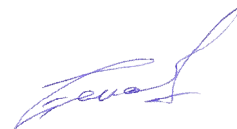


**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ І ЗВ'ЯЗКУ**

Степанов Дмитро Миколайович



УДК 681.7.068.019.3

**МЕТОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ
ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ЛІНІЙ ЗВ'ЯЗКУ
НА ЕТАПАХ ПРОЄКТУВАННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Одеса-2025

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Державному університеті інтелектуальних технологій і зв'язку Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Бондаренко Олег Володимирович,
заслужений діяч науки і техніки України,
лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Барабаш Олег Володимирович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського», професор кафедри інженерії
програмного забезпечення в енергетиці;

доктор технічних наук, професор
Вишнівський Віктор Вікторович,
Державний університет інформаційно-
комунікаційних технологій,
завідувач кафедри комп'ютерних наук;

доктор технічних наук, професор
Кайдан Микола Володимирович,
Національний університет «Львівська політехніка»,
заступник директора інституту інформаційно-
комунікаційних технологій та електронної інженерії.

Захист відбудеться «21» листопада 2025 р. о 11⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.113.03 у Державному університеті інтелектуальних технологій і зв'язку за адресою: 65023, м. Одеса, вул. Кузнечна, 1, аудиторія 223.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Державного університету інтелектуальних технологій і зв'язку (65023, м. Одеса, вул. Кузнечна, 1).

Автореферат розіслано «16» жовтня 2025 р.

**В.о. вченого секретаря
спеціалізованої вченої ради
д.т.н., проф.**



М.М. Гаджисєв

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Електронна комунікація набула повсюдної інтеграції та використання через настійну необхідність обміном між користувачами або мережними пристроями великого об'єму інформації з великими швидкостями і на великі відстані, а також надання широкого спектра електронних комунікаційних послуг. В електронній комунікаційній мережі (ЕКМ) передавання/приймання оптичних сигналів забезпечує волоконно-оптична система передавання (ВОСП). Вона здатна перетворювати електричні сигнали різноманітних цифрових пристроїв в оптичні та передавати їх по волоконно-оптичних лініях зв'язку (ВОЛЗ), що є основним середовищем передачі в мережі. В умовах стрімкого розвитку інформаційного суспільства та щораз більших вимог до якості електронних комунікаційних послуг забезпечення надійності інфраструктури зв'язку набуває стратегічного значення. Волоконно-оптична лінія зв'язку як основа для високошвидкісних електронних комунікаційних систем відіграє ключову роль у побудові як глобальних, так і національних мереж зв'язку. Велика пропускна здатність, надвеличезна інформаційна ємність, малі втрати та маса, задана якість передавання, велика дальність зв'язку, стійкість до зовнішніх електромагнітних завад і перспективи довготривалої експлуатації визначають її домінування серед інших сучасних засобів зв'язку.

Якісна та безвідмовна робота транспортної електронної комунікаційної мережі (ТЕКМ) зв'язку, якою передаються велика кількість каналів та обсяг інформації, що постійно збільшується, насамперед потребує забезпечення надійності ВОЛЗ. Надійність ВОЛЗ залежить від технічного стану та якості її елементів, інтенсивності їх відмов (пошкоджень з перервою та без перерви зв'язку), що виникають, рівня організації технічної експлуатації з забезпечення показників надійності тощо. Порушення вимог нормативно-технічних документів, вибір невідповідних конструкцій оптичного кабелю (ОК) на етапі проєктування ВОЛЗ, відсутність оцінки впливу умов експлуатації на якість роботи її складових елементів, недостовірне визначення показників надійності лінії при експлуатації, зниження якості контролю технічного стану елементів та некоректне розміщення запасних частин та інструментів і приладь (ЗІП) на фрагменті мережі зв'язку можуть привести до погіршення якості та безвідмовності роботи лінії і, як наслідок, її показників надійності. Не ефективні проєктування та технічна експлуатація лінії можуть зумовити появу відмов на мережі зв'язку і, як наслідок, втрати великого обсягу інформації у разі простою лінії, збільшення часу її передавання через обхідні шляхи та значні фінансові збитки.

Таким чином, на сьогоднішній день загострилося протиріччя між забезпеченням надійності та безперервності функціонування ВОЛЗ згідно нормативно-технічної документації зв'язку в умовах ускладнення електронних комунікаційних мереж і відсутністю можливості застосування нових адекватних методів і підходів під час проєктування та експлуатації фрагментів ліній. Вирішенню цього протиріччя і присвячена дана дисертаційна робота. Останнє вимагає проводити дослідження щодо забезпечення надійності роботи не тільки ВОЛЗ, а й її елементів, тому що лінія вносить у загальне число пошкоджень системи передавання до 95 %.

Розробленню наукових основ і загальної теорії ВОСП, розрахунку, проєктуванню та доведенню до дослідної експлуатації елементів ВОЛЗ присвячено багато робіт. Значний внесок у розвиток цих задач зробили О. В. Бондаренко, В. Б. Каток, І. Ш. Невлюдов, О. І. Филипенко, Л. Н. Беркман, М. М. Климаш, Л. М. Андрушко, О. О. Манько, Д. Маркузе, Х. Г. Унгер, Дж. Є. Мідвінгер, Д. Глог, Ю. Міцунаги, Ю. Кацуями та ін.

У результаті розв'язано багато теоретичних та практичних задач з впровадження на мережах зв'язку ВОСП, розроблено і досліджено характеристики різних типів оптичних волокон (ОВ) та ОК, створено та досліджено методи прискореної оцінки технічного стану елементів ВОЛЗ, визначено загальні підходи до забезпечення надійності та мінімізації ризику їх пошкодження.

Вивчення наукових джерел показало, що низка задач зі створення насамперед високонадійних ВОЛЗ залишилися поза рамками відомих робіт. Сюди слід віднести задачі, пов'язані з:

- аналізом та дослідженням сучасного стану проблеми забезпечення надійності ліній зв'язку ВОСП;
- розвитком та обґрунтуванням підходів до визначення показників експлуатаційної надійності ВОЛЗ волоконно-оптичних мереж;
- розвитком теорії забезпечення надійності ВОЛЗ на етапах виробництва ОК, проєктування, будівництва та експлуатації;
- контролю технічного стану елементів ВОЛЗ при експлуатації;
- забезпечення надійності ВОЛЗ комплектами ЗІП.

Науково-прикладною проблемою, вирішенню якої присвячена дисертаційна робота, є розробка методів забезпечення надійності ВОЛЗ на етапах проєктування та експлуатації. На початку досліджень існувала низка невирішених задач, до яких належить необхідність:

- а) розробки методів:
 - обґрунтованого прискореного вибору та оптимізації моделей модульних конструкцій ОК, що є однією з основних складових на етапі проєктування ВОЛЗ із заданою кількістю ОВ та технічною і економічною ефективністю;
 - оцінки температурного впливу умов експлуатації ВОЛЗ на геометричні розміри і параметри осердя ОК при його виготовленні, а також аналізу причин порушення технології його виготовлення, будівництва лінії і здачі в експлуатацію й аналізу їх причин та надання рекомендацій з їх недопущення;
- б) уточнення середніх значень кількісних показників експлуатаційної надійності лінійних споруд ВОЛЗ усіх кліматичних районів країни;
- в) забезпечення:
 - ефективного контролю технічного стану елементів ВОЛЗ при експлуатації з метою підтримки її нормативної надійності;
 - надійності ВОЛЗ при експлуатації та технічному обслуговуванні підприємством зв'язку комплектами ЗІП.

Стан науково-практичної проблеми. Чинна нормативна база з проєктування та експлуатації лінійних споруд (ЛС) електронних комунікацій (ДСТУ 2862-94, ГБН В.2.2-34620942-002:2015, Р 45-010-2002, КНД 45-189-2003)

передбачає необхідність прийняття технічних рішень, які забезпечать надійність і довгострокову експлуатацію ЛС ВОЛЗ в найбільш сприятливих умовах та з мінімальними витратами на нове будівництво. Обґрунтування вибору марки ОК за умовами прокладання потрібно здійснювати відповідно до вимог нормативних документів на виготовлення кабелю. Проте підходи обґрунтованого вибору сучасних конструкцій ОК, які одночасно відповідають вимогам технічного завдання на етапі її проєктування та забезпечують подальшу якісну та надійну роботу ВОЛЗ при експлуатації, представлені в недостатній мірі. Це створює певні проблеми в реалізації високошвидкісного та ефективного волоконно-оптичного зв'язку. Зокрема, проблема реалізації високошвидкісної, безвідмовної та надійної ВОСП потребує досконалої елементної бази та ВОЛЗ на основі оптимальних конструкцій ОК.

На сьогодні вітчизняні заводи-виробники оптичних кабелів на вимогу замовника передбачають індивідуальний розрахунок параметрів моделі ОК з подальшим її виготовленням, а відомі джерела з конструювання кабелів визначають порядок розрахунку їхніх механічних параметрів конструкції, зокрема, максимального допустимого розтягувального навантаження (МДРН). Але в них повністю відсутні: методи обґрунтованого прискореного вибору та оптимізації моделей модульних конструкцій ОК з заданою кількістю ОВ за технічною та економічною ефективністю. Це вимагає розробки методів проєктування та багатокритеріальної оптимізації моделей конструкцій ОК.

Відомі в технічній літературі методи визначення параметрів модульних конструкцій ОК дозволяють лише розраховувати параметри її моделі за температури 20 °С. Проте підходи до оцінки термомеханічного впливу умов виробництва кабелів та експлуатації ВОЛЗ на геометричні розміри та параметри ОК і його елементів представлені в недостатній кількості. Це вимагає розробки методу оцінки температурного впливу умов експлуатації ВОЛЗ на геометричні розміри й параметри осердя ОК, а також аналізу причин технологічних порушень та рекомендацій з їх недопущення. Крім того, при наявній більшій кількості статистичних даних про причини, характер та тривалість відмов (пошкоджень з перервою та без перерви зв'язку) ТЕКМ зв'язку потребують уточнення середніх значень кількісних показників надійності лінійних споруд ВОЛЗ, що обумовлює необхідність розвитку та обґрунтування підходів до дослідження реальних експлуатаційних показників якості роботи ВОЛЗ в різних кліматичних районах.

Для забезпечення ефективного контролю технічного стану елементів та оптимізації технічного обслуговування лінійних споруд ВОЛЗ ТЕКМ зв'язку при експлуатації відсутні підходи до визначення законів розподілу випадкових величин, які описують реальні процеси виникнення відмов. Це вимагає визначення законів розподілу пошкоджень ВОЛЗ ТЕКМ зв'язку в різних кліматичних районах країни та розробки методу контролю ймовірнісних показників надійності лінійних споруд ВОЛЗ на початковому терміні експлуатації.

Забезпечення надійності ВОЛЗ при експлуатації та технічному обслуговуванні підприємством зв'язку комплектами ЗІП представлені в недостатній кількості. Це ускладнює їх ефективний розподіл по мережі зв'язку

для забезпечення мінімального часу їх доставки до місця ремонту лінійних споруд та зменшення часу простою лінії, що вимагає розробки методів оптимізації розташування ЗІП на ТЕКМ зв'язку за різними критеріями.

Все викладене вище визначило основні напрямки наукових досліджень, які виконано в роботі.

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

Дисертаційна робота пов'язана з пріоритетними напрямами розвитку науки і техніки в межах Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» зі змінами від 21.12.2023 р., Закону України «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні» зі змінами від 21.12.2023 р. Тема дослідження пов'язана з науковими напрямами, сформульованими в п. 1.2.7 «Основні наукові напрями та найважливіші проблеми фундаментальних досліджень у галузі природничих, технічних і гуманітарних наук національної академії наук України на 2024 – 2028 роки», затвердженого постановою Президії НАН України від 10.01.2024 №8, а також з напрямами наукових досліджень Державного університету інтелектуальних технологій і зв'язку. У роботі узагальнені, систематизовані та розвинені результати досліджень, проведених автором за період з 2012 по 2021 роки в межах ініціативних науково-дослідних робіт за темами: «Розробка та дослідження методів і пристроїв підвищення ефективності ліній передачі» (за: 2012 – 2013 р. Держ. реєстр. №0113U004747; 2013 – 2014 р. Держ. реєстр. №0114U006569); «Методи і пристрої підвищення ефективності роботи ліній передачі» (2014 – 2015 р. Держ. реєстр. №0115U007079); «Методи і пристрої підвищення ефективності роботи ліній передачі. Етап III» (2015 – 2016 р. Держ. реєстр. №0116U006066); «Методи і пристрої підвищення ефективності роботи ліній передачі. Етап IV» (2016 – 2017 р. Держ. реєстр. №0117U003419); «Методи і пристрої підвищення ефективності роботи ліній передачі. Етап V» (2017 – 2018 р. Держ. реєстр. №0118U005193); «Методи підвищення надійності та пропускної здатності волоконно-оптичних ліній зв'язку» Етап I, Етап II, Етап III (2018 – 2021 р. Держ. реєстр. №0119U103658).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є забезпечення надійності волоконно-оптичних ліній зв'язку на етапах проектування та експлуатації.

Основні задачі досягнення цієї мети зводяться до:

1. Дослідження сучасного стану проблеми забезпечення надійності ліній зв'язку ВОСП.
2. Забезпечення технічної і економічної ефективності проектування та експлуатації ВОЛЗ оптимальними модульними конструкціями ОК.
3. Розвитку теорії забезпечення надійності ВОЛЗ при проектуванні та експлуатації за оцінкою необхідної конструкції ОК.
4. Розвитку та обґрунтування підходів до визначення та уточнення показників експлуатаційної надійності ліній зв'язку ВОСП.
5. Забезпечення достовірного контролю технічного стану елементів лінійних споруд ВОЛЗ при експлуатації в різних кліматичних районах.
6. Забезпечення надійності ВОЛЗ при експлуатації запасними елементами ЗІП.

Об'єкт дослідження – процес забезпечення надійності волоконно-оптичних ліній зв'язку.

Предмет дослідження – методи та способи забезпечення надійності волоконно-оптичних ліній зв'язку.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених задач у роботі використано: методи теорії ліній передавання – для дослідження та оптимізації конструкцій ОК, методи теорії пружності – для дослідження та оцінки механічної міцності різних силових елементів (СЕ) конструкції оптичного кабелю, методи математичної статистики – для обробки реальних статистичних даних про кількість пошкоджень та удосконалення довідникової бази до розрахунку показників надійності ВОЛЗ, методи теорії ймовірності – для дослідження ймовірнісних показників надійності ВОЛЗ та визначення законів їх розподілу, методи цифрового моделювання – для визначення часових залежностей ймовірнісних показників надійності та оптимального розташування ЗІП на мережі зв'язку.

Наукова новизна одержаних результатів роботи полягає в комплексному підході до забезпечення надійності ВОЛЗ на етапах проєктування та експлуатації.

У цілому це забезпечено такими науковими результатами:

1. *Вперше* розроблено два методи багатокритеріальної оптимізації модульної конструкції оптичного кабелю, які *відмінні від наявних* сформульованими критеріями структурної та параметричної оптимізації моделей багатоповивного осердя кабелю, що *дозволили* здійснювати на етапі проєктування ВОЛЗ обґрунтований прискорений вибір ОК оптимальної конструкції одночасно: – перший за технічною ефективністю осердя кабелю та зменшення їх матеріаломісткості; – другий за критерієм мінімальної собівартості.

2. *Вперше* розроблено метод удосконалення вибору силових елементів одноповивної конструкції ОК, який *відмінний від наявних* встановленими залежностями допустимих розтягувальних навантажень діелектричних центрального та периферійного силових елементів (склопластикових стержнів, арамідних ниток) кабелю від геометричного розміру центрального елемента, що *дозволяє* здійснювати на етапі проєктування ВОЛЗ прискорений вибір ОК з оптимальними силовими та іншими конструктивними елементами.

3. *Вперше* розроблено метод оцінки термомеханічного впливу умов експлуатації на геометричні розміри і параметри осердя ОК, який *відмінний від наявних* тим, що враховує відносні зміни довжин оптичного волокна та кабелю при дії температури, що *дозволяє* оцінити на етапі проєктування ВОЛЗ зміни механічних параметрів кабелю при його експлуатації.

