomaly": state["anomaly"]
    }
```

Функція `get_object_state()` об'єднувала дані з таблиць фізичних вимірювань, телеметрії та аналітичних висновків, що дозволило подати оператору стисле зведення щодо стану вибраного сегмента. Саме така інтеграція стала практичним підтвердженням того, що розроблена система не лише накопичує дані, а й забезпечує їх використання на рівні конкретних об'єктів інфраструктури.

Другим важливим напрямом інтеграції стало передавання подій до зовнішніх систем керування мережею. У межах реалізації було передбачено REST-інтерфейс, через який зовнішнє середовище могло отримувати сформовані сповіщення. Це дозволило включити результати аналітичного контролю до загального

експлуатаційного контуру, де вони можуть бути використані разом з іншими засобами спостереження та реагування.

Цей механізм було підключено до процедури завершення аналітичного опрацювання. Після того як система визначала пріоритет реагування і формувала текстовий висновок, інформація не лише зберігалася у внутрішньому сховищі, а й передавалася до зовнішнього сервісу.

У межах тестового сценарію роль зовнішнього NMS/OSS-середовища виконував окремий локальний сервіс, який приймав повідомлення та реєстрував їх як вхідні події. Це дозволило перевірити сам принцип інтеграції без необхідності підключення до реальної промислової системи керування мережею. У результаті було підтверджено, що аналітичні результати можуть бути передані за межі внутрішнього середовища контролю та використані в суміжних експлуатаційних процесах.

Окрему увагу під час інтеграції було приділено структурі повідомлень. Вона повинна бути достатньо простою, щоб не ускладнювати приймання на стороні NMS/OSS, але водночас містити ключову інформацію про виявлену подію: джерело, контрольований об'єкт, оцінку аномальності, рівень пріоритету та текстовий висновок. Така структура виявилася придатною для подальшого журналювання, сортування та використання в операторському середовищі.

У результаті виконаної інтеграції система контролю набула завершеного практичного вигляду. Вона отримала власний операторський інтерфейс для перегляду результатів моніторингу та механізм взаємодії із зовнішніми платформами керування мережею. Це забезпечило включення аналітичного модуля до загального експлуатаційного контуру та створило необхідну основу для завершального підпункту, у якому буде наведено приклад функціонування системи в типовому експлуатаційному сценарії.

4.6 Приклад функціонування системи в типовому експлуатаційному сценарії

Для перевірки працездатності реалізованої системи було відтворено типовий експлуатаційний сценарій, у межах якого на контрольованій ділянці опорної оптичної мережі виникає відхилення, що проявляється одночасно на рівні фізичних вимірювань і в телеметричних параметрах активного обладнання. Метою цього етапу було показати послідовність роботи всієї програмно-аналітичної частини системи - від моменту надходження вхідних даних до формування підсумкового повідомлення для оператора та передавання результату до зовнішнього середовища керування мережею.

У межах сценарію як контрольований об'єкт було використано сегмент SEG-01, який відповідає ділянці магістральної волоконно-оптичної лінії між двома вузлами транспортної мережі. Для цього об'єкта в базі даних попередньо було створено службовий запис, що дозволило прив'язувати до нього результати фізичних вимірювань, телеметричні події та аналітичні висновки. Після цього до системи було подано тестове повідомлення від підсистеми фізичних вимірювань, яке імітувало збільшення загасання та зміну рівня відбиття на контрольованій ділянці.

Після надсилання цього повідомлення через маршрут приймання фізичних вимірювань система виконала його нормалізацію, перетворення часової мітки, уніфікацію полів і запис до таблиці `measurements`. У журналі сервера було зафіксовано успішне приймання, а в базі даних з'явився новий запис, пов'язаний з об'єктом SEG-01.

Наступним кроком було подано телеметричне повідомлення від активного обладнання, яке обслуговує відповідний сегмент мережі. У ньому відображалось зниження оптичної потужності та збільшення кількості помилок передавання. Така комбінація параметрів відповідає ситуації, у якій фізичні зміни в лінії вже починають впливати на експлуатаційні характеристики каналу.

Після накопичення обох типів даних було запущено процедуру аналітичного опрацювання для контрольованого об'єкта SEG-01. У межах цього кроку система виконала вибір останніх записів, обчислила фізичне відхилення, телеметричне відхилення, інтегральний показник аномальності та пріоритет реагування. Запуск цього етапу було оформлено окремим викликом:

У процесі виконання аналізу система спочатку порівняла фізичні параметри з базовими значеннями для контрольованої ділянки. Було встановлено, що загасання перевищує нормативний рівень, а показник відбиття також відхиляється від базового профілю. Після цього було виконано оцінювання телеметричного стану, у межах якого зафіксовано помітне зниження оптичної потужності та перевищення допустимого рівня помилок. Наявність таких збігів у межах одного часового інтервалу дозволила сформувати підвищений показник кореляції між фізичними й телеметричними подіями.

За результатами розрахунку система сформувала інтегральний показник аномальності та показник пріоритету реагування. Для цього сценарію було отримано високий рівень аномальності, а підсумковий статус реагування визначено як high. Відповідно до закладеної логіки, це означало, що виявлене відхилення має суттєвий вплив на стан контрольованої ділянки й потребує оперативної уваги експлуатаційного персоналу.

Окрім внутрішнього збереження, система також сформувала структуроване повідомлення для зовнішнього сервісу керування мережею. До складу цього повідомлення увійшли джерело події, ідентифікатор контрольованого об'єкта, числовий показник аномальності, рівень пріоритету та текст висновку. Після цього повідомлення було передано через REST-запит до тестового NMS/OSS-сервісу, який успішно прийняв подію та зареєстрував її як зовнішнє експлуатаційне сповіщення.

У результаті проведеного сценарного випробування було підтверджено, що реалізована система коректно виконує всі основні функції: приймає фізичні й телеметричні дані, зберігає їх у структурованому вигляді, виконує аналітичне опрацювання, виявляє відхилення, формує повідомлення для оператора та

забезпечує передавання результату до зовнішнього середовища. Це свідчить про працездатність побудованої програмно-аналітичної частини та підтверджує можливість її використання як основи для контролю стану опорної оптичної мережі.