4. *Удосконалено* метод контролю ймовірнісних показників надійності лінійних споруд ВОЛЗ за рахунок визначення законів розподілу випадкових величин, які описують реальні процеси виникнення відмов цих споруд на початковому терміні експлуатації, та *дозволяє* здійснювати контроль технічного стану їхніх елементів та оптимізацію технічного обслуговування ліній фрагментів ТЕКМ зв'язку.

5. *Вперше* розроблено метод контролю механічного стану оптичного волокна діелектричного самоутримного оптичного кабелю при експлуатації, який

відмінний від наявних встановленим зв'язком фактичної механічної напруги в конструкції ДСОК, що виникає під дією фізико-кліматичних впливів умов підвішування кабелю, та відносного видовження ОВ. Це дозволяє здійснювати моніторинг змін механічного стану ОВ і кабелю в цілому задля недопущення додаткової появи недопустимих розтягувальних зусиль та виходу з ладу лінії зв'язку.

6. *Набув подальшого розвитку* метод визначення місця розташування ЗІП за відстанню між вузлами мережі ВОЛЗ за рахунок врахування інтенсивності відмов ділянок лінії. Він враховує тяжіння розташування ЗІП до максимально уразливих фрагментів мережі та дозволяє скорегувати місця розташування ЗІП для удосконалення технічного обслуговування мережі зв'язку.

7. *Вперше* розроблено метод визначення місця розташування ЗІП за сумарним часом відновлення зв'язку та коефіцієнтом готовності, який вимагає визначення часу затримки доставки ЗІП та його складових, коефіцієнта готовності. Він дозволяє підрозділам технічної експлуатації оптимально розміщувати ЗІП на мережі зв'язку для забезпечення більшого значення коефіцієнта готовності. Метод є найбільш удосконаленим, але він вимагає від підрозділів зв'язку якісного контролю показників експлуатаційної надійності та часу відновлення зв'язку ЗІПами фрагменту мережі ВОСП.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що:

1. Розвиток теорії забезпечення надійності сучасних ВОЛЗ або ВОСП на етапах життєвого циклу дозволив:

- розробити рекомендаційні матеріали для проєктантів та лінійного персоналу підприємств зв'язку на основі отриманих значень середніх експлуатаційних показників якості роботи ВОЛЗ: інтенсивності відмов (λ), її максимальних та мінімальних значень ($\lambda_{\text{макс}}$, $\lambda_{\text{мін}}$), середнього часу відновлення зв'язку ($t_{\text{счвз}}$) ТЕКМ зв'язку для кліматичних районів країни за 13-річний період. Це можливо використовувати до виходу державних стандартів;

- оптимізувати показники надійності ВОЛЗ або ВОСП при проєктуванні та експлуатації і розробку рекомендацій щодо мінімізації ризику їх пошкоджень та забезпечення норм показників надійності в життєвому циклі.

2. Удосконалені теоретичні підходи з обґрунтованого вибору та оптимізації конструкції кабелю на етапі проєктування ВОЛЗ можливо використовувати під час уточнення чинної нормативної документації з проєктування ліній зв'язку та в кабельній промисловості здійснювати структурну та параметричну оптимізацію модульних конструкцій кабелів, що покращить доцільність їх вибору, технічну та економічну ефективність.

3. Запропонований метод оцінки термомеханічного впливу на геометричні розміри та параметри осердя ОК при експлуатації дозволяє виявляти появу надмірних сил розтягу або стискання на ОВ та на основі цього здійснювати обґрунтований вибір матеріалів елементів кабелю й контроль механічної ефективності його конструкції.

4. Результати аналізу основних порушень технології виробництва ОК та будівництва ВОЛЗ можуть бути використані підприємством-виробником кабельної техніки та організаціями-замовниками будівництва ВОЛЗ для належної

організації контролю якості конструктивно-виробничих процесів і будівельних робіт, а також недопущення цих порушень.

5. З метою покращення ймовірнісних показників надійності лінійних споруд ВОЛЗ технічному відділу організації зв'язку слід використовувати розроблений метод оцінки ймовірнісних показників надійності для оптимізації технічного обслуговування лінійних споруд ВОЛЗ на початковому етапі експлуатації.

6. Розроблений метод контролю механічного стану волокна ДСОК слід використовувати для моніторингу змін його механічного стану.

7. Розроблені методи з оптимізації підходів до визначення місця розташування ЗІП можуть використовуватися підрозділами технічної експлуатації для оптимального розміщення ЗІП на мережі зв'язку та удосконалення технічного обслуговування лінійних споруд ВОЛЗ.

Результати досліджень, пов'язаних з проблемою забезпечення високої надійності ВОЛЗ та її елементів на етапах проектування та експлуатації використані в роботі підрозділів галузі зв'язку різних організацій та навчальному процесі закладу вищої освіти, що підтверджено відповідними актами впровадження у: ДП «Одеський науково-дослідний інститут зв'язку», регіональній філії «Одеська залізниця» АТ «Укрзалізниця», Львівській філії АТ «Укртелеком», ТОВ «Атраком», а також Державному університеті інтелектуальних технологій і зв'язку для здобувачів спеціальності 172 «Електронні комунікації та радіотехніка». Методи, способи забезпечення надійності ВОЛЗ на етапах проектування та експлуатації можливо використовувати в якості складових галузевих або державних стандартів.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати теоретичних і практичних досліджень, викладені в дисертації, одержано автором самостійно або в їх розробку автор зробив основний творчий внесок. В низці робіт [1, 7, 11, 25, 28, 30] автору належать розроблені та обґрунтовані шляхи оптимізації багатомодульної конструкції осердя ОК. В [2] автору належить обґрунтування застосування різних типів напрямних середовищ для передавання сигналів. В [3, 6, 24, 26, 27, 29] автору належить постановка задачі дослідження, аналіз статистичних даних про пошкодження, розрахунок та аналіз кількісних показників надійності ВОЛЗ. В [4, 8, 9, 10, 12, 17] автору належить розрахунок та аналіз результатів впливу параметрів ОВ на якість передавання сигналів. В [13, 44] автору належить систематизація послідовності визначення конструктивної стійкості ОК до розтягувальних навантажень та аналіз результатів розрахунку. В [14, 16] автору належить постановка задачі, дослідження температурного впливу на ОВ та елементи кабелю в процесі виготовлення та експлуатації. В [15, 19] автору належить формалізація постановки задачі в частині реалізації передавання сигналів по ОВ, обґрунтування процесу ефективного передавання оптичних сигналів. В [20, 33, 34] автору належить постановка задач, розробка моделей ОК, розрахунок їх параметрів та аналіз отриманих результатів. В [5, 21, 48] автору належать основні положення розробленого методу контролю механічного стану ОВ діелектричного самоутримного оптичного кабелю при експлуатації, аналіз механічних навантажень на ОК. В [22] автору належить обґрунтування вимог до сучасних конструкцій ОК та елементів ВОЛЗ в цілому. В [23] автору належить

аналіз сучасних напрямів та перспективи розвитку волоконно-оптичного зв'язку. В [32, 41] автору належить розробка моделей осердя ОК та аналіз їх впливу на його механічні характеристики. В [35, 37] автору належить обґрунтування підходів до визначення законів розподілу пошкоджень оптичних кабелів ВОЛЗ. В [36, 39, 42, 49] автору належить обґрунтування підходів до визначення ймовірнісних показників надійності ВОЛЗ. В [31, 38, 40, 41, 47, 48] автору належить обґрунтування підходів до визначення відносного видовження ОВ порівняно з довжиною трубки ОМ та інших елементів кабелю. В [43] автору належить перевірка закону розподілу часу напрацювання на відмову ВОЛЗ критеріями згоди. В [45, 46] автору належить обґрунтування підходів та оцінка втрат сигналу в елементах лінійного тракту ВОЛЗ. В [50] автору належить розроблена модель ОК з багатоповивною модульною конструкцією осердя.

Апробація результатів роботи. Основні наукові результати і положення дисертації представлялися, доповідалися та всебічно обговорювалися на 26 міжнародних та всеукраїнських науково-технічних, науково-практичних конференціях [24 – 49].

Публікації. За результатами досліджень, які викладені в дисертації, опубліковано 50 наукових праць, серед яких: 21 стаття у наукових виданнях, включених до Переліку фахових видань України (20 у співавторстві) [1 – 21], серед яких 3 статті у періодичних виданнях, включених до категорії «А» Переліку наукових фахових видань України [19 – 21], що проіндексовані в базах даних Scopus [19] та WebOfScience [20, 21], 2 колективні монографії [22, 23], 26 публікацій у збірниках праць всеукраїнських, міжнародних науково-практичних та науково-технічних конференцій (26 у співавторстві) [24 – 49], з яких 1 проіндексована в науково-метричній базі Scopus [24], 1 патент на корисну модель [50].

Структура і зміст роботи. Дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел та 7 додатків. Загальний обсяг роботи становить 484 сторінок друкованого тексту, із них 13 сторінок вступу, 294 сторінки основного тексту, 66 сторінки з окремими рисунками і таблицями, список використаних джерел нараховує 213 найменувань на 26 сторінках, 50 сторінок додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

У **вступі** розкрито суть і стан проблеми. Наведено базові положення дисертаційної роботи, обґрунтовано її актуальність та доцільність, відображено її зв'язок з науковими програмами та планами, визначено мету роботи й коло вирішених завдань, методи дослідження, показано її наукову новизну й практичну значимість для галузі зв'язку і виробництва засобів зв'язку, наведено інформацію про особистий внесок здобувача, апробацію та впровадження результатів роботи, структуру і загальний обсяг дисертації.

У **першому розділі** дисертації на основі короткого огляду літератури з теми дослідження здійснюється аналіз стану проблеми та визначається, що підвищення вимог до якості та безвідмовності роботи ТЕКМ зв'язку країни потребує підвищеної уваги до забезпечення надійності ВОЛЗ та її елементів. Проблема

надійності ВОЛЗ містить надто широке коло проблем та питань, пов'язаних з розробкою та виробництвом її елементів до проектування та експлуатації ВОЛЗ. Показано, що до сьогодні ця проблема вирішувалася реалізацією окремих задач або за допомогою підходу, який має низку невирішених задач. Наразі вона потребує реалізації комплексного підходу до забезпечення надійності ВОЛЗ на етапах проектування та експлуатації. Обґрунтовано, що, враховуючи високу надійність сучасної апаратури, основну частину забезпечення надійності ВОСП складає надійність лінійних споруд ВОЛЗ. Водночас до складових забезпечення надійності ВОЛЗ входить низка етапів, частина яких відтворена в науково-технічній документації (НТД) не повною мірою, а частина – потребує теоретичних та практичних розробок у цілому. До неї належать: розвиток теорій проектування та оптимізації модульних конструкцій ОК зв'язку, забезпечення надійності ВОЛЗ на етапах виробництва ОК та її будівництва; розвиток та обґрунтування підходів до визначення показників експлуатаційної надійності ліній зв'язку ВОСП; забезпечення достовірного контролю та прогнозування якості і безвідмовності роботи лінійних споруд ВОЛЗ в різних кліматичних районах; забезпечення надійності ВОЛЗ комплектами ЗІП.

З огляду на це в розділі сформуовано постановку задач для дослідження та розв'язання проблеми, вирішення яких дозволило досягти поставленої в дисертації мети.

У **другому розділі** з забезпечення технічної та економічної ефективності проектування та експлуатації ВОЛЗ оптимальними модульними конструкціями ОК знайшла розвиток теорія їх проектування та оптимізації.

Для забезпечення ефективних проектування та експлуатації лінійних споруд ВОЛЗ на основі обґрунтованих теоретичних підходів забезпечення механічної міцності та передавальних параметрів ОК в роботі були розроблені методи оптимізації багатомодульної моделі осердя конструкції ОК.

Розробка методу оптимізації осердя багатомодульної моделі конструкції ОК. Метою розробки є оптимізація вибору та розрахунку конструктивних елементів осердя кабелів для абонентських ліній при зменшенні їх матеріаломісткості. На основі теоретичної та експериментальної складових отримано низку нових наукових результатів з оптимізації багатомодульної моделі конструкції ОК. Розробка конструкції ОК проводиться шляхом вибору його моделі та визначення максимального допустимого розтягувального навантаження. Допустиме розтягувальне навантаження кабелю ($F_{\text{дк}}$), яке забезпечуються лише силовими елементами (у центральному (ЦСЕ) із склопластикового стержня та в периферійному (ПСЕ) із арамідних ниток) визначається за виразом:

$$F_{\text{дк}} = \varepsilon_{\text{дк}} E_{\text{сп}} S_{\text{ЦСЕ}} + \frac{\varepsilon_{\text{дк}}}{\sin \beta_1} E_{\text{ан}} S_{\text{ПСЕ}}, \quad (1)$$

де $F_{\text{дк}}$ – допустиме розтягувальне навантаження кабелю, Н; $\varepsilon_{\text{дк}}$ – допустиме відносне видовження кабелю; $E_{\text{сп}}, E_{\text{ан}}$ – модуль Юнга склопластику та арамідних ниток, відповідно, Н/мм²; $S_{\text{ЦСЕ}}, S_{\text{ПСЕ}}$ – площа поперечного перетину ЦСЕ та ПСЕ відповідно, мм²; β_1 – кут скручування елементів ПСЕ, град.

Як відомо, ОВ розташовуються в трубках оптичних модулів (ОМ) та пазах

профільованого осердя по гелікоїді внаслідок усадки їх матеріалів при виготовленні кабелю.

Діаметр трубки ОМ ($d_{\text{ОМ}}$) потрібно вибирати відповідно до вимог до величини $F_{\text{дк}}$, оскільки останнє залежить від величини відстані між ОВ (або пучком ОВ) та внутрішньою поверхнею стінки трубки ОМ. Для визначення $d_{\text{ОМ}}$ в методі використовується квадратне рівняння:

$$d_{\text{ОМ}}^2 (2p-1)((2p-1)+2k) - 2d_{\text{ОМ}}d_{\text{СОВ}}(1-k-2p) + \frac{((\epsilon_{\text{дк}}+1)^2-1)h^2}{\pi^2} + d_{\text{СОВ}}^2 = 0, \quad (2)$$

де $d_{\text{ОМ}}$ – діаметр ОМ, мм; p – коефіцієнт, що враховує товщину стінки ОМ, $p = (0,15 \dots 0,2)$; k – коефіцієнт, що залежить від кількості елементів (ОМ або ОМ та заповнювальних елементів (ЗЕ)) в повиві кабелю; $\epsilon_{\text{дк}}$ – допустиме відносне видовження кабелю; h – крок спірального укладання елементів осердя кабелю навколо ЦСЕ, мм; $d_{\text{СОВ}}$ – діаметр пучка ОВ в трубці ОМ.

Задачу розробки багатомодульних конструкцій ОК зі значною кількістю ОВ розв'язано для багатоповивної структури осердя кабелів, при розташуванні елементів, ОМ (або ОМ та ЗЕ або ОМ та жил дистанційного живлення) послідовно концентричними шарами (повивами) навколо ЦСЕ.

Проведено дослідження кількох моделей багатоповивних ОК на 144, 216 та 288 ОВ. Запропоновані моделі осердя цих ОК конструктивно відрізняються кількістю ОВ, повивів та діаметрами трубок ОМ і створюють можливість оптимізації багатомодульної конструкції осердя моделей. Як встановлено з результатів досліджень допустимі відносні видовження ОК за першими повивами усіх розроблених моделей менші, ніж відносні видовження наступних повивів. Більше значення максимального видовження ОК ($\epsilon_{\text{МК}}$) наступних після першого повивів обумовлене більшим радіусом вигину ОМ, що створює більшу надлишкову довжину ОВ в ОМ та одночасно потребує більших витрат їх матеріалів.

Аналіз результатів розрахунків чотирьох моделей багатомодульних конструкцій ОК показав, що забезпечення $\epsilon_{\text{МК}}$ ОК при радіусах спірального укладання ОМ R (від 1,8 до 3,0) мм для наступних після першого повивів є недоцільним. Це призводить до більшого розрахункового значення розтягувального навантаження кабелю, ніж $F_{\text{дк}}$ та значних матеріальних витрат насамперед на СЕ кабелю. Тому розрахунок $F_{\text{дк}}$ необхідно проводити за параметрами першого повиву ОК. Отже, розробка моделі багатоповивної конструкції осердя кабелів за величиною $F_{\text{дк}}$ повинна визначатися геометричними параметрами першого повиву з корегуванням (збільшенням) кроку спірального укладання елементів інших повивів.

Розробка методу оптимізації багатомодульної моделі конструкції ОК за критерієм мінімальної собівартості. Метою розробки є оптимізація багатомодульної моделі конструкції ОК за критерієм мінімальної собівартості.

Для дослідження обрано двоповивну багатомодульну модель конструкції ОК з: ЦСЕ зі склопластикового стержня, оптичне волокно, його полімерне покриття, трубки ОМ, гідрофобного заповнювача ОМ, водоблокувальної стрічки, ПСЕ із арамідних ниток, захисного шлангу.

Розрахунок собівартості ОК базується на визначенні маси його елементів та ціни матеріалу на їх виготовлення. Основні елементи ОК мають циліндричну суцільну (ОВ, ЦСЕ, ЗЕ) або трубчасту (трубка ОМ, захисний шланг) форму, їх маси визначаються за виразами:

$$M_{\text{стер}} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \gamma \cdot l \cdot K ; \quad M_{\text{тр}} = \pi \cdot D_{\text{сд}} \cdot \delta \cdot \gamma \cdot l \cdot K , \quad (3)$$

де $M_{\text{стер}}$, $M_{\text{тр}}$ – маса елемента, кг/км; d – діаметр суцільного елемента, мм; $D_{\text{сд}}$ – середній діаметр трубчастого елемента, мм; δ – товщина стінки трубчастого елемента, мм; l – довжина елемента, км; γ – щільність матеріалу елемента, кг/мм³; K – конструктивно-технологічні коефіцієнти (укрутки, спіральності та інше).

Загальна вартість матеріалів та напівфабрикатів елементів ОК визначається за виразом:

$$C = \sum_{i=1}^n C_{\text{елі}} , \quad (4)$$

де C – загальна вартість матеріалів елементів кабелю та напівфабрикатів, грн/км; i – порядковий номер елемента ОК; n – кількість елементів конструкції ОК, шт; $C_{\text{елі}}$ – вартість матеріалів або напівфабрикатів i -го елемента ОК, грн/км.

Розробка багатоповивної моделі конструкції осердя кабелю за величиною $F_{\text{дк}}$ враховує геометричні параметри елементів першого повиву, а її оптимізація за рахунок зміни параметрів елементів другого повиву, а саме: збільшення кроку спірального укладання елементів та зменшення діаметра $d_{\text{ОМ2}}$ та $n_{\text{ОВ}}$ в модулі.

У процесі експериментальних досліджень розроблено дві оптимальні моделі двоповивного ОК на 144 ОВ – модель № II та модель № III (зі зменшеним діаметром ОМ другого повиву осердя).

Аналіз результатів досліджень методу показав, що: зменшення загальної ціни кабелю можливо за рахунок зменшення маси його елементів та покращення технології їх виготовлення при зменшенні норм відходів на елемент ОК; це дає можливість підвищення фінансової та економічної ефективності при експлуатації лінійних споруд ВОЛЗ реалізованих ОК з оптимізованими конструкціями за рахунок зменшення об'єму використання в трубах та лотках кабельної каналізації, оглядових пристроях та шахтах ОПП (ОРП) систем передавання.

Розробка методу удосконалення вибору силових елементів при проєктуванні оптимальної конструкції оптичного кабелю. Метою розробки методу є удосконалення вибору нових типів матеріалів для СЕ ОК. Метод реалізовано на одноповивній 6-елементній моделі конструкції ДСОК, для якої складові та геометричні параметри осердя, які впливають на величини максимального допустимого ($F_{\text{МК}}$) та допустимого ($F'_{\text{дк}}$) розтягувальних навантажень є значення $\epsilon_{\text{МК}}$, $\epsilon_{\text{дк}}$, модулів Юнга їх матеріалів та площі поперечного перетину СЕ. На $F'_{\text{ПСЕ}}$ впливає кут спірального укладання арамідних ниток ПСЕ, який залежить від радіусу спірного укладання навитих елементів, відстані між ОВ або пучком ОВ і внутрішньою поверхнею стінки трубки ОМ, кроку спірального укладання елементів повиву осердя.

Удосконалення вибору СЕ є задачею оптимізації вибору діаметра ЦСЕ $d_{\text{ЦСЕ}}$ (із склопластика) та кількості і типу арамідних ниток ПСЕ при дослідженні їх

впливу на конструктивні та геометричні параметри моделі ОК. Вибір кількості та типу арамідних ниток в ПСЕ дозволяє досягти та забезпечити значення складових заданих $F_{\text{МК}}$ та $F'_{\text{ДК}}$ кабелю, виходячи з одержаного значення його максимального поздовжнього видовження ($\epsilon_{\text{МК}}$). При розробці методу одержані залежності величин $F'_{\text{ЦСЕ}}$ (рис. 1) та $F'_{\text{ПСЕ}}$ (рис. 2): від діаметру ЦСЕ та кількості арамідних ниток ПСЕ, різній структурі моделі осердя ДСОК, без урахування значення допустимого відносного видовження ОВ ($\epsilon_{\text{ДОВ}}$).

Аналіз результатів експериментальних досліджень методу показав, що: удосконалення вибору силових елементів ДСОК дає різний характер залежностей розтягувальних навантажень, які забезпечуються ЦСЕ та ПСЕ, а діаметр ЦСЕ є головним параметром осердя при визначенні величин $F'_{\text{ЦСЕ}}$ та $F'_{\text{ПСЕ}}$; використання арамідних ниток в якості ПСЕ дає вклад в $F_{\text{МК}}$ кабелю більший, ніж склопластиковий стержень ЦСЕ; на етапі проектування досліджуваної моделі ДСОК для оптимізації конструкції за рахунок правильного вибору $d_{\text{ЦСЕ}}$ необхідно рекомендувати отримані залежності $F'_{\text{ЦСЕ}}$ та $F'_{\text{ПСЕ}}$ від $d_{\text{ЦСЕ}}$.

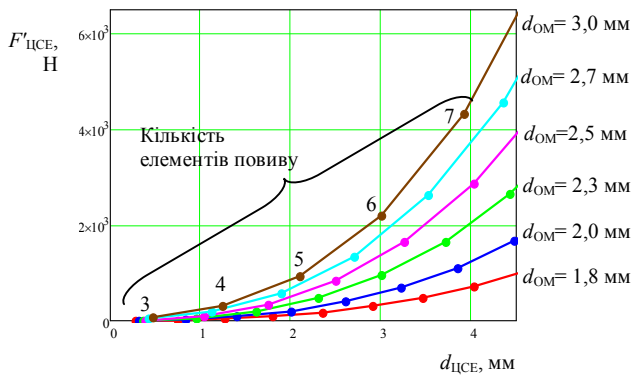


Рисунок 1 – Залежності $F'_{\text{ЦСЕ}}$ від діаметру ЦСЕ, $d_{\text{ЦСЕ}}$, при різних кількості та діаметрах ОМ в повиві кабелю без урахування значення $\epsilon_{\text{ДОВ}}$

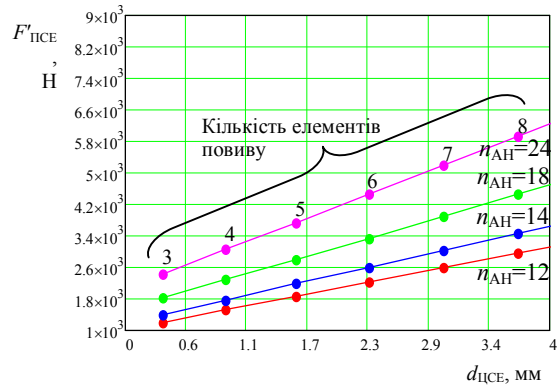


Рисунок 2 – Залежності $F'_{\text{ПСЕ}}$ від діаметру ЦСЕ, $d_{\text{ЦСЕ}}$, при різних кількості елементів діаметром 2,3 мм в повиві кабелю без урахування значення $\epsilon_{\text{ДОВ}}$

У **третьому розділі** роботи отримала розвиток теорія забезпечення надійності ВОЛЗ на етапах проектування та експлуатації. Розвиток сучасних ВОЛЗ потребує забезпечення високого рівня надійності як у процесі виробництва їх складових, зокрема ОК, так і на етапах їх будівництва та експлуатації. У процесі досліджень вирішено задачі з: оцінки температурного впливу на ОВ при виготовленні ОК і в умовах експлуатації лінії; аналізу основних порушень технології виробництва ОК та будівництва ВОЛЗ; розробки рекомендацій з їх недопущення.

Унаслідок різниці значень температурних коефіцієнтів лінійного розширення матеріалів елементів кабелю (α_0), при дії температури в його конструкції виникає зміна довжин елементів та через що утворюється їх екстремальні розтягувальні або стискальні зусилля. Такий стан ОК може призводити до появи в ОВ розтягувальних або стискальних зусиль за рахунок надлишкового збільшення або зменшення довжини ОВ порівняно з довжиною трубки ОМ. Це може спричинити непередбачувану зміну параметрів передавання

(коефіцієнта загасання та дисперсії сигналу), передчасне старіння та вихід з ладу ОК і, як наслідок, всієї ВОЛЗ, що завадить забезпечити мінімальний термін експлуатації кабелю в 30 років.

Особливу увагу в розділі приділено **розробці методу оцінки температурного впливу умов експлуатації ВОЛЗ на геометричні розміри й параметри осердя ОК**. Метою розробки є оцінка температурного впливу умов експлуатації ВОЛЗ на геометричні розміри і конструктивні параметри осердя одноповивного ОК, що створює можливість оцінки його конструкції для ефективних проектування та експлуатації ВОЛЗ фрагментів ТЕКМ зв'язку. Наявність в конструкції ОК елементів, виготовлених із матеріалів з різними α_0 , є причиною різної зміни їх геометричних розмірів. Тому при зміні температури ОК з'являється пружно-деформований стан унаслідок цієї різниці, зокрема ОВ та трубки ОМ. З появою в ОВ розтягувальних або стискальних зусиль може з'явитися непередбачена зміна параметрів передавання.

Оцінка температурного впливу умов експлуатації на:

– геометричні розміри елементів осердя виконується визначенням діаметрів трубки ОМ, ЦСЕ (d_{OM} , $d_{ЦСЕ}$), кроком спірального укладання елементів повиву кабелю (Δh) та радіусом спірального укладання елементів повиву. Зміна діаметрів трубки ОМ та ЦСЕ від температури експлуатації визначається за виразами:

$$d_{OM}(t) = d_{OM}^{20} [1 + \alpha_{ТОМ}(t - 20)]; \quad d_{ЦСЕ}(t) = d_{ЦСЕ}^{20} [1 + \alpha_{ЦСЕ}(t - 20)], \quad (5)$$

де $d_{OM}(t)$, $d_{ЦСЕ}(t)$ – діаметри трубки ОМ та ЦСЕ при температурі експлуатації (в $^{\circ}\text{C}$), відповідно, мм; d_{OM}^{20} , $d_{ЦСЕ}^{20}$ – діаметр трубки ОМ та ЦСЕ при температурі 20°C , мм; $\alpha_{ТОМ}$, $\alpha_{ЦСЕ}$ – температурний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР) матеріалу трубки ОМ та ЦСЕ, відповідно, K^{-1} ; t – температура експлуатації ОК, $^{\circ}\text{C}$;

– конструктивні параметри осердя ОК виконується визначенням значень $\varepsilon_{\text{дк}}(t)$ та $F_{\text{дкЦСЕ}}(t)$:

$$\text{а) } \varepsilon_{\text{дк}}(t) = -1 + \sqrt{1 + \frac{4\pi^2}{(h^{20} + \Delta h)^2} \left(d_{OM}^{20} \left(\frac{[1 + \alpha_{ТОМ}(t - 20)] + (k + 1)[1 + \alpha_{ЦСЕ}(t - 20)]}{(k + 1)[1 + \alpha_{ЦСЕ}(t - 20)]} \right) \Delta R(t) - \Delta R(t)^2 \right)}, \quad (6)$$

де $\varepsilon_{\text{дк}}(t)$ – допустиме відносне видовження ОК за температурою умов експлуатації; h^{20} – крок спірального укладання елементів повиву при температурі 20°C , мм; Δh – зміна кроку укладання елементів повиву, мм; d_{OM}^{20} – діаметр трубки ОМ при температурі 20°C , мм; $\alpha_{ТОМ}$, $\alpha_{ЦСЕ}$ – ТКЛР матеріалів трубки ОМ та ЦСЕ, відповідно, K^{-1} ; t – температура експлуатації ОК, $^{\circ}\text{C}$; $k_{\text{п}}$ – коефіцієнт зв'язку між діаметрами ЦСЕ та трубки ОМ; $\Delta R(t)$ – відстань між ОВ (скрутнем ОВ) та внутрішньою поверхністю трубки ОМ при зміні температури експлуатації, мм;

$$\text{б) } F_{\text{дкЦСЕ}}(t) = \varepsilon_{\text{дк}}(t) \cdot E_{\text{ЦСЕ}} \cdot S_{\text{ЦСЕ}}, \quad (7)$$

де $F_{\text{дкЦСЕ}}(t)$ – допустиме розтягувальне зусилля кабелю, що забезпечується ЦСЕ, при температурі його експлуатації, Н; $\varepsilon_{\text{дк}}(t)$ – допустиме відносне видовження кабелю при температурі умов експлуатації; $E_{\text{ЦСЕ}}$ – модуль Юнга, $\text{H}/\text{мм}^2$; $S_{\text{ЦСЕ}}$ – площа поперечного перетину ЦСЕ, мм^2 .

Експериментальні дослідження методу дозволили встановити геометричні розміри елементів одноповивної конструкції ОК з числом ОМ від 3 до 12 при

зміні температури (від мінус 40 до +60) °С, ($\Delta h(t)$, $R(t)$, $d_{\text{ОМ}}(t)$ та $d_{\text{ЦСЕ}}(t)$), а також конструктивні параметри осердя $\varepsilon_{\text{дк}}(t)$, $k_{\text{п}}$ та $F_{\text{дкЦСЕ}}(t)$. Вони проведені при умові: крок спірального укладання елементів повиву при $t = 20$ °С рівним $h = 100$ мм, α_0 матеріалів елементів ОК прийняті із табл. В.2 Додатку В дисертаційної роботи, діаметр трубки ОМ $d_{\text{ОМ}}^{20}$ в межах (2...3) мм, коефіцієнт $k_{\text{п}} = 1$ для 6-елементної конструкції, радіальна товщина стінки трубки ОМ $t_{\text{ТОМ}}^{20} = 0,2 \cdot d_{\text{ТОМ}}^{20}$, діаметр скрутка 12 кварцових ОВ $d_{\text{ОВ}}^{20} = 1,06$ мм.

Таким чином, на основі удосконалених виразів $\varepsilon_{\text{дк}}(t)$ та $F_{\text{дкЦСЕ}}(t)$ визначено їх температурну залежність, представлені на рис. 3.