4.7 Висновки до розділу 4

У четвертому розділі було виконано практичну реалізацію програмно-аналітичної частини кіберфізичної системи контролю опорної оптичної телекомунікаційної мережі. Основну увагу зосереджено на побудові серверного середовища, організації приймання даних, реалізації сховища, аналітичного модуля, інтеграції з операторським середовищем та перевірці роботи системи в типовому експлуатаційному сценарії. Це дозволило перейти від теоретично обґрунтованої моделі до працездатного програмного рішення, яке відтворює основну логіку функціонування запропонованої системи контролю.

На початковому етапі було обрано та налаштовано засоби реалізації програмно-аналітичної частини. Побудову серверної логіки виконано із використанням Python та FastAPI, а для збереження подій, параметрів і результатів аналітичного опрацювання використано PostgreSQL.

У подальшому було реалізовано модуль збору та передавання даних, який забезпечив приймання повідомлень від підсистеми фізичних вимірювань і телеметричного контуру. Для цього створено окремі маршрути серверного застосунку, реалізовано вхідні моделі даних, процедури нормалізації повідомлень та функції передавання інформації до підсистеми збереження. У результаті система набула здатності працювати з реальними вхідними записами, а не лише з теоретично описаними потоками даних.

Важливим результатом розділу стала реалізація сховища подій, параметрів і результатів моніторингу. Було сформовано структуру бази даних, у межах якої окремо зберігаються контрольовані об'єкти, фізичні вимірювання, телеметричні записи та результати аналітичного опрацювання. Такий підхід забезпечив

накопичення історії станів мережі, можливість подальшого порівняння подій у часі та створив основу для функціонування аналітичного модуля.

У підсумку четвертий розділ підтвердив можливість практичного втілення запропонованої кіберфізичної системи контролю в межах програмно-аналітичного середовища. Реалізовані модулі забезпечили приймання, накопичення, аналіз і подання даних про стан опорної оптичної мережі, що створює основу для завершального узагальнення результатів у загальних висновках роботи.

ВИСНОВКИ

У роботі за результатами виконаних теоретичних і практичних напрацювань розроблено підхід до побудови кіберфізичної системи контролю опорної оптичної телекомунікаційної мережі з використанням «темних» оптичних волокон, що дозволяє поєднати фізичні вимірювання та телеметричні дані в єдиному інформаційному середовищі. Також дістала подальшого розвитку архітектура системи контролю, орієнтована на інтеграцію різномірних джерел даних і реалізацію аналітичних механізмів виявлення відхилень.

Поставлену мету було досягнуто шляхом розв'язання таких основних завдань:

- проаналізовано особливості функціонування опорних оптичних телекомунікаційних мереж та визначено основні фактори, що впливають на їх технічний стан;

- розглянуто існуючі методи фізичного моніторингу волоконно-оптичних ліній зв'язку та встановлено доцільність використання «темних» оптичних волокон як сенсорного середовища;

- досліджено телеметричні підходи до контролю стану мережевого обладнання та визначено їх обмеження у відриві від фізичного рівня;

- розроблено підхід до інтеграції різномірних даних у межах єдиного середовища подій і метрик, що забезпечує узгоджене оброблення інформації;

- обґрунтовано архітектуру кіберфізичної системи контролю, яка поєднує підсистеми збору, передавання, зберігання та аналітичного оброблення даних;

- сформовано узагальнену модель функціонування системи у вигляді циклу «вимірювання – передавання – накопичення – аналіз – рішення – дія»;

- реалізовано програмно-аналітичну частину системи контролю та досліджено її функціонування в умовах експлуатаційного сценарію.

У результаті виконаної роботи встановлено, що використання кіберфізичного підходу дозволяє підвищити ефективність контролю стану опорної оптичної мережі за рахунок поєднання фізичних і телеметричних даних. Запропоноване

рішення забезпечує підвищення точності виявлення відхилень, скорочення часу локалізації пошкоджень та покращення якості прийняття експлуатаційних рішень.

Отримані результати можуть бути використані при побудові та модернізації систем моніторингу волоконно-оптичної інфраструктури, а також створюють основу для подальшого розвитку методів автоматизованого аналізу та прогнозування стану телекомунікаційних мереж.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Karunakaran V., Natalino C., Shariati B. та ін. TAPI-based Telemetry Streaming in Multi-domain Optical Networks. *Optical Fiber Communication Conference*. 2024. Paper M3Z.9. DOI: 10.1364/OFC.2024.M3Z.9. URL: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?uri=ofc-2024-M3Z.9> (дата звернення: 24.02.2026).
2. González P., Alhamed F., Barzegar S. та ін. Distributed Multi-Agent System fed with Telemetry Data for Near-Real-Time Service Operation *OFC 2024*. 2024. Paper M3Z.12. DOI: 10.1364/OFC.2024.M3Z.12. URL: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=OFC-2024-M3Z.12> (дата звернення: 24.02.2026).
3. Shen S., Li H., Tyrovolas A. та ін. End-to-end QoT Predictions enhanced by GNPу-based Digital Twin with Network Telemetry *OFC 2024*. 2024. Paper Th2A.16. DOI: 10.1364/OFC.2024.Th2A.16. URL: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?uri=OFC-2024-Th2A.16> (дата звернення: 24.02.2026).
4. Azendorf F., Sandmann A., Eiselt M. Pressure Wave Detection and Localization in Deployed Underground Fiber using Coherent Correlation OTDR *OFC 2024*. 2024. Paper M2K.3. DOI: 10.1364/OFC.2024.M2K.3. URL: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?uri=OFC-2024-M2K.3> (дата звернення: 24.02.2026).
5. Yang X., Sun C., Charlet G., Tornatore M., Pointurier Y. Digital Twin-based Insertion Loss Estimator for Anomalous Loss Localization and Network Equalization Enhancement *OFC 2024*. 2024. Paper W4I.4. DOI: 10.1364/OFC.2024.W4I.4. URL: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=OFC-2024-W4I.4> (дата звернення: 24.02.2026).
6. Mayer K. S., Soares J. A., Dal Maso M. P. A. та ін. Network-wide QoT Estimation Using SGD with Gradient Transfer Between Wavelengths *OFC 2024*. 2024. Paper M1H.7. DOI: 10.1364/OFC.2024.M1H.7. URL: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?uri=OFC-2024-M1H.7> (дата звернення: 24.02.2026).

7. Mazur M. та ін. Continuous Distributed Phase and Polarization Monitoring *OFC* 2024. 2024. Paper Tu3J.1. DOI: 10.1364/OFC.2024.Tu3J.1. URL: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?uri=OFC-2024-Tu3J.1> (дата звернення: 24.02.2026).