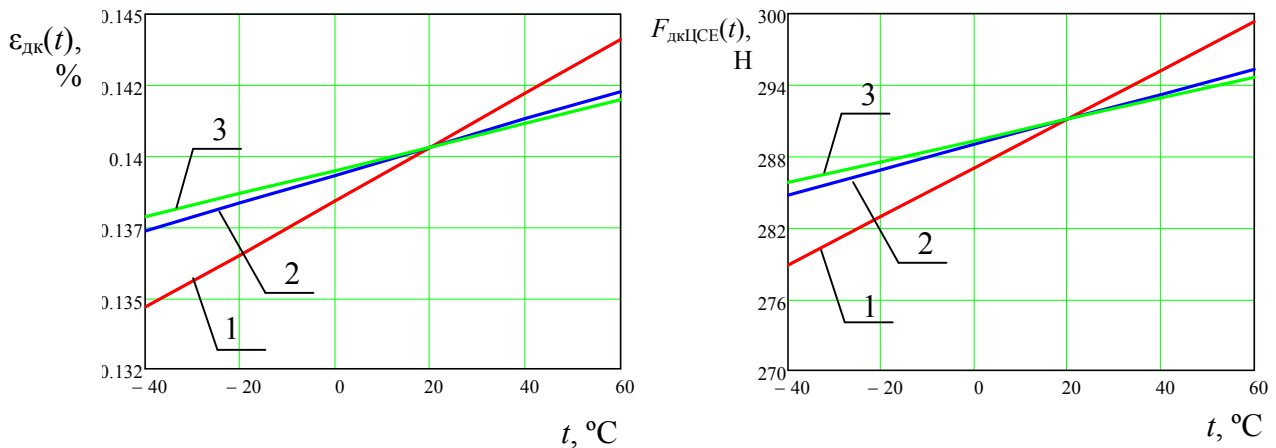


Рисунок 3 – Температурні залежності: а) допустимого відносного видовження ОК; б) допустимого розтягувального зусилля ОК при різних матеріалах трубки ОМ: 1 – полібутилентерефталат; 2 – поліамід; 3 – полікарбонат

На основі отриманих результатів в підрозділі рекомендовано:

– заводам-виробникам використовувати: а) результати оцінки термомеханічних впливів на ОВ і трубки ОМ із різних матеріалів у процесі виробництва кабелю та аналізу основних причин порушень технології виробництва ОК і будівництва ВОЛЗ та рекомендації з їх недопущення;

б) обґрунтовані підходи з удосконалення визначення геометричних розмірів елементів осердя ОК в процесах розробки конструкції та виготовлення кабелів;

– організаціям-замовникам будівництва ВОЛЗ для контролю процесу її будівництва використовувати: а) дані з указаних можливих основних порушень технології будівництва ВОЛЗ, їх наслідків та негараздів;

б) рекомендації з недопущення порушення технології виконання різних видів робіт при будівництві ВОЛЗ;

в) рекомендації робочій комісії замовника будівництва ВОЛЗ не відступати від установленого порядку з організації належного контролю якості складових компонентів ВОЛЗ, виконання будівельних робіт.

У **четвертому розділі** з розвитку та обґрунтування підходів до визначення показників експлуатаційної надійності ліній зв'язку ВОСП проведені дослідження, в рамках яких:

а) розглянуті експлуатаційні показники якості роботи та кількісні характеристики надійності ВОЛЗ. Водночас приділено увагу взаємозв'язку

окремих кількісних характеристик надійності та оцінці їх ймовірності;

б) проведено дослідження основних впливових факторів на надійність ВОЛЗ та виявлені:

– залежність кількості відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку від пори року і місцевості експлуатації;

– розподіл питомої ваги відмов лінії, їх експлуатаційні показники якості роботи підземних кабельних ліній мережі Донецької та Луганської областей від умов експлуатації та пори року за 13-річний термін з 2001 по 2013 роки (щільність відмов (m_L), середній час відновлення зв'язку ($t_{\text{счвз}}^{\text{п}}$) та середній час повного усунення пошкодження ($t_{\text{счп}}^{\text{п}}$) і середні, максимальні та мінімальні значення інтенсивності відмов для броньованих та неброньованих ОК);

в) проведено порівняльний аналіз значень цих експлуатаційних показників якості роботи ВОЛЗ за 13 років із значеннями показників за 5 років;

г) визначено значення кількісних показників надійності ВОЛЗ в кліматичних районах (гірських, рівнинних та причорноморських) країни за 13-річний термін;

д) обґрунтовані необхідність та послідовність визначення показників надійності при проектуванні та експлуатації ВОЛЗ або ВОСП;

ж) приведено задачі з розрахунку параметрів надійності лінійних споруд ВОСП, що проєктуються або експлуатуються, та приклади розрахунку коефіцієнта простою при проєктуванні ВОСП з резервуванням на мережах SDH.

Експлуатаційні показники якості роботи ВОЛЗ m_L , λ та $t_{\text{счвз}}^{\text{п}}$ визначаються за виразами:

$$m_L = \frac{N}{K \cdot L} \cdot 100; \quad \lambda = \frac{m_L}{8760 \cdot 100}; \quad t_{\text{счвз}}^{\text{п}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{\text{вi}}^{\text{п}}, \quad (8)$$

де m_L – щільність відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку на лінії довжиною L , 1/рік; N – кількість відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку на лінії зв'язку протягом заданого проміжку часу; K – кількість років, за які виникло N відмов, рік; L – довжина лінії зв'язку, км; 100 – довжина лінії зв'язку, на яку визначається щільність відмов, км; λ – інтенсивність відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку на 1 км ВОЛЗ за 1 год, 1/год; 8760 – кількість годин протягом року; $t_{\text{счвз}}^{\text{п}}$ – середній час відновлення зв'язку, год; i – номер відмови; $t_{\text{вi}}^{\text{п}}$ – час відновлення зв'язку за i -ої відмови (пошкодження), год.

Результати розрахунків m_L , $t_{\text{счвз}}^{\text{п}}$, $t_{\text{счп}}^{\text{п}}$ Донецької та Луганської областей за 2001...2005 роки, 2006...2013 роки та 2001...2013 роки наведені на рис. 4. Вони показали, що: m_L зменшилась на 19,3 %, $t_{\text{счвз}}^{\text{п}}$ збільшився на 7 %, а $t_{\text{счп}}^{\text{п}}$ зменшився на 39,3 %. Наведені розрахункові значення середніх експлуатаційних показників якості роботи: λ , $t_{\text{счвз}}^{\text{п}}$ та $t_{\text{счп}}^{\text{п}}$ кабелів ТЕКМ зв'язку створюють можливість для підвищення точності визначення показників надійності ВОЛЗ цих областей та розробки практичних рекомендацій мінімізації ризику пошкоджень і забезпечення норм показників надійності.

Експериментальні дослідження m_L , λ , $t_{\text{счвз}}^{\text{п}}$ та $t_{\text{счп}}^{\text{п(б)}}$ проводяться на основі

обробки реальних статистичних даних пошкоджень ТЕКМ зв'язку країни в Львівській, Донецькій та Одеській областях, які належать до гірських, рівнинних та причорноморських районів, дозволили отримати середні значення інтенсивності відмов та середнього часу відновлення зв'язку для броньованих та неброньованих підземних кабельних ВОЛЗ за 13 років (рис. 5). Отримані експлуатаційні показники якості роботи ліній ТЕКМ зв'язку в областях країни за 13-річний термін – середні значення λ , $\lambda_{\max}$, $\lambda_{\min}$ та $t_{\text{счвз}}$ для броньованих та неброньованих ОК наведено в табл. 1. На базі статистичних даних про кількість,

причину та характер пошкоджень лінійних споруд ВОСП ТЕКМ зв'язку по країні за періоди з 2001 по 2013 рік і з 2001 по 2005 рік було встановлено, що:

а) отримані середні значення кількісних показників надійності ВОЛЗ по країні за 13-річний термін експлуатації ОК відрізняється від значень показників за 5-річний термін для:

– броньованого ОК середнє значення інтенсивності відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку збільшується на 109,6 %, а неброньованого – на 64,4 %;

– броньованого ОК середнє значення часу відновлення (пошкодження з перервою) зв'язку збільшується на 32,2%, а неброньованого кабелю – на 11,3%;

б) наведені розрахункові значення λ , $\lambda_{\max}$, $\lambda_{\min}$, $t_{\text{счвз}}^{\text{п}}$ ТЕКМ зв'язку країни, отримані за 13-річний термін, є більш достовірними, ніж значення за 5-річний термін. Вони дають можливість визначати кількісні характеристики надійності ВОЛЗ та ВОСП при проектуванні нових ліній та ліній, що експлуатуються, при контролі стану їх технічного обслуговування;

в) при необхідності визначення параметрів надійності ВОЛЗ або ВОСП в певному кліматичному районі у разі відсутності статистичних даних m_L та $t_{\text{счвз}}^{\text{п}}$ з аналогічних діючих систем передавання можуть бути використані наближені значення λ та $t_{\text{счвз}}^{\text{п}}$ (при пошкодженнях з

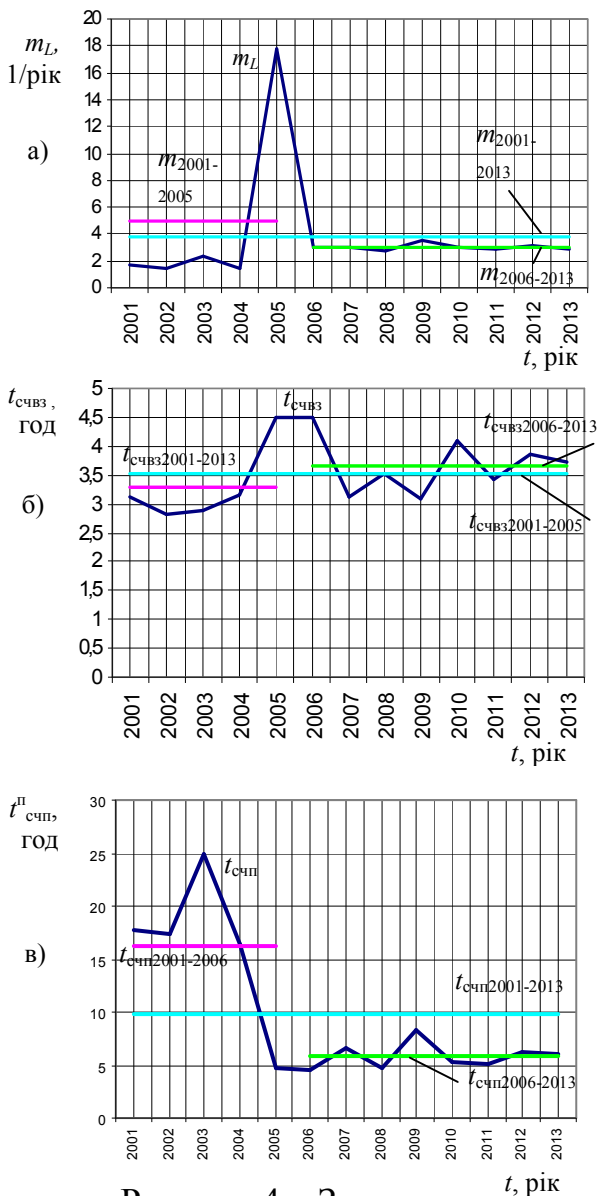


Рисунок 4 – Значення експлуатаційних показників якості роботи ТЕКМ зв'язку Донецької та Луганської областей: а) щільності відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку; б) середнього часу відновлення зв'язку; в) середнього часу повного усунення відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку

перервою) зв'язку, наведені в табл. 1;

г) запропоновану послідовність проектування сумарних показників надійності ВОЛЗ або ВОСП можливо використовувати як при їх проектуванні усього комплексу ліній або системи, так і при проектуванні показників надійності окремих компонентів. Якщо на стадії вибору окремих компонентів лінії або системи передавання значення їх показників надійності відповідають нормам, то такі компоненти доцільно використовувати;

д) наведені приклади розрахунку параметрів надійності ВОЛЗ, що експлуатується, частково не відповідають нормам, тобто вимагають розробки рекомендацій з ліквідації негараздів та їх реалізації для забезпечення проектного строку роботи лінії.

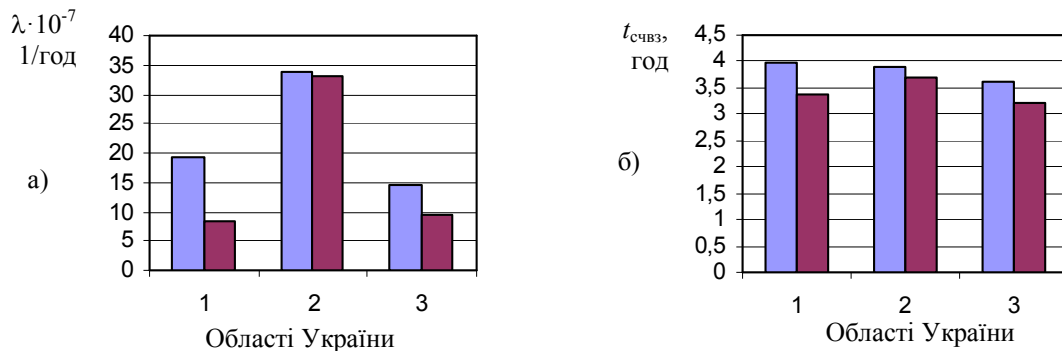


Рисунок 5 – Графіки інтенсивності відмов λ (а), середнього часу відновлення зв'язку $t_{счвз}$ (б) ВОЛЗ: 1 – Львівської, 2 – Донецької, 3 – Одеської областей за періоди (2001...2005) роки (■) та (2001...2013) роки (■)

Таблиця 1 – Середні значення інтенсивності відмов та середнього часу відновлення зв'язку для броньованих та неброньованих підземних кабелів ВОЛЗ транспортної електронної комунікаційної мережі зв'язку України за 13 років

Кліматичні райони	Середні значення інтенсивності відмов на 1 км траси ($\lambda \cdot 10^{-7}$, 1/год) та середній час відновлення зв'язку ($t_{счвз}$, год) на базі							
	броньованого ОК				неброньованого ОК			
	λ	$\lambda_{\text{макс}}$	$\lambda_{\text{мін}}$	$t_{счвз}$	λ	$\lambda_{\text{макс}}$	$\lambda_{\text{мін}}$	$t_{счвз}$
Гірські Карпати	38,31	76,47	22,34	5,17	28,45	66,71	10,86	4,45
Рівнинна частина	20,06	37,27	11,42	4,07	16,62	28,59	8,07	5,32
Узбережжя Чорного та Азовського морів	30,03	43,08	19,31	5,45	11,07	17,60	7,04	4,86
Середнє по країні	29,47	52,27	17,69	4,89	18,71	37,63	8,65	4,87

Таким чином: 1) приведені результати досліджень з розвитку та обґрунтування підходів до визначення експлуатаційних показників надійності ВОЛЗ або ВОСП при проектуванні або їх роботі слід вважати рекомендаційними матеріалами для проєктантів та лінійного персоналу підприємств зв'язку;

2) отримані розрахункові значення середніх експлуатаційних показників якості роботи ВОЛЗ (λ , $\lambda_{\text{макс}}$, $\lambda_{\text{мін}}$, $t_{\text{счвз}}$) ТЕКМ зв'язку країни за 13-річний період (табл. 1) є більш достовірними, ніж їх значення, отримані раніше. Вони можуть бути використані до виходу державних стандартів з показників якості роботи оптичних ліній; 3) значення середніх експлуатаційних показників якості роботи ВОЛЗ дозволяють виконувати: – більш точні розрахунки показників надійності ВОЛЗ або ВОСП у цілому; – розробку практичних рекомендацій щодо мінімізації ризику їх пошкоджень і забезпечення норм показників їх надійності.

У **п'ятому розділі** отримав розвиток контроль технічного стану елементів ВОЛЗ при експлуатації ВОСП. Надійність роботи елементів ВОЛЗ або її елементів ділянки регенерації ВОСП залежить від контролю їхнього технічного стану та оптимізації технічного обслуговування при експлуатації. Контроль технічного стану цих елементів потребує спостереження за параметрами якості та безвідмовності роботи лінії з урахуванням процесу їх старіння і дії екстремальних температур експлуатації. З огляду на це в розділі вирішується комплекс задач, пов'язаних з: дослідженням вибору законів розподілу кількості пошкоджень лінійних споруд ВОЛЗ для визначення точкових оцінок показників надійності ТЕКМ зв'язку; визначенням закону розподілу часу напрацювання на відмову лінійних споруд ВОЛЗ ТЕКМ зв'язку Закарпатської, Донецької та Одеської областей; створенням способу контролю технічного стану лінійних споруд ВОЛЗ за якістю та безвідмовністю роботи в різних кліматичних районах, в рамках якого виконано: – дослідження статистичних даних розподілу часу напрацювання на відмову лінійних споруд ВОЛЗ в Закарпатській, Донецькій та Одеській областях; – розробку методу контролю ймовірнісних показників надійності лінійних споруд ВОЛЗ при початковому терміні експлуатації; – розробку методу контролю механічного стану ОВ ДСОК при експлуатації; – розробку способу визначення параметрів оцінки технічного стану елементів ВОЛЗ ділянки регенерації ВОСП шляхом розподілу її енергетичного запасу між елементами лінії та апаратури системи за допомогою визначення рівнів параметрів-критеріїв відмов.