8. (OFC) Digital Coherent Sensing over Deployed Fibers for Network-as-a-Sensor Applications *OFC* 2024. 2024. Paper Tu2J.1. URL: <https://opg.optica.org/ViewMedia.cfm?seq=0&uri=OFC-2024-Tu2J.1> (дата звернення: 24.02.2026).

9. Shen S., Han J., Bardhi K. та ін. Unified monitoring and telemetry platform supporting network intelligence in optical networks *Journal of Optical Communications and Networking*. 2025. Vol. 17. P. 139-151. DOI: 10.1364/JOCN.538552. URL: <https://opg.optica.org/jocn/abstract.cfm?uri=jocn-17-2-139> (дата звернення: 24.02.2026).

10. Castoldi P. та ін. Shaping the future of optical networks by integrating SDN, telemetry, and AI *Journal of Optical Communications and Networking*. 2025. Vol. 17. Article C51. URL: <https://opg.optica.org/jocn/abstract.cfm?uri=jocn-17-7-C51> (дата звернення: 24.02.2026).

11. Abdelli K. Zero-shot forecasting of optical network telemetry using large language models *Journal of Optical Communications and Networking*. 2025. Vol. 17. P. 1148-1160. DOI: 10.1364/JOCN.575791. URL: <https://opg.optica.org/jocn/abstract.cfm?uri=jocn-17-12-1148> (дата звернення: 24.02.2026).

12. Devigili M. та ін. Twining Digital Subcarrier Multiplexed Optical Signals With (...): (розширена стаття) *Journal of Lightwave Technology*. 2024. Vol. 43, No. 6. P. 2599-... URL: <https://opg.optica.org/viewmedia.cfm?r=1&seq=0&uri=jlt-43-6-2599> (дата звернення: 24.02.2026).

13. Wang Z. та ін. Phase-Sensitive OTDR Monitoring for Fault Detection in High-Density Multi-Branch Passive Optical Networks *Journal of Lightwave Technology*. 2025. Vol. 43, No. 22. P. 9962-... URL:

<https://opg.optica.org/viewmedia.cfm?html=true&seq=0&uri=jlt-43-22-9962> (дата звернення: 24.02.2026).

14. Cruzes S. Revolutionizing optical networks: The integration and impact of large language models *Optical Switching and Networking*. 2025. Article 100812. DOI: 10.1016/j.osn.2025.100812. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1573427725000190> (дата звернення: 24.02.2026).

15. Cruzes S. Telemetry and Agentic AI: Foundations for Optical Network Automation *IEEE Access*. 2026. Vol. 14. P. 8800-8838. DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3649768. URL: https://www.researchgate.net/publication/399217173_Telemetry_and_Agentic_AI_Foundations_for_Optical_Network_Automation (дата звернення: 24.02.2026).

16. Cruzes S. Telemetry and Agentic AI: Foundations for Optical Network Automation (preprint) *TechRxiv*. 2026. URL: https://www.techrxiv.org/users/693957/articles/1366877/master/file/data/Telemetry_and_Agentic_AI_Foundations_for_Optical_Network_Automation_v4/Telemetry_and_Agentic_AI_Foundations_for_Optical_Network_Automation_v4.pdf?inline=true (дата звернення: 24.02.2026).

17. Janz C. та ін. Invited paper: Network digital twins for optical networks *Optical Fiber Technology*. 2025. Article 104039. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1068520024004139> (дата звернення: 24.02.2026).

18. Song Y. та ін. Implementing Digital Twin in Field-Deployed Optical Networks *IEEE Network*. 2024. DOI: 10.1109/MNET.2023.3332893. URL: <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1109/MNET.2023.3332893> (дата звернення: 24.02.2026).

19. Ghazali M. F. та ін. State-of-The-Art application and challenges of optical fibre distributed acoustic sensing (DAS) ... *Optical Fiber Technology*. 2024. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1068520024002566> (дата звернення: 24.02.2026).

20. Fairweather D. M. та ін. Characterisation of the optical response to seismic waves ... in telecommunication submarine cables // *Scientific Reports*. 2024. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-83107-x> (дата звернення: 24.02.2026).

21. Kong Z. та ін. Submarine cable disturbance monitoring based on fiber optic distributed acoustic sensing *Proc. SPIE*. 2025. DOI: 10.1117/12.3059326. URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/13654/1365411/Submarine-cable-disturbance-monitoring-based-on-fiber-optic-distributed-acoustic/10.1117/12.3059326.full> (дата звернення: 24.02.2026).

22. Zhang X. та ін. Fiber-Optic Distributed Acoustic Sensing for Smart Grid ... *Photonics*. 2024. Vol. 12(1). Article 7. URL: <https://www.mdpi.com/2304-6732/12/1/7> (дата звернення: 24.02.2026).

23. Rashid A. та ін. Research Advances on Distributed Acoustic Sensing ... *Photonics*. 2025. Vol. 12(3). Article 196. URL: <https://www.mdpi.com/2304-6732/12/3/196> (дата звернення: 24.02.2026).

24. Abushagur A. A. G. та ін. Comparative Study of Distributed Acoustic Sensing in Telecommunication Cables *Sensors*. 2025. Vol. 25(24). Article 7600. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/24/7600> (дата звернення: 24.02.2026).

25. Liu H. та ін. OTDR Development Based on Single-Mode Fiber Fault ...: Review *Sensors*. 2025. Vol. 25(14). Article 4284. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/14/4284> (дата звернення: 24.02.2026).

26. Yatseev V. A. та ін. Novel Approach to Phase-Sensitive Optical Time-Domain Reflectometry ... *Sensors*. 2024. Vol. 24(5). Article 1656. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/5/1656> (дата звернення: 24.02.2026).

27. Khare P. та ін. Simulation and Modelling of C+L+S Multiband Optical Transmission ... (DT/QoT) *Sensors*. 2025. Vol. 25(6). Article 1948. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/6/1948> (дата звернення: 24.02.2026).

28. Liem A. T. та ін. Enhancing Tactile Internet Reliability: AI-Driven Resilience ... NG-EPONs *Photonics*. 2024. Vol. 11(10). Article 903. URL: <https://www.mdpi.com/2304-6732/11/10/903> (дата звернення: 24.02.2026).

29. Naito T. та ін. Real-Time Failure Prediction of ROADMs by GAN-... *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15(4). Article 2107. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/4/2107> (дата звернення: 24.02.2026).
30. Turov A. T. та ін. Comparison of the Sensitivity of Various Fibers in Distributed Acoustic Sensing *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14(22). Article 10147. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/22/10147> (дата звернення: 24.02.2026).
31. Pedersen H. B. та ін. A Feasibility Study of Automated Detection and ... (DAS on existing fibers) *Sensors*. 2025. Vol. 25(17). Article 5445. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/17/5445> (дата звернення: 24.02.2026).
32. Zhang Y. та ін. Distributed Acoustic Sensing of Urban Telecommunication ... *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15(24). Article 13145. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/24/13145> (дата звернення: 24.02.2026).
33. Gazani A. та ін. Optical Network Security: Threats, Techniques, and Future ... *Electronics*. 2026. Vol. 15(4). Article 878. URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/15/4/878> (дата звернення: 24.02.2026).
34. Quinn T. Securing the SDN Data Plane in Emerging Technology ... *Future Internet*. 2025. Vol. 17(11). Article 503. URL: <https://www.mdpi.com/1999-5903/17/11/503> (дата звернення: 24.02.2026).
35. Lorincz J. та ін. Mobile Network Softwarization: Technological Foundations ... *Sensors*. 2026. Vol. 26(2). Article 503. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/26/2/503> (дата звернення: 24.02.2026).
36. Astaiza Hoyos E. та ін. Towards 6G: A Review of Optical Transport Challenges ... (SDN/AI/ML) *Computers*. 2025. Vol. 13(12). Article 286. URL: <https://www.mdpi.com/2079-3197/13/12/286> (дата звернення: 24.02.2026).
37. Holman R. та ін. Geolocation of Distributed Acoustic Sampling Channels ... *Remote Sensing*. 2025. Vol. 17(18). Article 3142. URL: <https://www.mdpi.com/2072-4292/17/18/3142> (дата звернення: 24.02.2026).
38. Zhang H. та ін. Analysis of Field Trial Results for Excavation-Activities Monitoring using ϕ -OTDR // (Open access) 2024. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11435850/> (дата звернення: 24.02.2026).

39. Zhang H. та ін. Optical fibre loss profile measurement by using intensity-based ϕ -OTDR *Optics & Laser Technology*. 2025. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0030401825001567> (дата звернення: 24.02.2026).

40. Liu Z. та ін. Distributed fiber optic sensing signal recognition based on incremental learning ... *Optical Fiber Technology*. 2024. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1068520024002852> (дата звернення: 24.02.2026).

41. Xie T. та ін. Improving rockfall monitoring with distributed acoustic sensing ... *Geoscience Frontiers*. 2026. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674775526000387> (дата звернення: 24.02.2026).

42. Li Y. та ін. Distributed acoustic sensing for monitoring engineering ... // (Elsevier) 2026. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580526000257> (дата звернення: 24.02.2026).

43. Huang S. та ін. *Cable Security State Detection Based on Multi-Scale Information Fusion and Distributed Fiber Optic Sensing*. 2025. URL: <https://www.niclab.ac.cn/assets/pdf/2025-Cable%20Security%20State%20Detection%20Based%20on%20Multi-Scale%20Information%20Fusion%20and%20Distributed%20Fiber%20Optic%20Sensing.pdf> (дата звернення: 24.02.2026).

44. Brule S. та ін. *Urban dark fiber distributed acoustic sensing for bridge monitoring*. 2024/2025. URL: https://www.researchgate.net/publication/379984107_Urban_dark_fiber_distributed_acoustic_sensing_for_bridge_monitoring (дата звернення: 24.02.2026).

45. Guerrero-Dorize J. та ін. Distributed Coherent Sensing Over Deployed Fibers for Network as a Sensor Applications *Journal of Lightwave Technology*. 2025. DOI: 10.1109/JLT.2024.3498070. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Distributed-Coherent-Sensing-Over-Deployed-Fibers-a-Guerrier-Dorize/0a5c8f43878721a171e7cfe0082de93ed623b56a> (дата звернення: 24.02.2026).

46. Lei Y. та ін. *DEMO: An Open Research Framework for Optical Data ...* // *ACM*. 2024. DOI: 10.1145/3672202.3673712. URL: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3672202.3673712> (дата звернення: 24.02.2026).

47. Escallón-Portilla A. F. та ін. Addressing survivability intents in packet-optical intent-based ... *Photonic Network Communications*. 2026. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11107-026-01041-6> (дата звернення: 24.02.2026).

48. Cruzes S. (preprint) *Revolutionizing Optical Networks: The Integration and impact of Large Language Models*. 2025. URL: https://www.techrxiv.org/users/693957/articles/1216475/master/file/data/Revolutionizing_Optical_Networks_The_Integration_and_impact_of_Large_Language_Modelsv16-2025-05-05-12-39/Revolutionizing_Optical_Networks_The_Integration_and_impact_of_Large_Language_Modelsv16-2025-05-05-12-39.pdf (дата звернення: 24.02.2026).

49. Cruzes S. (preprint) *Optical Network Automation: Enhancing Networks with ML, Digital Twins, and Advanced Technologies*. 2025. URL: https://www.techrxiv.org/users/693957/articles/1274625/master/file/data/Optical_Network_Automation_Enhancing_Networks_with_ML_Digital_Twins_and_Advanced_Technologies_v7docx-2025-03-05-18-25/Optical_Network_Automation_Enhancing_Networks_with_ML_Digital_Twins_and_Advanced_Technologies_v7docx-2025-03-05-18-25.pdf (дата звернення: 24.02.2026).

50. IOWN Global Forum. Network Digital Twin Use Case. Ver. 2.0. 2025. URL: https://iowngf.org/wp-content/uploads/2025/02/IOWN-GF-RD-NDT_Use_Case-2.0.pdf (дата звернення: 24.02.2026).

51. IOWN Global Forum. The IOWN Global Forum recognizes NTT's Open APN PoC as its 2024 Proof of Concept of the Year. 2024. URL: <https://iowngf.org/the-iown-global-forum-recognizes-ntts-open-apn-poc-project-as-its-2024-proof-of-concept-of-the-year/> (дата звернення: 24.02.2026).