Забезпечення якості та безвідмовності роботи лінійних споруд ВОЛЗ потребує досліджень причини, характеру та тривалості відмов (пошкоджень з перервою та без перерви) зв'язку на етапі технічної експлуатації. Це вимагає постійного та тривалого збору і обробки статистичних даних про відмови, час напрацювання на відмову та коефіцієнту готовності лінії, визначення законів розподілу характеристик надійності з метою подальшого контролю роботи лінії. Обробка реальних статистичних даних за роками про кількість пошкоджень лінійних споруд ВОЛЗ транспортної електронної комунікаційної мережі зв'язку в умовах Закарпатської, Донецької та Одеської областей за 13-річний період дозволила встановити, що розподіл кількості їх пошкоджень підкоряється закону розподілу Пуассона при рівні значущості $\alpha' = 0,05$ та середній інтенсивності появи пошкодження лінійних споруд ВОЛЗ, яка визначається за виразом:

$$a = \sum_{i=1}^e (x_i \cdot n_i) / \sum_{i=1}^e n_i, \quad (9)$$

де a – середня інтенсивність появи пошкоджень лінійних споруд ВОЛЗ; x_i – кількість пошкоджень лінійних споруд ВОЛЗ, що сталися в i -ій події; n_i – число разів появи цієї кількості пошкоджень лінійних споруд ВОЛЗ; $\sum_{i=1}^e n_i$ – сума випробувальних періодів (років), за які трапилися пошкодження; e – кількість циклів появи пошкоджень.

Перевірка відповідності гіпотетичного закону розподілу теоретичному проводилася за критерієм Пірсона χ^2 . Були отримані полігони відносних частот фактичних та багатокутники теоретичних розподілів кількості пошкоджень лінійних споруд ВОЛЗ ТЕКМ зв'язку даних районів. Одержані розподіли ймовірностей появи пошкоджень лінійних споруд ВОЛЗ в цих областях дозволяють визначати частість (ймовірність) виникнення певної кількості відмов та точкові оцінки показників надійності. Обробка статистичних даних за 13 років експлуатації лінійних споруд ВОЛЗ про час напрацювання на відмову T_{opL}^n в усіх кліматичних районах, використовуючи критерій згоди Пірсона χ^2 , дозволила встановити, що його розподіл підкоряється експоненціальному закону при рівні значущості $\alpha' = 0,05$.

На рис. 6 приведені гістограми емпіричних розподілів та теоретичних ймовірностей потрапляння в інтервали часу напрацювання на відмову лінійних споруд ВОЛЗ ТЕКМ зв'язку за експоненціальним законом у різних кліматичних районах. Одержані ймовірності розподілу часу напрацювання на відмову лінійних споруд ВОЛЗ по областях дозволяють визначати ймовірність напрацювання ліній на відмову в межах кліматичного району та визначати ймовірнісні показники надійності.

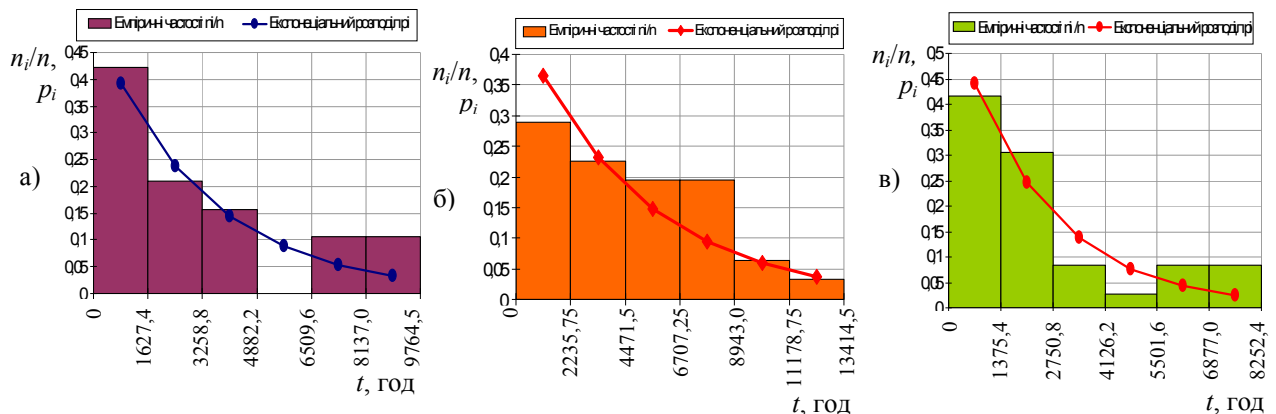


Рисунок 6 – Гістограми емпіричних розподілів та графіки теоретичних ймовірностей потрапляння в інтервали T_{opL}^n лінійних споруд ВОЛЗ в Закарпатській (а), Донецькій (б) та Одеській (в) областях

У розділі *розроблено метод контролю ймовірнісних показників надійності лінійних споруд ВОЛЗ на початковому терміні експлуатації*. Організація належної роботи лінійних підрозділів підприємств зв'язку на початковому часі нормального режиму роботи ВОЛЗ потребує оцінки її ймовірнісних показників надійності. Початковий час нормального режиму роботи

лінії складає від 1 до 5 років. Метою розробки методу є створення способу оцінки ймовірнісних показників надійності ВОЛЗ на початковому етапі її нормального режиму роботи для організації належної експлуатації лінії.

У теоретичній складовій методу розроблені послідовності вирішення задач:

1. Оцінки ймовірнісних показників надійності лінійних споруд ВОЛЗ за вибраний термін експлуатації та кліматичний район їх розташування виражаються у такому: 1) зборі даних розподілу кількості відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку лінійних споруд ВОЛЗ за вибраний термін експлуатації; 2) формуванні статистичного ряду розподілу кількості відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку та визначення його характеристик: значень кількості відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку, x_i ; частоти відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку, n_i ; відносної частоти відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку, n_i / n ; 3) визначенні середньої інтенсивності появи відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку; 4) вибирається гіпотеза закону їх розподілу на основі порівняння фактичних та теоретичних відносних частот розподілу кількості відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку; 5) визначенні закону розподілу відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку; 6) розрахунку експлуатаційних показників надійності ВОЛЗ у відповідності до визначеного закону розподілу її відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку;

2. Визначення параметрів оцінки ймовірнісних показників надійності лінійних споруд ВОЛЗ на початковому терміні експлуатації виражається в: оцінці значень m_L , T_{0pL}^n , $t_{счвз}$ та $K_{гЛ}$; аналізі результатів оцінки ймовірнісних показників надійності лінійних споруд ВОЛЗ; наданні рекомендацій з підвищення якості технічної експлуатації лінійних споруд ВОЛЗ.

Визначення параметрів оцінки ймовірнісних показників надійності лінійних споруд ВОЛЗ проводиться на початковому п'ятирічному терміні їх експлуатації в Одеській області. Визначеним законом розподілу пошкоджень за 13-річний термін експлуатації лінійних споруд ВОЛЗ є експоненціальний закон. Для досліджень були використані спрощені формули розрахунку експлуатаційних показників надійності та використано значення кількості відмов і часу напрацювання між сусідніми відмовами на ВОЛЗ довжиною 200 км за 5 років спостережень.

Отримані значення m_L , T_{0pL}^n , $t_{счвз}$, $K_{гЛ}$ за 5-річний термін часу експлуатації цієї лінії дозволив встановити, що відсотки їх зміни від початкових значень складають у $m_L + 15\%$; T_{0pL}^n – мінус 27 %; $t_{счвз}$ – +9,9 %; $K_{гЛ}$ – мінус 0,08 %. Ці зміни є незначними, але: збільшення m_L , зменшення T_{0pL}^n та $K_{гЛ}$.

Результати досліджень вказали на те, що лінійному персоналу підприємства зв'язку варто звернути увагу на частіше проведення контрольних оглядів і перевірок елементів лінії; збільшення середнього часу відновлення зв'язку вказує на те, що ремонтній групі слід звернути увагу на оптимізацію своєї роботи.

Розроблено метод контролю механічного стану оптичного волокна діелектричного самоутримного оптичного кабелю при експлуатації. При експлуатації ДСОК на ВОЛЗ діють механічні та фізико-кліматичні фактори зони експлуатації, що спричиняють появу механічних напруг у його конструкції. Вони

можуть призвести до появи навантажень на ОВ, що потребує контролю їхнього механічного стану. Метою методу є обґрунтування контролю механічного стану оптичних волокон підвісних ДСОК, а також оцінка умов деформації ОВ в їх осерді при розтягувальних/стискальних навантаженнях.

Контроль механічного стану ОВ при експлуатації кабелю виконується за оцінкою фактичних механічних характеристик ДСОК та результатів експериментальних досліджень: – виміру фактичної стріли провису ДСОК в прольоті повітряної ВОЛЗ (ПВОЛЗ) та розрахунку її величини при дії на кабель температури $t = -5^{\circ}\text{C}$, ваги ожеледі з натиском вітру; – розрахунку фактичних механічної напруги, додаткового видовження та розтягувального навантаження кабелю на різних довжинах прольоту.

Максимально допустиме відносне видовження кабелю залежить від конструктивних особливостей та укладання ОВ в ньому і визначається за виразом:

$$\varepsilon_{\text{мдк}} = \varepsilon_{\text{дк}} + \varepsilon_{\text{надлОВ}} + \varepsilon_{\text{дОВ}}, \quad (10)$$

де $\varepsilon_{\text{мдк}}$ – максимально допустиме відносне видовження кабелю, %; $\varepsilon_{\text{дк}}$, $\varepsilon_{\text{дОВ}}$ – допустимі відносні видовження кабелю та ОВ, відповідно, %; $\varepsilon_{\text{надлОВ}}$ – надлишкова довжина оптичного волокна в трубі ОМ кабелю, %.

Результати розрахунку $\varepsilon_{\text{мдк}}$ (10) та його допустимого відносного видовження при значеннях допустимого видовження ОВ та його надлишкової довжини в трубі ОМ за даними розробника ДСОК дають можливість оцінки механічного стану ОВ в кабелі шляхом порівняння зі значенням фактичного додаткового відносного видовження. Воно при певних кліматичних умовах на ПВОЛЗ визначається за виразом:

$$\varepsilon_{\text{фдкх}} = \frac{\sigma_{\text{фх}}}{E_{\text{екв}}}, \quad (11)$$

де $\varepsilon_{\text{фдкх}}$ – фактичне додаткове відносне видовження кабелю; $\sigma_{\text{фх}}$ – фактична механічна напруга кабелю, кг/мм^2 ; $E_{\text{екв}}$ – еквівалентний модуль Юнга кабелю, кг/мм^2 .

Фактична механічна напруга кабелю визначається за виразом:

$$\sigma_{\text{фх}} = \frac{L_{\text{пр}}^2 \cdot \gamma_1}{8 \cdot f_{\text{фх}}}, \quad (12)$$

де $\sigma_{\text{фх}}$ – фактична механічна напруга кабелю на довжині прольоту лінії, кг/мм^2 ; $L_{\text{пр}}$ – довжина прольоту ПВОЛЗ, м; γ_1 – питоме навантаження від власної ваги кабелю, $\text{кг/(м} \cdot \text{мм}^2)$; $f_{\text{фх}}$ – фактична стріла провисання кабелю в прольоті лінії, м.

Фактичне розтягувальне навантаження кабелю при дії певних кліматичних умов визначається за виразом:

$$F_{\text{фрнх}} = \sigma_{\text{фх}} \cdot S_{\text{СЕ}} \cdot g, \quad (13)$$

де $F_{\text{фрнх}}$ – фактичне розтягувальне навантаження кабелю, Н; $\sigma_{\text{фх}}$ – фактична механічна напруга кабелю, кг/мм^2 ; $S_{\text{СЕ}}$ – площа поперечного перетину усіх силових елементів кабелю, мм^2 ; g – стала Галілея, Н/кг.

Аналіз результатів контролю механічного стану ОВ ДСОК показав, що марка кабелю ОКЛ-3-Д2А14 з заданими параметрами конструкції при довжині прольоту ПВОЛЗ 100 м при найгірших кліматичних умовах забезпечує механічну цілісність ОВ при додатковому відносному видовженні 0,16 %, але за фактичним

розтягувальним зусиллям не відповідає нормі – 2,6 кН (рис. 7).

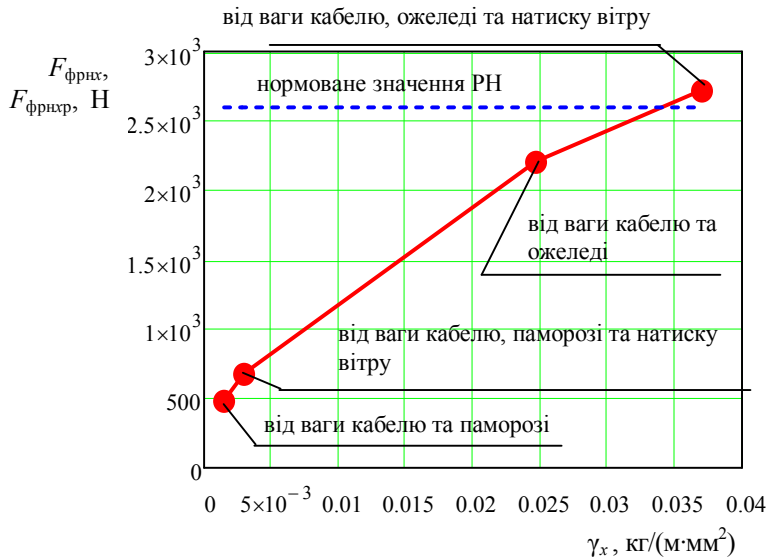


Рисунок 7 – Залежність розтягувального навантаження кабелю від питомих навантажень ПВОЛЗ на довжині прольоту 100 м

регенерації ВОСП шляхом розподілу її загального енергетичного запасу між елементами лінії та знаходження рівнів їх параметрів-критеріїв відмови. Це дозволило встановити функціональний зв'язок між допустимими (номінальними) значеннями загасання сигналу ($\alpha_{\text{ні}}$) в кожному елементі ВОЛЗ і гранично допустимими значеннями загасання сигналу (A) в цих елементах при їх старінні і відгуку на температурну дію середовища експлуатації. Значення A в елементі ВОЛЗ прийнято як параметри-критерії параметричної відмови за екстремальних значень додатної і від'ємної температур (ПКВЕТ).

Виходячи з величини енергетичного запасу E_z регенераційної ділянки ВОСП, що припадає на кожний елемент (E_{zi}), одержано рівень ПКВ по загасанню сигналу елемента ВОЛЗ ($\alpha_{\text{ПКВ}i}$) за виразом:

$$\alpha_{\text{ПКВ}i} = \alpha_{\text{ні}} + E'_{zi}, \quad (14)$$

де $\alpha_{\text{ПКВ}i}$ – загасання i -го елемента ВОЛЗ, дБ; $\alpha_{\text{ні}}$ – номінальне значення загасання сигналу елементів ВОЛЗ згідно ТУ на елемент, дБ; E'_{zi} – рівень ПКВ i -го елемента за розподілом його мінімального і максимального значення.

За результатами розрахунку параметра-критерію відмови (ПКВ) на регенераційних ділянках ВОСП рівнів ієрархії СТМ-1, СТМ-4, СТМ-16 та СТМ-64 з метою визначення та оцінки технічного стану елементів ВОЛЗ необхідно в якості рівнів ПКВ елементів по загасанню сигналу вибирати середні значення $\alpha_{\text{ПКВЕТ}i}$ і $\alpha_{\text{ПКВ}i}$, які дорівнюють, відповідно, $\alpha_{\text{ПКВЕТ}i} = 1,158 \alpha_{\text{ні}}$ (за екстремальних температур середовища експлуатації) та $\alpha_{\text{ПКВ}i} = 1,105 \alpha_{\text{ні}}$ (за температури 20 °С).