52. ETSI. ETSI GS ZSM 014 V1.1.1 (2024-03): ZSM security aspects. 2024. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/ZSM/001_099/014/01.01.01_60/gs_ZSM014v010101p.pdf (дата звернення: 24.02.2026).

53. ETSI. ETSI GS ZSM 016 V1.1.1 (2024-10): Intent-driven Closed Loops. 2024. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/ZSM/001_099/016/01.01.01_60/gs_ZSM016v010101p.pdf (дата звернення: 24.02.2026).

54. ETSI. ETSI GS ZSM 018 V1.1.1 (2024-12): (NDT/застосування цифрових двійників у ZSM). 2024. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/ZSM/001_099/018/01.01.01_60/gs_ZSM018v010101p.pdf (дата звернення: 24.02.2026).

55. ETSI. ETSI GR ZSM 011 V2.1.1: (ZSM Reference Architecture). 2024. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_gr/ZSM/001_099/011/02.01.01_60/gr_ZSM011v020101p.pdf (дата звернення: 24.02.2026).

56. ETSI. ETSI GS ENI 030 V4.1.1 (2024-03). 2024. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/ENI/001_099/030/04.01.01_60/gs_ENI030v040101p.pdf (дата звернення: 24.02.2026).

57. ETSI. ETSI GS ENI 033 V4.1.1 (2024-08): Intent Policy Multi-Stage Translating. 2024. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/ENI/001_099/033/04.01.01_60/gs_ENI033v040101p.pdf (дата звернення: 24.02.2026).

58. ETSI. ETSI GR ENI 015 V4.1.1 (2024-05): Processing and Management of Intent Policy. 2024. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_gr/ENI/001_099/015/04.01.01_60/gr_ENI015v040101p.pdf (дата звернення: 24.02.2026).

59. Open ROADM MSA. Downloads (YANG models, white papers, optical specifications). 2024. URL: <https://openroadm.org/downloads/> (дата звернення: 24.02.2026).

60. Open ROADM MSA. OpenROADM_MSA_Public (releases 15.0/15.1; specs v7.0). 2024. URL: https://github.com/OpenROADM/OpenROADM_MSA_Public (дата звернення: 24.02.2026).

61. Open ROADM MSA. OpenROADM MSA specification ver. 7.0 (xlsx). 2024. URL:

https://github.com/OpenROADM/OpenROADM_MSA_Public/wiki/files/20240307_open-roadm_msa_specification_ver7.0.xlsx (дата звернення: 24.02.2026).

62. Netconf Central. org-openroadm-operational-mode-catalog (Version: 2024-05-31). 2024. URL: <https://www.netconfcentral.org/modules/org-openroadm-operational-mode-catalog/2024-05-31/source/raw/> (дата звернення: 24.02.2026).

63. IETF. RFC 9534: Simple Two-Way Active Measurement Protocol Extensions for Performance Measurement on a Link Aggregation Group. 2024. DOI: 10.17487/RFC9534. URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc9534.html> (дата звернення: 24.02.2026).

64. IETF. RFC 9617: A YANG Data Model for In Situ Operations, Administration, and Maintenance (IOAM). 2024. DOI: 10.17487/RFC9617. URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc9617.html> (дата звернення: 24.02.2026).

65. IETF. RFC 9630: Multicast On-Path Telemetry Using In Situ Operations, Administration, and Maintenance (IOAM). 2024. DOI: 10.17487/RFC9630. URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc9630.html> (дата звернення: 24.02.2026).

66. IETF. RFC 9731: A YANG Data Model for Virtual Network (VN) Operations. 2025. DOI: 10.17487/RFC9731. URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc9731> (дата звернення: 24.02.2026).

67. IETF. RFC 9826: A YANG Data Model for the Path Computation Element Communication Protocol (PCEP). 2025. DOI: 10.17487/RFC9826. URL: <https://www.rfc-editor.org/info/rfc9826> (дата звернення: 24.02.2026).

68. IETF. Telemetry Data Manifest (Internet-Draft): draft-ietf-opsawg-collected-data-manifest-05. 2024. URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/draft-ietf-opsawg-collected-data-manifest/05/> (дата звернення: 24.02.2026).

69. IETF. Extensible YANG Model for Network Telemetry Messages (Internet-Draft). 2025. URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/draft-netana-nmop-message-broker-telemetry-message> (дата звернення: 24.02.2026).

70. IETF. YANG models for VN/TE Performance Monitoring Telemetry and Scaling Intent Autonomics (Internet-Draft). 2025. URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/draft-ietf-teas-actn-pm-telemetry-autonomics/15/> (дата звернення: 24.02.2026).

71. IETF. On-Path Telemetry YANG (Internet-Draft): draft-ietf-ippm-on-path-telemetry-yang. 2026. URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/draft-ietf-ippm-on-path-telemetry-yang/> (дата звернення: 24.02.2026).

72. Міністерство цифрової трансформації України. Про схвалення Стратегії розвитку сфери електронних комунікацій України до 2030 року та Операційного плану заходів (2024-2026). 2024. URL: <https://thedigital.gov.ua/regulations/pro-shvalennya-strategiyi-rozvitku-sferi-elektronnih-komunikacij-ukrayini-na-period-do-2030-roku-ta-zatverdzhennya-operacijnogo-planu-zahodiv-z-yiyi-realizaciyi-u-2024-2026-rokah> (дата звернення: 24.02.2026).

73. НКЕК. Про оновлення географічного огляду доступності мереж фіксованого широкосмугового доступу. 2025. URL: <https://nkek.gov.ua/npras/82-12-02-2025> (дата звернення: 24.02.2026).

74. НКЕК. Звіт про результати аналізу ринків послуг термінації ... (публікація 11.12.2024). 2024. URL: <https://nkek.gov.ua/static-objects/nkek/uploads/public/675/843/1f9/6758431f90e7d688252887.pdf> (дата звернення: 24.02.2026).

75. EU4Digital. Regional broadband access monitoring report. December 2024. 2024. URL: <https://eufordigital.eu/wp-content/uploads/2024/12/EU4Digital-Regional-broadband-access-monitoring-report-December-2024.pdf> (дата звернення: 24.02.2026).

76. ITU. Ukraine Digital Development Country Profile 2024. 2025. URL: https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/Europe/Documents/Publications/2025/Final_Ukraine%20Digital%20Development%20Country%20Profile%20version%203.0.pdf (дата звернення: 24.02.2026).

77. ETH Zürich (CSS). Critical Infrastructure Resilience in Ukraine. 2024. URL: <https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/gess/cis/center-for-securities->

studies/pdfs/RR-Report-2024-Critical-Infrastructure-Resilience.pdf (дата звернення: 24.02.2026).

78. EExPolytech (IEEE conf.). *Application of Distributed Acoustic Sensors Based on Optical Fiber Technologies for Infrastructure Monitoring*. 2024. DOI: 10.1109/EExPolytech62224.2024. (див. сторінку публікації). URL: https://www.researchgate.net/publication/386002625_Application_of_Distributed_Acoustic_Sensors_Based_on_Optical_Fiber_Technologies_for_Infrastructure_Monitoring (дата звернення: 24.02.2026).

79. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. *Optimization of distributed acoustic sensors based on fiber optic technologies*. 2024. URL: <https://journals.uran.ua/eejet/article/view/313455> (дата звернення: 24.02.2026).

80. NTT Technical Review. *Digital Longitudinal Monitoring of Fiber-optic Link Using ... (DLM review)*. 2024. URL: <https://www.ntt-review.jp/archive/ntttechnical.php?contents=ntr202409ra1.html> (дата звернення: 24.02.2026).

81. Комп'ютерні інтелектуальні системи та мережі (KICM-2026) : XIX Всеукраїнська науково-практична WEB конференція аспірантів, студентів та молодих вчених. URL: <https://sites.google.com/view/kicm/> (дата звернення: 26.02.2026).

ДОДАТОК А

(обов'язковий)

Наукова публікація

*Mitko D.S.,
Хмельницький національний університет
Савстун С.О.,
старший викладач, Хмельницький національний університет*

КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ОПОРНОЇ ОПТИЧНОЇ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ З ВИКОРИСТАННЯМ «ТЕМНИХ» ОПТИЧНИХ ВОЛОКОН

Опорні оптичні телекомунікаційні мережі забезпечують транспортування основних цифрових сервісів і характеризуються високою протяжністю ліній, складністю топології та кривизною відомок. У роботі розглянуто підхід до побудови кіберфізичної системи контролю опорної мережі, яка поєднує фізичні

288

вимірювання стану волоконно-оптичної інфраструктури, мережеву телеметрію та аналітичні механізми в єдиному інформаційному контурі.

Опорні оптичні телекомунікаційні мережі формують базовий транспортний рівень інформаційно-комунікаційної інфраструктури, забезпечуючи передачу великих обсягів даних між регіональними вузлами зв'язку, дата-центрами, мобільними мережами доступу та міжнародними каналами. Висока концентрація трафіку й критичність сервісів зумовлюють підвищені вимоги до відмовостійкості та оперативності локалізації несправностей. Водночас фізичне середовище передачі - волоконно-оптичні лінії - експлуатуються у складних умовах, де на параметри волокна впливають механічні навантаження, температурні градієнти, вібрації, вологість і антропогенні чинники.

Для контролю ліній широко застосовуються методи рефлектометрії та похідні підходи. Базові вимірювання параметрів і тестові методики оптичних волокон і кабелів формалізуються у галузевих рекомендаціях, що важливо для уніфікації процедур контролю та інтерпретації результатів на протяжних ділянках мережі. У практичних системах це реалізується як віддалений контроль волокон (RFTS/remote fiber test system), де вимірювання автоматизуються й централізуються для мінімізації часу локалізації проблем та скорочення MTTR.

Кіберфізична система (КФС) у задачі контролю опорної мережі розглядається як інтеграція фізичних вимірювань, цифрових моделей стану та механізмів автоматизованого управління. Вона забезпечує зв'язок між фізичними процесами і цифровим контуром.

Для наочнішого подання взаємодії фізичного та цифрового рівнів структурну схему КФС контролю опорної оптичної телекомунікаційної мережі з використанням «темних» оптичних волокон наведено на рис. 1. Подана схема відображає основні джерела даних, канали їх передавання, засоби оброблення та аналізу, а також контур формування експлуатаційних рішень. Її використання дає змогу цілісно представити логіку функціонування системи, у межах якої результати фізичних вимірювань, телеметрія активного обладнання та контекстні експлуатаційні відомості поєднуються в єдиному інформаційному середовищі.

Функціонально КФС контролю опорної мережі доцільно будувати як узгоджений цикл: «вимірювання - передавання - накопичення - аналіз - рішення - дія». На фізичному рівні джерелами даних є (1) вимірювання на «темних» волокнах, (2) телеметрія активного обладнання (оптична потужність, BER/помилка, запас OSNR/Q-factor, параметри модуля), (3) контекстні дані про трасу й експлуатаційні події. На цифровому рівні формується єдине середовище подій і метрик, де інформація корелюється за часом і просторовою прив'язкою (кілометраж/ділянка). Таким чином система переходить від «набору розрізнених інструментів» до інтегрованої платформи експлуатації.

289



Рисунок 1 - Структурна схема КФС

Важливою частиною КФС є телеметричний контур. Сучасні принципи мережевої телеметрії описуються як архітектура збору, кореляції та споживання даних для автоматизованого управління мережею, що підкреслює необхідність стандартизованого підходу до генерації й доставки телеметрії. Для опорної оптики це означає, що телеметрія не має бути "паралельною" системою, а повинна бути інтегрована із засобами фізичного моніторингу та з платформами управління мережею (NMS/OSS), щоб забезпечити коректну інтерпретацію стану і швидке реагування.

Оскільки «темні» волокна дозволяють будувати постійний контур спостереження, система повинна підтримувати автоматичне формування споніжень при відхиленнях і можливість швидкої локалізації проблемної ділянки. Виробничі підходи до віддаленого контролю волокон підкреслюють роль централізованого моніторингу як інструмента скорочення часу ремонту та підвищення доступності мережі. Крім того, корисним є поєднання фізичних подій з мережевими симптомами, що підвищує достовірність діагностики та зменшує кількість хибних тривог.