На основі виконаних досліджень та установлених результатів у розділі рекомендовано: а) використовувати отримані розподіли p_i появи пошкоджень та $T_{\text{орЛ}}^n$ лінійних споруд ВОЛЗ в Закарпатській, Донецькій та Одеській областях для визначення частоти (ймовірності) виникнення певної кількості відмов і часу напрацювання ліній на відмову в межах кліматичного району та їх ймовірнісних

Метод дозволяє виконувати моніторинг змін механічного стану ОВ та ДСОК в цілому задля недопущення додаткової появи недопустимих розтягувальних зусиль та виходу з ладу лінії зв'язку. Його можливо використовувати для застосування відповідними підрозділами з технічної експлуатації ЕКМ зв'язку.

Розроблено спосіб визначення параметрів оцінки технічного стану елементів ВОЛЗ ділянки

показників надійності; б) для оптимізації технічного обслуговування лінійних споруд ВОЛЗ на початковому етапі експлуатації з метою покращення їх ймовірнісних показників надійності технічному відділу організації зв'язку слід використовувати розроблений метод оцінки ймовірнісних показників надійності лінійних споруд ВОЛЗ; в) визначені рівні ПКВ елементів лінії за загасанням сигналу, значення яких отримані в дисертації, можливо використовувати для контролю технічного стану різних елементів ВОЛЗ.

У шостому розділі з забезпечення надійності ВОЛЗ комплектами ЗІП проведені дослідження, в рамках яких узагальнені підходи до забезпечення рівня надійності лінії запасними елементами ЗІП, викладено:

1) – стратегію поповнення запасів комплектів ЗІП лінії; – послідовність розрахунку показників достатності одиночного, ремонтного та групового комплектів ЗІП; – узагальнення підходів до забезпечення норм надійності ВОЛЗ запасними елементами ЗІП; – склад розрахунку показників достатності комплектів ЗІП на мережах ВОЛЗ; – основи оптимального проектування комплектів та системи ЗІП складної структури; – основи використання теорії графів для розробки математичних моделей фрагмента ТЕКМ зв'язку; – оптимізація підходів до визначення місця розташування комплектів ЗІП фрагмента ТЕКМ зв'язку, в рамках якої розроблено методи визначення місця розташування ЗІП:

- за відстанню між вузлами та інтенсивністю відмов ВОЛЗ;
- за сумарним часом відновлення зв'язку та коефіцієнтом готовності.

2) розробку вибору математичних моделей визначення оптимального місця розташування запасних частин фрагменту мережі ВОЛЗ.

Запасні частини, інструменти, приладдя – комплект, призначений для експлуатації та ремонту ВОЛЗ. До них належать складені одиниці, блоки, компоненти необхідні для підтримання та відновлення працездатності, справності лінії при технічному обслуговуванні та ремонті.

Для забезпечення високої експлуатаційної надійності такого великого та складного об'єкта телекомунікаційної системи як ВОЛЗ мережі зв'язку надається система забезпечення їх працездатності, яка містить діагностичні та ремонтні засоби, комплекти запасних елементів, кошти доставки запасних елементів і т.п.

До ключових ролей ЗІП належать: 1) забезпечення готовності до підтримання зв'язку під час аварій; 2) зниження часу відновлення зв'язку; 3) забезпечення неперервного зв'язку; 4) мінімізація втрат продуктивності мережі ВОЛЗ; 5) підтримка стандартів безпеки і зв'язку.

Розробка методу визначення місця розташування ЗІП за відстанню між вузлами та інтенсивністю відмов ВОЛЗ. Метою методу є створення підходу оптимізації визначення місця розташування ЗІП при мінімальних відстанях від об'єкта технічної експлуатації (ОТЕ) до усіх інших об'єктів фрагмента ТЕКМ зв'язку, що забезпечує оптимальне розміщення ЗІП, яке дозволить зменшити час та відстань доставки до найбільш уразливих ділянок ВОЛЗ.

При вирішенні задачі оптимізації підходів до розташування ЗІП у вузлах мережі необхідно враховувати не лише відстань між ними як у класичному методі медіани графа, а й ймовірність (інтенсивність) виникнення відмов на різних

фрагментах або цієї частини ТЕКМ зв'язку. Тобто ЗІП доцільно розміщувати ближче до тих ділянок, де ймовірність виникнення пошкоджень є вищою, що мінімізує час доставки запасних частин до потенційно проблемних місць.

Суть методу полягає у знаходженні такої вершини графа (вузла мережі), яка максимізує суму зважених ваг ребер $w_{ij} = \Lambda_{ij} = \lambda_{ij} \cdot L_{ij}$ до всіх інших вершин:

$$f(v^*) = \sum_{v \in V} w_{vj} \rightarrow \max, \quad (15)$$

де $f(v^*)$ – медіана зваженого графа, $v^* \in V$; w_{vj} – вага ребра (ділянки ВОЛЗ) між вершинами (ОТЕ) v та j .

Пошук шляху з необхідними значенням параметра потоку відмов Λ_{ij} між кожною вершиною i та j визначається алгоритмом Флойда-Уоршелла. За результатами виконання кроків алгоритму, який наведено в дисертаційній роботі, можливо визначити вершини графа (ОТЕ), навколо якого розташовані лінії з найбільшою пошкоджуваністю.

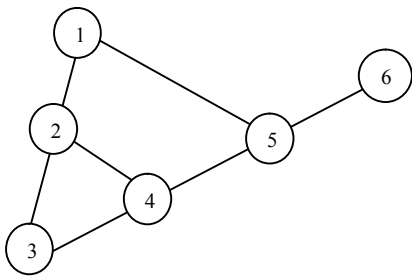


Рисунок 8 – Граф фрагмента ТЕКМ зв'язку в Одеській області

Експериментальні дослідження проведені на фрагменті ТЕКМ зв'язку у вигляді графа в умовах 5-річного терміну експлуатації в Одеській області (рис. 8).

Отримані реальні експлуатаційні показники якості роботи ВОЛЗ ТЕКМ зв'язку в Одеській області за 5-річний термін наведені в табл. 2.

Аналіз результатів методу показав, що: – за критерієм мінімальної відстані вершина 4 має бути обрана як місце розташування комплектів ЗІП;

– за критерієм тяжіння до фрагментів ТЕКМ зв'язку з максимальною пошкоджуваністю вершина 5 має бути обрана як місце розташування комплектів ЗІП.

Таблиця 2 – Реальні експлуатаційні показники якості роботи ВОЛЗ ТЕКМ зв'язку в Одеській області за 5-річний термін

Ребра графа	Кількість пошкоджень на ділянці	Довжина фрагмента мережі, L , км	Інтенсивність відмов на 1 км траси, $\lambda \cdot 10^{-7}$, 1/год	Вершина, до якої належить ребро графа	Параметр потоку відмов ребра графа $\Lambda \cdot 10^{-7}$, км/год	Сумарне значення $\Lambda \cdot 10^{-7}$, км/год
1 – 2	1	47,29	4,83	2	228,41	456,7
2 – 3	1	16,00	14,27		228,32	
2 – 4	2	52,30	8,72	4	228,34	682,6
3 – 4	1	23,81	9,59		228,18	
4 – 5	1	31,43	7,26		226,05	
1 – 5	1	33,00	6,85	5	456,05	1364,5
5 – 6	4	55,26	16,44		908,47	

Отже, ЗІП доцільно розміщувати в цій вершині, оскільки вона знаходиться ближче до ділянок ВОЛЗ, де ймовірність пошкоджень є вищою, що зменшує час

доставки запасних елементів до потенційно проблемних місць мережі.

Результати розробки методу дозволили надати рекомендації з оптимізації підходу до визначення місць розташування ЗІП фрагменту ТЕКМ зв'язку.

Розробка методу визначення місця розташування ЗІП за сумарним часом відновлення зв'язку та коефіцієнтом готовності. Метою розробки є створення підходу оптимізації визначення місця розташування ЗІП за сумарним часом відновлення зв'язку та коефіцієнтом готовності на фрагменті ТЕКМ зв'язку.

Згідно до теоретичної складової методу сумарний час відновлення зв'язку визначається за виразом:

$$t_{\text{счвз}} = t_{\text{вияв}} + t_{\text{достЗІП}} + t_{\text{під}} + t_{\text{АВР}}, \quad (16)$$

де $t_{\text{счвз}}$ – сумарний час відновлення зв'язку, год; $t_{\text{вияв}}$ – час на виявлення місця пошкодження, год; $t_{\text{достЗІП}}$ – час на доставки ЗІП та бригади АВБ до місця пошкодження (за умови їх відсутності в АВБ), год; $t_{\text{під}}$ – час під'їзду АВБ до місця пошкодження, год; $t_{\text{АВР}}$ – час тривалості аварійно-відновлювальних робіт, год.

Складову коефіцієнта простою ВОЛЗ за рахунок часу доставки ЗІП до місця пошкодження або до ОТЕ, де перебуває АВБ, можливо визначити за виразом:

$$K_{\text{пЗІП}} = \frac{\Lambda \cdot t_{\text{достЗІП}}^{\text{п}}}{1 + \Lambda \cdot t_{\text{достЗІП}}^{\text{п}}}, \quad (17)$$

де $K_{\text{пЗІП}}$ – складова коефіцієнта простою ЛЗ ВОСП за рахунок часу доставки ЗІП; Λ – параметр потоку відмов для періоду нормальної експлуатації ВОЛЗ, 1/год; $t_{\text{достЗІП}}^{\text{п}}$ – середній час доставки ЗІП, год.

Водночас коефіцієнт готовності фрагменту ТЕКМ зв'язку за рахунок часу доставки ЗІП у вузол визначається за виразом:

$$K_{\text{гЗІП}} = 1 - K_{\text{пЗІП}}, \quad (18)$$

де $K_{\text{гЗІП}}$, $K_{\text{пЗІП}}$ – коефіцієнти готовності і простою фрагменту ТЕКМ зв'язку за рахунок часу доставки ЗІП у вузол, відповідно.

Для реалізації експериментальної складової методу використані реальний фрагмент ТЕКМ зв'язку (рис. 8) та визначені значення середнього часу доставки ЗІП та параметру потоку відмов для графа. Середній час доставки ЗІП до місця пошкодження або до певного ОТЕ визначається із виразу:

$$t_{\text{сдостЗІП}} = L / v_{\text{сдост}}, \quad (19)$$

де $t_{\text{сдостЗІП}}$ – середній час доставки ЗІП, год; L – довжина маршруту доставки ЗІП, км; $v_{\text{сдост}}$ – середня швидкість транспортування доставки ЗІП, км/год.

Дослідження та визначення оптимального місця розташування ЗІП указанного фрагмента ТЕКМ зв'язку проведено за 5-річний термін в умовах експлуатації в Одеській області. Водночас результати розподілу ребер графа до його вершин (табл. 2) дозволили отримати зміну $K_{\text{пЗІП}}$ фрагменту ТЕКМ зв'язку за рахунок зміни розташування ЗІП (табл. 3).

В останньому підрозділі цього розділу для розв'язання задач оптимального розташування комплектів ЗІП на фрагменті ТЕКМ зв'язку розроблено математичну модель.

Таблиця 3 – Зміна коефіцієнта простою фрагмента ТЕКМ зв'язку в Одеській області за рахунок зміни розташування ЗІП

Фрагмент мережі	Параметр потоку відмов, $\Lambda \cdot 10^{-7}$, км/год	Довжина фрагмента	Коефіцієнт простою, $K_{\text{пзп}} \cdot 10^{-5}$	
			з вузла 4	з вузла 5
1 – 5	456,05	52,30	9,71	5,97
1 – 2	228,41	47,29	4,01	5,69
2 – 3	228,32	16,00	2,28	4,16
2 – 4	228,34	23,81	1,37	3,24
3 – 4	228,18	31,43	1,80	3,67
4 – 5	226,05	33,00	1,88	1,88
5 – 6	908,47	55,26	20,04	12,54
Сумарний			7,69	6,16

На основі результатів експериментального дослідження оптимізації підходу до визначення місця розташування ЗІП за $t_{\text{счвз}}$ та $K_{\text{пзп}}$ ВОЛЗ установлено, що:

– результати розрахунку сумарної складової коефіцієнта простою за рахунок доставки ЗІП до ділянок ВОЛЗ фрагмента ТЕКМ зв'язку становить $K_{\text{пзп}} = 7,69 \cdot 10^{-5}$ при розміщенні ЗІП в вузлі 4, $K_{\text{пзп}} = 6,16 \cdot 10^{-5}$ при розміщенні ЗІП в вузлі 5; коефіцієнт готовності фрагменту ТЕКМ зв'язку за рахунок доставки ЗІП: з вузла 4 становить $K_{\text{гзп}} = 0,999923$; з вузла 5 становить $K_{\text{гзп}} = 0,999938$;

– вершина 5 фрагмента ТЕКМ зв'язку має бути обрана як місце розташування комплексу ЗІП, так як вона зменшує час доставки запасних частин, інструментів та приладь до потенційно проблемних місць мережі.

Метод дозволив зменшити сумарну складову коефіцієнта простою мережі ВОЛЗ на 20 % (в 1,25 рази);

Основні положення висновків розділу полягають в тому, що на основі виконаних досліджень та установлених результатів в розділі можливо рекомендувати:

а) наведені результати з забезпечення надійності ВОЛЗ комплектами ЗІП слід вважати рекомендаційними матеріалами для лінійного персоналу підприємств зв'язку;

б) підрозділам ОТЕ підприємств зв'язку для оптимізації розміщення ЗІП на мережі зв'язку та удосконалення технічного обслуговування лінійних споруд ВОЛЗ використовувати розроблені методи з оптимізації підходів до визначення місця розташування ЗІП.

ВИСНОВКИ

У дисертації сформульовано, досліджено й вирішено наукову проблему – забезпечення надійності волоконно-оптичних ліній зв'язку на етапах проектування та експлуатації. Результатом роботи став розвиток теорії забезпечення надійності сучасних ВОЛЗ на етапах життєвого циклу ВОСП. У роботі створено низку методів з: – розвитку теорії забезпечення надійності ВОЛЗ на етапах виробництва ОК та її будівництва; – оцінки термомеханічного впливу умов експлуатації на параметри елементів осердя кабелю; – визначення

показників експлуатаційної надійності ВОЛЗ; – контролю технічного стану її елементів та оптимізації розташування запасних частин ЗІП мережі ВОЛЗ.

Основні результати роботи полягають у такому:

1. На основі систематизації та аналізу сучасного стану проблеми забезпечення надійності ліній зв'язку ВОСП виявлено, що найважливішими принципами забезпечення їх надійності є: – обґрунтування складових забезпечення надійності лінії на різних етапах життєвого циклу; – сучасний стан галузі розробки та проєктування конструкцій оптичних кабелів; – розвиток та обґрунтування теорії забезпечення надійності на етапах проєктування ВОЛЗ та її компонентів.

2. Розроблено методи багатокритеріальної оптимізації модульних конструкцій оптичних кабелів для абонентських ліній. На основі виявлених критеріїв структурної та параметричної оптимізації моделей багатоповивного осердя кабелю методи запропоновано використовувати на етапах проєктування ВОЛЗ для прискореного вибору оптимальної конструкції кабелю за технічною і економічною ефективністю. Методи дозволяють шляхом визначення оптимальної структури та параметрів елементів наступних після першого повивів отримати більш економічно вигідну конструкцію кабелю при одночасному забезпеченні її технічних характеристик та заданого загального числа волокон. Результати досліджень за допомогою вказаних методів показали, що їх застосування під час вибору марки ОК на етапі проєктування ВОЛЗ дозволить при забезпеченні заданої технічної ефективності зменшити собівартість кабелю до 8,75 %.