Список використаних джерел:

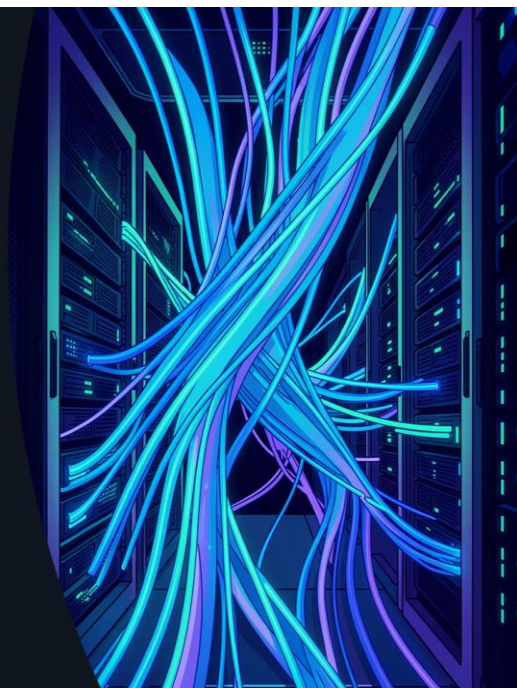
12. ITU-T. *Recommendation ITU-T G.650.1 (01/2024): Definitions and test methods for linear, deterministic attributes of single-mode fibre and cable*. - 2024. - Режим доступу: <https://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?lang=en&rec=15803> (дата звернення: 04.03.2026).
13. ITU-T. *Recommendation ITU-T G.650.3: Test methods for installed single-mode optical fibre cable links*. - 2017. - Режим доступу: <https://www.itu.int/epublications/es/publication/itu-t-g-650-3-2017-08-test-methods-for-installed-single-mode-optical-fibre-cable-links/en> (дата звернення: 04.03.2026).
14. Wang C. (Ed.) та ін. *Network Telemetry Framework (RFC 9232)*. - IETF, 2022. - Режим доступу: <https://datatracker.ietf.org/doc/rfc9232/> (дата звернення: 04.03.2026).
15. VIAVI Solutions. *Fiber Monitoring: What is it, and when to use an RFTS?* - 2020-ті рр. - Режим доступу: <https://www.viavisolutions.com/en-us/what-fiber-monitoring> (дата звернення: 04.03.2026).
16. Zhang X. та ін. *Fiber-Optic Distributed Acoustic Sensing for Smart Grid Applications: A Review*. - *Photonics*, 2024. - Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2304-6732/12/1/7> (дата звернення: 04.03.2026).
17. Li Y. та ін. *Distributed acoustic sensing for monitoring engineering infrastructures*. - *Sensors and Actuators A: Physical*, 2026. - Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926580526000257> (дата звернення: 04.03.2026).

ДОДАТОК Б

(обов'язковий)
Презентація до роботи

Кіберфізична система контролю опорної оптичної телекомунікаційної мережі з використанням «ТЕМНИХ» ОПТИЧНИХ ВОЛОКОН

Дмитро МІТІН · КІ2м-24-1 · 2026



Актуальність

Опорні оптичні мережі формують фундамент цифрової інфраструктури сучасних держав і підприємств. Будь-яке пошкодження волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ) миттєво призводить до деградації сервісів і значних економічних втрат.

⚠ Існуюча телеметрія охоплює лише мережевий рівень — фізичний стан лінії залишається «сліпою зоною» для оператора.

Обмежений контроль фізичного рівня

Стандартні засоби моніторингу не фіксують механічні деформації, вібрації та локальні втрати у волокну.

Телеметрія ≠ повна картина

Мережева телеметрія не відображає реального фізичного стану кабельної інфраструктури.

Потрібна інтегрована система

Необхідне єдине рішення, що об'єднує фізичні вимірювання та телеметричні дані в реальному часі.

Мета і задачі дослідження

Мета роботи

Підвищення ефективності контролю стану опорної оптичної мережі шляхом розробки кіберфізичної системи, що інтегрує фізичні вимірювання через «темні» волокна з телеметрією мережевого рівня.

01

Аналіз методів моніторингу

Огляд існуючих підходів до контролю ВОЛЗ та їх обмежень.

02

Використання «темних» волокон

Розробка методу застосування незадіяних волокон як розподіленого сенсора.

03

Інтеграція даних

Об'єднання фізичних вимірювань і телеметрії в єдиній аналітичній платформі.

04

Архітектура та реалізація

Проектування системи та розробка програмного рішення.

Архітектура системи



Джерела даних

Обробка та зберігання

Єдине сховище подій та метрик забезпечує аналітичному модулю повну картину стану мережі для прийняття рішень оператором через NMS.

Фізичні вимірювання

OTDR, DAS через «темні» волокна

Телеметрія

SNMP, gRPC з активного обладнання

Принцип роботи системи



Вимірювання

Передавання

Накопичення

Аналіз

Рішення

Кореляція даних

Система зіставляє фізичні аномалії з телеметричними подіями для виключення хибних спрацювань.

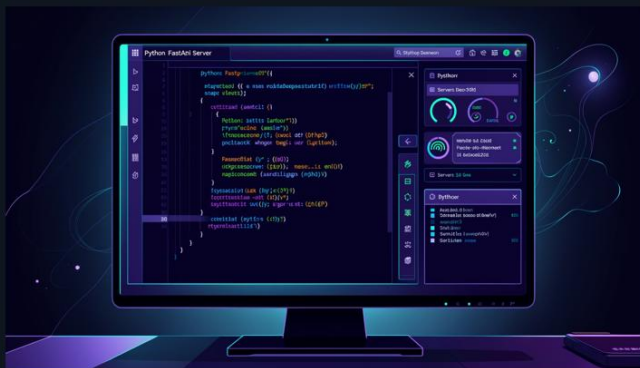
Виявлення аномалій

Алгоритми аналітичного модуля виявляють відхилення від базових показників у реальному часі.

Формування сповіщень

Оператор отримує пріоритизовані алерти з локалізацією проблеми та рекомендованими діями.

Програмна реалізація



Стек технологій

1

FastAPI (серверний застосунок)

REST API для збору, обробки та надання даних вимірювань.

2

База даних (події + метрики)

Реляційне сховище подій та часові ряди телеметричних показників.

3

Аналітичний модуль

Модулі збору, обробки та аналітики з підтримкою інтеграції NMS/OSS.



Результати роботи



Інтеграція даних

Об'єднання фізичних і телеметричних вимірювань в єдиному аналітичному середовищі.



Точність виявлення

Підвищена точність фіксації відхилень завдяки перехресній кореляції джерел даних.