3. Для ефективного вибору марки ОК з заданою величиною максимального допустимого розтягувального навантаження розроблено метод удосконалення вибору силових елементів одноповивної конструкції оптичного кабелю. Метод встановив залежності допустимих розтягувальних навантажень діелектричних центрального та периферійного силових елементів (склопластикових стержнів та арамідних ниток) кабелю від геометричного розміру центрального елемента, що визначає структуру осердя ОК. Це дозволяє здійснити на етапі проєктування ВОЛЗ прискорений вибір марки оптичного кабелю з оптимальними силовими та іншими конструктивними елементами. Дослідження показали, що використання арамідних ниток у якості силового елемента дає вклад в загальну величину максимального допустимого розтягувального навантаження приблизно на порядок більший, ніж склопластикового стержня центрального силового елемента. Тому правильний вибір центрального силового елемента та його діаметру надають можливість оптимізації моделі конструкції діелектричного самоутримного ОК.

4. Розроблено метод оцінки термомеханічного впливу умов експлуатації на геометричні розміри і параметри осердя ОК, який враховує відносні зміни довжин волокна та кабелю при дії температури і за рахунок цього дозволяє оцінити на етапі проєктування ВОЛЗ зміни механічних параметрів кабелю при його експлуатації. На основі проведеного дослідження оцінки впливу умов експлуатації на геометричні розміри ($\Delta h(t)$, $\Delta R(t)$, $d_{\text{ЦСЕ}}(t)$, $d_{\text{ТОМ}}(t)$) та конструктивні параметри ($\varepsilon_{\text{дк}}(t)$, $k_{\text{п}}$, $F_{\text{дкЦСЕ}}(t)$) ОК та його елементів встановлено, що через менше значення температурного коефіцієнта лінійного розширення

матеріалу оптичні волокна через гелікоїдальне розташування в трубці оптичного модуля стають довшими за неї, що дає технологічний запас ОВ та збільшення $F_{\text{МК}}$ конструкції кабелю.

5. Удосконалено послідовність проектування сумарних показників надійності лінії або ВОСП шляхом отримання більш достовірних середніх значень експлуатаційних показників надійності (λ , $\lambda_{\text{макс}}$, $\lambda_{\text{мін}}$, $t_{\text{счвз}}$) за більший термін експлуатації. Це дозволяє більш точно проводити оцінку параметрів надійності ВОЛЗ або ВОСП при проектуванні та експлуатації і розробляти практичні рекомендації щодо мінімізації ризику пошкоджень ліній та забезпечення норм показників їх надійності.

6. Для контролю технічного стану елементів ВОЛЗ розроблено метод контролю ймовірнісних показників надійності (щільності відмов, середнього часу напрацювання на відмову, середнього часу відновлення зв'язку та коефіцієнта готовності) лінійних споруд при початковому терміні експлуатації. Він оснований на визначенні законів розподілу випадкових величин за накопиченими статистичними даними при експлуатації ВОЛЗ, які описують реальні процеси виникнення відмов лінійних споруд, та дозволяє здійснювати контроль технічного стану елементів та оптимізацію технічного обслуговування ліній фрагментів ТЕКМ зв'язку.

7. Для оцінки механічного стану оптичного волокна в осерді діелектричного самоутримного ОК при експлуатації розроблено метод. Він встановив зв'язок фактичної механічної напруги в конструкції ДСОК при фізико-кліматичних навантаженнях кабелю та відносного видовження волокна, що дозволяє здійснювати моніторинг змін його механічного стану та кабелю в цілому задля недопущення додаткової появи недопустимих розтягувальних зусиль та виходу з ладу лінії зв'язку.

8. Для забезпечення надійності ВОЛЗ комплектами ЗІП розроблено методи визначення місця розташування ЗІП за:

- відстанню між вузлами та інтенсивністю відмов ВОЛЗ. Метод на основі моделі мережі, побудованої за допомогою теорії графів, дає можливість за величиною параметра потоку відмов визначати на фрагментах ТЕКМ зв'язку ділянки з максимальною пошкоджуваністю та найближчі вузли для розташування в них комплектів ЗІП. Це дозволило на основі реальних статистичних даних про пошкодження фрагменту ЕКМ зв'язку в Одеській області виконати корекцію ефективності розміщення запасних частин у вузлах мережі, не рівномірно розташованих, а наближених до ділянок з найбільшою пошкоджуваністю. Метод з оптимізації підходів до визначення місця розташування ЗІП рекомендується підрозділам ОТЕ підприємств зв'язку для оптимізації розміщення ЗІП на мережі зв'язку та удосконалення технічного обслуговування лінійних споруд.

- сумарним часом відновлення зв'язку та коефіцієнтом готовності. Він за величиною складових часу відновлення зв'язку та часу доставки до місця пошкодження (у випадку його відсутності в аварійно-відновлювальній бригаді) дає змогу оцінити зміни складової коефіцієнта готовності за рахунок доставки ЗІП. Метод дає можливість підрозділам зв'язку здійснювати якісний контроль показників експлуатаційної надійності та часу відновлення зв'язку ЗІПами

фрагмента мережі ВОСП для забезпечення більшого $K_{гзп}$. Застосування методу дозволило на основі реальних експлуатаційних даних про фрагмент ЕКМ зв'язку в Одеській області виконати корекцію в розміщенні ЗІП у вузлах мережі та зменшити значення складової коефіцієнта простою на 20 % (в 1,25 рази).

Одержані в результаті виконаного комплексу теоретичних та експериментальних досліджень математичні співвідношення, методи та математичні моделі дозволили розвинути теорію та методи оптимізації забезпечення надійності ВОЛЗ, що підтверджено актами впровадження результатів дисертаційної роботи у:

1) роботі лабораторії випробувального центру ДП «Одеський науково-дослідний інститут зв'язку» в галузі волоконної оптики. До таких результатів належать: а) метод контролю ймовірнісних показників надійності лінійних споруд ВОЛЗ на початковому етапі експлуатації; б) спосіб визначення параметрів оцінки технічного стану елементів ВОЛЗ ділянки регенерації ВОСП за загасанням сигналу; в) реалізована ВОЛЗ «Білгород-Дністровський – Шабо» Одеської області на базі кабелів ОКСБ-0,2-50-1,0/1,3-4 та ОКСП-0,1-50-1,0/1,3-4 та апаратури ВОСП 30/120. Контроль технічного стану її лінійних споруд дозволив покращити технічне обслуговування;

2) роботі регіональної філії «Одеська залізниця» АТ «Укрзалізниця». До таких результатів належать: а) метод оцінки температурного впливу умов експлуатації ВОЛЗ на геометричні розміри та параметри конструкції ОК, взятий за основу при виборі марки та оцінки механічних характеристик кабелю на етапі проектування лінії; б) теоретичні розробки та практичні рекомендації при проектуванні ПВОЛЗ на опорах контактної мережі транспортної залізниці між станціями Одеса Головна та Пересип з використанням кабелю ОКЛ-3-Д2А-14 для умов експлуатації Причорноморської кліматичної зони;

3) роботі Львівської філії АТ «Укртелеком». До таких результатів належать: а) методи вибору оптимальної конструкції ОК за масо-габаритними та економічними показниками при проектуванні ВОЛЗ, що було взято за основу при забезпеченні одночасно технічної та економічної ефективності лінії, особливо, в умовах браку місця в міській кабельній каналізації; б) теоретичні розробки та практичні рекомендації для прискореного вибору марки ОК оптимальної та економічно ефективної конструкції при проектуванні ВОЛЗ Західного макрорегіону АТ «Укртелеком»;

4) роботі ТОВ «Атраком» для покращення якості та надійності роботи ВОЛЗ при експлуатації і організації роботи її лінійних підрозділів. До таких результатів належать: а) метод контролю технічного стану лінійних споруд ВОЛЗ при експлуатації в різних фізико-кліматичних умовах; б) практичні рекомендації з оцінки ймовірнісних показників надійності лінійних споруд ВОЛЗ;

5) навчальному процесі Державного університету інтелектуальних технологій і зв'язку: при оновленні змісту освітньої програми «Телекомунікації та радіотехніка» першого (бакалаврського) рівня освіти за спеціальністю 172 «Електронні комунікації та радіотехніка», виданні методичних посібників та монографій, проведенні лекційних, практичних та лабораторних занять низки дисциплін.

ОСНОВНІ РОБОТИ, ОПУБЛІКОВАНІ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**Статті у наукових фахових виданнях України:**

1. Бондаренко О.В., Степанов Д.М., Боярова А.А. Метод оптимізації багатомодульної конструкції осердя оптичних кабелів. *Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова*. 2013. Вип. № 1. С. 99 – 106.
2. Лесовой И.П., Одинцов Н.Н., Степанов Д.Н. Вариационные методы анализа направляющих систем поперечного сечения сложной формы. *Науково-виробничий збірник «Наукові записки українського науково-дослідного інституту зв'язку»*. 2013. Вип. № 4(28). С. 22 – 27.
3. Бондаренко О.В., Костик Б.Я., Степанов Д.Н., Левенберг Е.В. Эксплуатационные показатели качества работы транспортной телекоммуникационной первичной сети Украины. *Научно-технический журнал «Технология и конструирование в электронной аппаратуре»*. 2013. Вип. № 6. С. 37 – 40. <https://doi.org/10.15222/ТКЕА2013.6.37>.
4. Бондаренко О.В., Манько О.О., Стащук О.М., Степанов Д.М., Багачук Д.Г. Компенсація дисперсії сигналу за допомогою оптичного волокна з анізотропними властивостями. *Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах»*. 2013. Вип. № 4. С. 43 – 49.
5. Бондаренко О.В., Степанов Д.М. Дослідження стріли провисання самоутримних оптичних кабелів з периферійним силовим елементом із арамідних ниток. *Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту*. Донецьк, 2013. Вип. №33. С. 86 – 92.
6. Бондаренко О.В., Костік Б.Я., Кіфороук С.В., Степанов Д.М., Слободянюк І.А. Кількісні показники надійності волоконно-оптичних ліній зв'язку в різних кліматичних умовах. *Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова*. 2014. Вип. № 1. С. 23 – 28.
7. Бондаренко О.В., Степанов Д.М., Ромащенко В.В., Боярова А.А. Оптимізація багатомодульної конструкції осердя оптичних кабелів за критерієм мінімальної собівартості. *Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова*. 2014. Вип. № 2. С. 36 – 43.
8. Стащук О.М., Степанов Д.М., Багачук Д.Г. Вплив хімічного складу скла оптичного волокна на матеріальну дисперсію сигналу. *Науковий журнал «Вісник Хмельницького національного університету»*. 2015. Вип. № 6 (231). С. 234 – 237.
9. Бондаренко О.В., Багачук Д.Г., Степанов Д.М., Стащук О.М. Дослідження загасання сигналу в спірально вигнутому одномодовому оптичному волокні. *Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах»*. 2016. Вип. № 1. С. 44 – 48.
10. Стащук О.М., Степанов Д.М., Багачук Д.Г. Вплив хімічного складу скла оптичного волокна на хвильоводну дисперсію сигналу. *Науковий журнал «Вісник Вінницького політехнічного інституту»*. 2016. Вип. № 2 (125). С. 157 – 160.
11. Бондаренко О.В., Степанов Д.М., Багачук Д.Г., Ромащенко В.В., Вербицький О.О. Вибір структури осердя оптичних кабелів багатомодульної конструкції за економічною ефективністю. *Цифрові технології*. 2016. Вип. № 1. С. 34 – 41.

12. Стащук О.М., Степанов Д.М., Багачук Д.Г. Вплив хімічного складу скла оптичного волокна на хроматичну дисперсію сигналу. *Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова*. 2016. Вип. № 2. С. 137 – 143.

13. Бондаренко О.В., Степанов Д.М., Багачук Д.Г., Тіхонов В.І., Вербицький О.О. Методика забезпечення конструктивної стійкості підземних оптичних кабелів до розтягувальних навантажень. *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки»*. 2016. Вип. №4. С. 5 – 11.

14. Бондаренко О.В., Степанов Д.М. Температурний вплив на геометричні розміри елементів осердя та відносне видовження оптичного кабелю. *Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова*. 2017. Вип. № 2. С. 20 – 27.

15. Odegov N.A., Stepanov D.M. Formation of a low-frequency component of an optical signal by pulses of a gaussian form. *Information and Telecommunication Sciences*. 2018, Volume 9, Num. 1. P. 26 – 33. DOI: 10.20535/2411-2976.12018.26-33.

16. Bondarenko O.V., Stepanov D.M., Kiforuk S.V., Slobodianiuk I.A. Thermomechanical influence on optical fibers during the production and operation of optical cable. *Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова*. 2019. Вип. № 1. С. 23 – 32. DOI: 10.33243/2518-7139-2019-1-1-23-32.

17. Staschuk O.M., Stepanov D.M., Bahachuk D.H. Polarization mode dispersion compensator based on anisotropic optical fiber. *Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова*. 2020. Вип. № 1. С. 12 – 18.

18. Степанов Д.М. Удосконалення вибору діелектричних силових елементів конструкції оптичного кабелю. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. Хмельницький, 2024. Том 343, Вип. № 6 (1). С. 315 – 322. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-343-6-47>.

Статті у виданнях, що включені до категорії «А» Переліку фахових видань України та входять до міжнародних наукометричних баз даних Scopus/Web of Science:

19. Bahachuk D., Hadzyiev M., Nazarenko A., Odegov N., Stepanov D. Multiplex technique of data transmission in residual class systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2023. №6 (9(126)), P. 23 – 31. DOI: 10.15587/1729-4061.2023.292504 (Індексується в наукометричній базі Scopus).

20. Bondarenko O.V., Stepanov D.M., Verbytskyi O.O., Siden S.V. Method of evaluation the efficiency of fiber-optic cables models with multi-modular design based on mass and dimensional indicators. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2024. №1. P. 6 – 16. DOI: 10.15588/1607-3274-2024-1-1 (Індексується в наукометричній базі Web of Science).

21. Bondarenko O.V., Stepanov D.M. Method of control the mechanical state of the optical fiber of the dielectric self-supporting optical cable during operation. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2024. №4. P. 13 – 26. DOI: 10.15588/1607-3274-2024-4-2 (Індексується в наукометричній базі Web of Science).

Розділи у колективних монографіях:

22. Степанов Д. М. Електричні кабелі зв'язку. Волоконно-оптичні лінії зв'язку // Сучасні телекомунікації: мережі, технології, безпека, економіка, регулювання – Видання друге (доповнене): колективна монографія / за загальною

ред. С.О. Довгого. Київ: «Азимут-Україна». 2013. С. 243 – 250, 260 – 269. ISBN 978-966-1541-46-6.

23. Степанов Д. М. Технології волоконної оптики – минуле, сучасність та майбутнє // Сталий розвиток і цифрові інновації : колективна монографія / за заг. ред. Буркинського Б.В. та ін.; НАН України, МОН України, ДУ «Ін-т ринку та екон.-екол. дослідж.», Держ. ун-т інтелект. технологій і зв'язку. Одеса : ДУ «ІРЕЕД НАНУ». 2024. С. 140 – 151. ISBN 978-617-14-0253-9. DOI <https://doi.org/10.31520/978-617-14-0253-9>.

Публікації у матеріалах міжнародних та всеукраїнських конференцій, що входять до міжнародної наукометричної бази даних Scopus:

24. Bondarenko O.V., Kostik B.Y., Stepanov D.M., Levenberg E.V. Performance indicators of work quality of transport telecommunication primary network in Donetsk, Lviv and Odessa regions of Ukraine. *IXth International Conference «Antenna theory and techniques»*, Odessa, 16 – 20 sept. 2013 / Odessa National Academy of Telecommunications, 2013. P. 488 – 491.

Публікації у матеріалах міжнародних та всеукраїнських конференцій:

25. Бондаренко О.В., Степанов Д.Н., Боярова А.А. Разработка многоповивной конструкции оптических кабелів. *Матеріали 67-ї наук.-техн. конф. проф.-викл. складу, науковців, асп. та студ., м. Одеса, 5 – 7 груд. 2012 р. / ОНАЗ ім. О.С. Попова. Одеса, 2012. С. 86 – 88.*

26. Бондаренко О.В., Костік Б.Я., Степанов Д.Н., Омельчук Е.М., Левенберг Е.В. Статистичні характеристики надійності лінійних споруд транспортної телекомунікаційної мережі. *Матеріали 67-а наук.-техн. конф. проф.-викл. складу, науковців, асп. та студ., м. Одеса, 5 – 7 груд. 2012 р. / ОНАЗ ім. О.С. Попова. Одеса, 2012. С. 90 – 93.*

27. Бондаренко О.В., Костік Б.Я., Степанов Д.М., Кіфорук С.В., Слободянюк І.А. Кількісні показники надійності волоконно-оптичних ліній зв'язку в різних кліматичних умовах. *Матеріали XIII міжнародної науково-технічної конференції «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах»*, м. Одеса (Затока), 6 – 12 черв. 2014 р. Одеса, 2014. С. 178 – 179.