Швидка локалізація

Скорочення часу виявлення та локалізації проблем у мережній інфраструктурі.



Підтримка рішень

Система пройшла перевірку в реальному експлуатаційному сценарії та підтвердила ефективність.

Висновки

Підхід підтверджено

Кіберфізична система контролю на основі «темних» волокон демонструє практичну ефективність та може бути масштабована на реальні опорні мережі операторів зв'язку.

1 Розроблено кіберфізичну систему контролю

Повний цикл від збору даних до формування управляючих рішень.

2 «Темні» волокна як розподілений сенсор

Незадіяні волокна перетворено на повноцінний інструмент фізичного моніторингу.

3 Реалізовано програмний модуль

Серверний застосунок на FastAPI з модулями збору, аналітики та інтеграції з NMS.

Протокол аналізу звіту подібності експертом

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Дмитро МІТІН

Співавтор:

Назва: Кіберфізична система контролю опорної оптичної телекомунікаційної мережі з використанням «темних» оптичних волокон

Експерт: Олексій ІВАНОВ

Підрозділ: Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Коефіцієнт подібності 1: 2.17%

Коефіцієнт подібності 2: 0.5%

Мікропробіли: 3

Заміна букв: 0

Інтервали: 0

Білі знаки: 5

Дата створення звіту: 2026-04-27 05:57:34.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.

Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедурам. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

2026-04-27

Дата

Доцент Андрій Нічепорук

експерт

Anti-Plagiarism (<http://ap.km.ua>) v-15.701

Максимальне співпадіння з одним документом 27.0%

Словники перевірки: en_US, ru_RU, ua_UA. Помилки в документах: 10%

ID: 270690 Назва: МКР Кіберфізична система контролю опорної оптичної телекомунікаційної мережі з використанням «темних» оптичних волокон Додано в БД: 2026-04-27 Автора: Дмитро МІТІН Керівники: Олексій ІВАНОВ Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	153065	1026	42588 (28%)	304 (30%)

Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми
269759	Назва: Звіт з ПДП Кіберфізична система контролю опорної оптичної телекомунікаційної мережі з використанням «темних» оптичних волокон Додано в БД: 2026-03-11 Автора: Д.С. Мітіна Керівники: Гнатчук Є.Г. Консультанти: Опоненти:	41150 (27.0%)	296 (29.0%)

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Здобувач: Дмитро МІТІН

Тема: Кіберфізична система контролю опорної оптичної телекомунікаційної мережі з використанням «темних» оптичних волокон

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи магістра:

Кількість листів креслень —; кількість сторінок записки 80

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень У роботі запропоновано система контролю опорної оптичної телекомунікаційної мережі з використанням «темних» оптичних волокон

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню _____
Кваліфікаційна робота магістра відповідає виданому завданню _____

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: У першому розділі проведено аналіз предметної області контролю опорних оптичних телекомунікаційних мереж, розглянуто особливості функціонування волоконно-оптичної інфраструктури та визначено основні фактори, що впливають на її технічний стан. У другому розділі виконано аналіз підходів до побудови систем контролю, методів фізичного моніторингу та телеметричних рішень, а також розглянуто підходи до інтеграції різнорідних даних. У третьому розділі розроблено моделі, методи та алгоритми оброблення даних у кіберфізичній системі контролю, зокрема метод кореляції фізичних вимірювань і телеметричних параметрів, алгоритми виявлення аномалій та підхід до підтримки прийняття експлуатаційних рішень на основі інтегрованих даних. У четвертому розділі реалізовано програмно-аналітичну частину системи контролю, виконано налаштування модулів збору, передавання та зберігання даних, а також аналітичного модуля виявлення відхилень.

Зав. кафедри КПС
д-р. філософії Ользі ПАВЛОВІЙ

Дмитро МІТІН

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 2 курсу, групи КІ2м-24-1

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті, згідно з яким виявлення академічного плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту і застосування заходів академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання спеціалізованих програмних засобів (СПЗ) StrikePlagiarism та Anti-Plagiarism для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність академічного плагіату оповішений (а). Надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних СПЗ і використання роботи для виявлення академічного плагіату в інших роботах, які перевіряються СПЗ.

Також надаю свою згоду на обробку й збереження університетом моєї роботи в Інституційному репозитарії Хмельницького національного університету.

Робота надається для перевірки в електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

1 травня 2026 року

РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ

КАФЕДРИ КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Назва кваліфікаційної роботи Кіберфізична система контролю опорної оптичної телекомунікаційної мережі з використанням «темних» оптичних волокон

Автор Дмитро МІТІН

Освітня програма Інформаційні системи та технології

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

Науковий керівник: к.т.н., доцент Олексій ІВАНОВ

На основі аналізу кваліфікаційної роботи на дотримання вимог академічної доброчесності (у т.ч. відсутності ознак академічного плагіату) з урахуванням результатів перевірки роботи спеціалізованим програмним засобом(ами) комісія зробила такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Ознаки академічного плагіату	
1.1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є академічним плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних, якщо потрібно). Робота приймається до захисту.	відповідає
1.2	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована.	
1.3	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота може бути допущена до захисту після того як буде відкоригована та доопрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
1.4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття текстових запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
2	Інші види порушень академічної доброчесності	

Підтвердження:

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:

- 1) усі запозичення фрагментарні, або мають належним чином оформленні посилання;
- 2) окремі виявлені збіги є загальноживаними фразами або виразами, про що свідчить посилання системи на збіг з джерелами на один фрагмент речення;
- 3) всі зафіксовані системою ознаки модифікації тексту відносяться до комбінування латинських символів зі україномовними скороченнями індексів в формулах, що не є модифікацією тексту.
- 4) значна частина знайденого плагіату відноситься до списку використаних джерел

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ ідентичності/схожості StrikePlagiarism, складає 2.17% і адресується; та системою Anti-Plagiarism складає 27%, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

27.04.2026

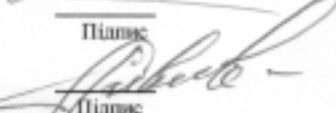
Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи


Підпис

Ольга ПАВЛОВА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ


Підпис

Олег САВЕНКО
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ


Підпис

Олексій ІВАНОВ
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