28. Бондаренко О.В. Степанов Д.М., Ромащенко В.В., Боярова А.А. Мінімізація собівартості конструкції двоповивного оптичного кабелю мереж абонентського доступу. *Матеріали 4-ї міжнародної науково-практичної конференції «Інфокомунікації – Сучасність та майбутнє»*, м. Одеса, 30 – 31 жовтня 2014 р. / ОНАЗ ім. О.С. Попова. Одеса, 2014. С. 129 – 132.

29. Бондаренко О.В., Степанов Д.М., Кіфорук С.В., Слободянюк І.А. Дослідження експлуатаційної надійності транспортних телекомунікаційних мереж України в різних кліматичних умовах. *Матеріали 69-ї наук.-техн. конф. проф.-викл. складу, науковців, асп. та студ., м. Одеса, 3 – 5 груд. 2014 р. / ОНАЗ ім. О.С. Попова. Одеса, 2014. С. 74 – 76.*

30. Bondarenko O.V., Stepanov D.M., Verbitskiy O.O. Optimization of the core design in multimodule optical cables by minimal cost. *Матеріали XIV міжнародної науково-технічної конференції «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах»*, м. Одеса (Затока), 5 – 10 черв. 2015 р. Одеса (Затока), 2015. С. 220 – 222.

31. Бондаренко О.В., Степанов Д.М., Вербицький О.О., Скіпін О.С. Дослідження залежності допустимого відносного видовження оптичного кабелю від параметрів його осердя. *Матеріали 5-ї міжнародної науково-практичної конференції «Інфокомунікації – Сучасність та майбутнє»*. м. Одеса, 29 – 30 жовтня 2015 р. / ОНАЗ ім. О.С. Попова. Одеса, 2015. С. 78 – 81.

32. Бондаренко О.В., Степанов Д.М., Вербицький О.О. Удосконалення процесу вибору силових елементів конструкції волоконно-оптичного кабелю. *Матеріали 16-ї міжнародної науково-технічної конференції «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах»*. м. Одеса (Затока), 10 – 15 червня 2016 р. Одеса (Затока), 2016. С. 167 – 169.

33. Бондаренко О.В., Степанов Д.Н., Вербицький А.А., Багачук Д.Г. К минимизации габаритов многомодульных конструкций оптических кабелів. *The proceedings of international scientific and technical conference “The modern situation and prospects development information and communication technologies”*, 23 – 25 November 2016. Baku, 2016. P. 355 – 361.

34. Бондаренко О.В., Степанов Д.М., Багачук Д.Г., Вербицький О.О. Обґрунтування та оптимізація процесу вибору структури осердя оптичних кабелів за економічною ефективністю. *Матеріали V-ї міжнародної науково-практичної конференції «Фізико-технологічні проблеми передавання, оброблення та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах»*, м. Чернівці, 3 – 5 листопада 2016 р. Чернівці, 2016. С. 78 – 79.

35. Бондаренко О.В., Степанов Д.М., Кіфорук С.В., Надвоцька О.І. Визначення закону розподілу пошкоджень оптичних кабелів транспортних телекомунікаційних мереж зв'язку України. *Матеріали 6-ї міжнародної науково-практичної конференції «Інфокомунікації – Сучасність та майбутнє»*, м. Одеса, 27 – 28 жовтня 2016 р. ОНАЗ ім. О.С. Попова. Одеса, 2016. С. 63 – 66.

36. Бондаренко О.В., Степанов Д.М., Кіфорук С.В., Тараненко Я. Визначення ймовірнісних показників надійності оптичних кабелів фрагментів транспортної телекомунікаційної мережі зв'язку України. *Матеріали 7-ї міжнародної науково-практичної конференції «Інфокомунікації – Сучасність та майбутнє»*, м. Одеса, 26 – 27 жовтня 2017 р. ОНАЗ ім. О.С. Попова. Одеса, 2017. С. 98 – 101.

37. Бондаренко О.В., Степанов Д.М., Кіфорук С.В. Визначення закону розподілу часу напрацювання на відмову оптичних кабелів фрагментів транспортної телекомунікаційної мережі зв'язку України. *Матеріали VI-ї міжнародної науково-практичної конференції «Практичне застосування нелінійних динамічних систем в інфокомунікаціях»*, м. Чернівці, 9 – 11 листопада 2017 р. Чернівці, 2017. С. 48 – 49.

38. Бондаренко О.В., Степанов Д.М., Чербаджі А.В. Визначення довжини оптичного волокна в трубці оптичного модуля. *Матеріали 8-ї міжнародної науково-практичної конференції «Інфокомунікації – Сучасність та майбутнє»*, м. Одеса, 16 – 17 листопада 2018 р. ОНАЗ ім. О.С. Попова. Одеса, 2018. С. 101 – 103.

39. Бондаренко О.В., Степанов Д.М., Кіфорук С.В., Маринова А.В. Прогнозування часу напрацювання на відмову фрагменту транспортної телекомунікаційної мережі зв'язку Київської області. *Матеріали 8-ї міжнародної*

науково-практичної конференції «Інфокомунікації – Сучасність та майбутнє», м. Одеса, 16 – 17 листопада 2018 р. ОНАЗ ім. О.С. Попова. Одеса, 2018. С. 98 – 101.

40. Степанов Д.М., Касьян В.Ю. Дослідження поздовжніх деформацій оптичних кабелів з центральною модульною трубкою. *Матеріали 9-ї міжнародної науково-практичної конференції «Інфокомунікації – Сучасність та майбутнє»*, м. Одеса, 12 – 15 листопада 2019 р. ОНАЗ ім. О.С. Попова. Одеса, 2019. С. 139 – 142.

41. Степанов Д.М., Тишкевич В.О. Уточнення розрахунку відносного видовження конструкції кабелю при термомеханічному впливі. *The proceedings of 5th International scientific and practical conference “The world of science and innovation”*, Лондон, 9 – 11 грудня 2020 р., Великобританія, 2020. С. 806 – 810.

42. Степанов Д.М., Великожон Б.М. Визначення ймовірнісних показників надійності оптичних кабелів фрагментів транспортної телекомунікаційної мережі зв'язку в Київській області. *Матеріали VIII міжнародної науково-практичної конференції «World science: problems, prospects and innovations»*, Торонто, 21 – 23 квітня 2021 р. Торонто, Канада, 2021, С. 776 – 780.

43. Степанов Д.М., Великожон Б.М. Перевірка закону розподілу часу напрацювання на відмову волоконно-оптичних ліній зв'язку критеріями згоди. *Матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції “Priority directions of science and technology development”*, м. Київ, 16 – 18 травня 2021 р. Київ, С. 416 – 420.

44. Степанов Д.М., Горобець І.А. Порівняльна оцінка механічної міцності склопластикових стержнів силового елемента оптичного кабелю. *The proceedings of 9 International scientific and practical conference “Modern research in world science”*, Lviv, November 28 – 30, 2022. Lviv. P. 583 – 587.

45. Степанов Д.М., Шегда І.В., Барба І.Б., Макаров І.В. Оцінка втрат сигналів на неоднорідностях в нерознімних стикових з'єднаннях оптичних волокон. *Матеріали III міжнародної науково-практичної конференції «Global science: prospects and innovations»*, м. Ліверпуль, 2 – 4 листопада 2023. Ліверпуль, Великобританія, С. 313 – 319. ISBN 978-92-9472-196-9.

46. Степанов Д.М., Сverdлова А. Оцінка впливу пасивного несанкціонованого доступу до оптичного волокна на втрати в лінійному тракті ВОЛЗ. *The proceedings of IX International Scientific and Practical Conference «Perspectives of contemporary science: theory and practice»*, Lviv, 14 – 16 October 2024. Lviv, Ukraine, 2024. P. 392 – 397. ISBN 978-966-8219-88-7.

47. Степанов Д.М., Марченко П.О. Порівняльна оцінка допустимих відносних видовжень оптичних кабелів з різними геометричними розмірами елементів осердя. *Proceedings of II International Scientific and Practical Conference «Science in the modern world: innovations and challenges»*, Toronto, 24 – 26 October 2024. Toronto, Canada, 2024. P. 180 – 186. ISBN 978-1-4879-3790-4.

48. Степанов Д.М., Мотичко А.Ю. Оцінка поздовжньої деформації в елементах діелектричного самоутримного оптичного кабелю. *Proceedings of XI International Scientific and Practical Conference «European congress of scientific achievements»*, Barcelona, 4 – 6 November 2024. Barcelona, Spain, 2024. P. 200 – 204. ISBN 978-84-15927-35-8.

49. Степанов Д.М., Колесніков Є.М. Визначення ймовірнісних показників надійності фрагментів електронної комунікаційної мережі зв'язку в Одеській області. *Proceedings of X International Scientific and Practical Conference «Perspectives of contemporary science: theory and practice»*, Lviv, 11 – 13 November 2024. Lviv, Ukraine, 2024. P. 431 – 435. ISBN 978-966-8219-88-7.

Патент на корисну модель:

50. Волоконно-оптичний кабель з багатоповивною модульною конструкцією осердя: пат. 85703 Україна, МПК G02B6/44, заявник та патентовласник Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова; заявл. 11.06.2013; опубл. 25.11.2013, Бюл. № 22.

Анотація

Степанов Д.М. Методи забезпечення надійності волоконно-оптичних ліній зв'язку на етапах проєктування та експлуатації. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі – Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, Міністерство освіти і науки України, Одеса, 2025.

Дисертацію присвячено науково-практичній проблемі – методам забезпечення надійності волоконно-оптичних ліній зв'язку на етапах проєктування та експлуатації. Розвиток теорії забезпечення надійності сучасних ВОЛЗ на етапах життєвого циклу ВОСП дозволив вирішити ряд задач та розробити методи: – багатокритеріальної оптимізації модульної конструкції ОК на основі виявлених критеріїв структурної та параметричної оптимізації моделей багатоповивного осердя кабелю, які дозволили здійснювати на етапі проєктування ВОЛЗ обґрунтований прискорений вибір кабелю оптимальної моделі одночасно за технічною та економічною ефективністю; – удосконалення вибору СЕ одноповивної конструкції ОК на основі встановлених залежностей допустимих розтягувальних навантажень діелектричних ЦСЕ та ПСЕ кабелю від геометричного розміру центрального елемента. Це дозволяє здійснювати на етапі проєктування ВОЛЗ прискорений вибір моделі ОК з оптимальними силовими та іншими конструктивними елементами; – оцінки термомеханічного впливу умов експлуатації на геометричні розміри і параметри осердя ОК, який враховує відносні зміни довжин ОВ та кабелю при дії температури і дає можливість оцінити на етапі проєктування ВОЛЗ зміни механічних параметрів кабелю при експлуатації; – контролю ймовірнісних показників надійності лінійних споруд ВОЛЗ при початковому терміні експлуатації для оцінки технічного стану їх елементів та оптимізацію обслуговування ліній фрагментів ТЕКМ зв'язку; – контролю механічного стану волокна ДСОК для моніторингу їх змін; – визначення місця розташування ЗІП за: а) відстанню між вузлами та інтенсивністю відмов ВОЛЗ; б) сумарним часом відновлення зв'язку та коефіцієнтом готовності для корегування місця розташування ЗІП підрозділами технічної експлуатації і удосконалення технічного обслуговування мережі зв'язку.

Удосконалено послідовність проєктування сумарних показників надійності

ВОЛЗ або ВОСП для проведення оцінки параметрів їх надійності при проєктуванні та експлуатації. Отримано більш достовірні розрахункові значення середніх експлуатаційних показників якості роботи ВОЛЗ (λ , $\lambda_{\text{макс}}$, $\lambda_{\text{мін}}$, $t_{\text{счвз}}$) ТЕКМ зв'язку в різних кліматичних районах країни для підвищення точності визначення показників надійності ВОЛЗ або ВОСП при їх проєктуванні та експлуатації.

Проведено вибір математичних моделей визначення оптимального місця розташування запасних частин фрагменту мережі ВОЛЗ.

У цілому, результати розробок в дисертації дозволили створити комплексні теоретичні та практичні підходи до забезпечення надійності ВОЛЗ при проєктуванні та експлуатації.

Ключові слова: волоконно-оптична лінія зв'язку, відмови та пошкодження, запасні частини й інструменти та приладдя, експлуатаційні показники надійності, методи забезпечення надійності, надійність, оптичний кабель, структурна та параметрична оптимізація конструкції.

Abstract

Stepanov D.M. Methods of providing the reliability of fiber-optic communication lines at the design and operation stages. – On rights for a manuscript.

Thesis for the scientific degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.12.02 – telecommunication systems and networks. – State university of intelligent technologies and telecommunications, Ministry of Education and Science of Ukraine, Odesa, 2025.

The dissertation is devoted to a scientific and practical problem – methods of ensuring the reliability of fiber-optic communication lines (FOCL) at the design and operation stages. The development of the theory of ensuring the reliability of modern FOCLs at the stages of the fiber-optic transmission system (FOTS) life cycle has allowed to solve a number of problems and develop methods: – multi-criteria optimization of the modular design of the optical cable (OC) based on the identified criteria of structural and parametric optimization of models of the multi-layer cable core, which allowed to carry out a justified accelerated selection of the cable brand at the design stage of the FOCL simultaneously by technical and economic efficiency; – improvement of the selection of the strength elements (SE) of the single-layer optical cable design based on the established dependencies of the permissible tensile loads of the dielectric central strength element (CSE) and peripheral strength elements (PSE) of the cable on the geometric size of the central element. It allows to carry out an accelerated selection of the OC brand with optimal strength and other structural elements at the design stage of the FOCL; – assessment of the thermomechanical impact of operating conditions on the geometric dimensions and parameters of the OC core, which takes into account the relative changes in the lengths of the OF and cable under the influence of temperature and makes it possible to assess at the FOCL design stage changes of the mechanical parameters of the cable during operation; – control of probabilistic reliability indicators of FOCL linear structures during the initial period of operation to assess the technical condition of their elements and optimize the maintenance of lines in the transport electronic communication network (TECN)

fragment; – control of the mechanical condition of the DSOC fiber to monitor their changes; – determination of the location of the spare parts, tools and equipments (SPTE) by: a) the distance between the nodes and the intensity of FOCL failures; b) the total time of communication restoration and the readiness coefficient for adjusting the location of the SPTE by technical operation units and improving the technical maintenance of the communication network.

The sequence of designing the total reliability indicators of FOCL or FOTS has been improved to assess the parameters of their reliability during design and operation. More reliable calculated values of the average operational indicators of the quality of FOCL operation (λ , $\lambda_{\max}$, $\lambda_{\min}$, t_{ater}) of TECN in different climatic regions of the country have been obtained to increase the accuracy of determining the reliability indicators of FOCL or FOTS during their design and operation.

A selection of mathematical models for determining the optimal location of spare parts of a fragment of the FOCL network has been carried out.

In general, the results of the developments in the dissertation have allowed to create comprehensive theoretical and practical approaches to ensuring the reliability of FOCL during design and operation.

Keywords: fiber-optic communication line, failures and damage, spare parts, tools and equipments, operational reliability indicators, methods of ensuring reliability, reliability, optical cable, structural and parametric efficiency.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ЕКМ	Електронна комунікаційна мережа
ТЕКМ	Транспортна електронна комунікаційна мережа
ВОСП	Волоконно-оптична система передавання
ВОЛЗ	Волоконно-оптична лінія зв'язку
ОК	Оптичний кабель
ДСОК	Діелектричний самоутримний оптичний кабель
ОВ	Оптичне волокно
ОМ	Оптичний модуль
СЕ	Силовий елемент
ПСЕ	Периферійний силовий елемент
ЦСЕ	Центральний силовий елемент
МДРН	Максимально допустиме розтягувальне навантаження
ЗІП	Запасні частини, інструменти і приладдя