

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

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Степанов Дмитро Миколайович

УДК 621.391

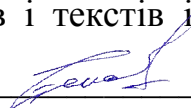
ДИСЕРТАЦІЯ

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

05.12.02 – Телекомунікаційні системи та мережі
05 «Технічні науки»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

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

 Д.М. Степанов

Науковий консультант Бондаренко О.В., д.т.н., проф., заслужений діяч науки і техніки України, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки

***Ідентичність всіх примірників дисертації
ЗАСВІДЧУЮ:***

*В.о. вченого секретаря спеціалізованої
вченої ради*



М.М. Гаджиєв

Одеса – 2025

АНОТАЦІЯ

Степанов Д.М. Методи забезпечення надійності волоконно-оптичних ліній зв'язку на етапах проєктування та експлуатації. - Кваліфікаційна наукова праця 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.

Дисертація присвячена науково-практичній проблемі – методам забезпечення надійності волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ) на етапах проєктування та експлуатації.

На основі систематизації та аналізу сучасного стану проблеми забезпечення надійності волоконно-оптичних ліній зв'язку 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 (ОК);
- розвиток та обґрунтування теорії забезпечення надійності на етапах проєктування ВОЛЗ та її компонентів.

Розвиток теорії забезпечення надійності сучасних ВОЛЗ на етапах життєвого циклу волоконно-оптичних систем передавання (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 дозволили здійснювати на етапі проєктування ВОЛЗ обґрунтований прискорений вибір марки кабелю одночасно за технічною та 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 оптичних волокон (ОВ). Результати досліджень в методах показали, що їх застосування під час вибору марки ОК на етапі проектування ВОЛЗ дозволить при забезпеченні заданої технічної ефективності зменшити собівартість кабелю до 8,75 %;

– удосконалення вибору силових елементів (СЕ) одноповивної конструкції оптичного кабелю на основі встановлених залежностей допустимих розтягувальних навантажень діелектричних центрального силового елемента (ЦСЕ) та периферійного силового елемента (ПСЕ) (склопластикових стержнів та арамідних ниток) кабелю від геометричного розміру центрального елемента, що дозволяє здійснювати на етапі проектування ВОЛЗ прискорений вибір марки ОК з оптимальними силовими та іншими конструктивними елементами. Дослідження показали, що використання арамідних ниток в якості ПСЕ дає вклад в загальну величину максимально допустимого розтягувального навантаження (МДРН) приблизно на порядок більший, ніж склопластикового стержня ЦСЕ. Тому правильний вибір ЦСЕ та його діаметру надають можливість оптимізації моделі конструкції діелектричного самоутримного оптичного кабелю (ДСОК);

– 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 проектування ВОЛЗ зміни механічних параметрів кабелю при експлуатації. На основі проведеного дослідження оцінки впливу умов експлуатації на геометричні розміри (зміну кроку $\Delta h(t)$ та радіусу $\Delta R(t)$ спірального укладання елементів осердя, діаметр ЦСЕ – $d_{\text{ЦСЕ}}(t)$, діаметр трубки оптичного модуля – $d_{\text{ТОМ}}(t)$) та конструктивні параметри (відносне видовження кабелю – $\varepsilon_{\text{дк}}(t)$, коефіцієнт пропорційності – $k_{\text{п}}$, допустиме розтягувальне зусилля ЦСЕ – $F_{\text{дкЦСЕ}}(t)$) ОК та його елементів встановлено, що через менше значення температурного коефіцієнта лінійного розширення (ТКЛР) матеріалу оптичні волокна із-за гелікоїдального розташування в трубці ОМ стають довшими за неї, що дає

технологічний запас ОВ та збільшення максимального розтягувального зусилля $F_{\text{МК}}$ конструкції кабелю.

– контролю ймовірнісних показників надійності (щільності відмов, середнього часу напрацювання на відмову, середнього часу відновлення зв'язку та коефіцієнта готовності) лінійних споруд ВОЛЗ 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 транспортної електронної комунікаційної мережі (ТЕКМ) зв'язку;

– контролю механічного стану волокна ДСОК для моніторингу їх змін. Метод встановив зв'язок фактичної механічної напруги в конструкції ДСОК при фізико-кліматичних навантаженнях, які діють на кабель, 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;

– визначення оптимального місця розташування запасних частин, інструментів і приладдя (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 ТЕКМ 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 об'єкта технічної експлуатації (ОТЕ) підприємств зв'язку для оптимального розміщення ЗІП на мережі зв'язку та удосконалення технічного обслуговування лінійних споруд ВОЛЗ;

— визначення оптимального місця розташування ЗІП за 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 (АВБ) дає змогу оцінити зміни складової коефіцієнта готовності за рахунок доставки ЗІП. Метод вимагає від підрозділів зв'язку якісного контролю показників експлуатаційної надійності та часу відновлення зв'язку ЗІПами фрагменту мережі ВОСП для забезпечення більшого значення коефіцієнта готовності ЗІП ($K_{гзп}$). Застосування методу дозволило на основі реальних експлуатаційних даних про фрагмент ТЕКМ 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).

Удосконалено послідовність проєктування сумарних показників надійності ВОЛЗ або ВОСП для проведення оцінки параметрів їх надійності при проєктуванні та експлуатації. Отримані більш достовірні розрахункові значення середніх експлуатаційних показників якості роботи ВОЛЗ (середнє значення інтенсивності відмов λ , максимальне $\lambda_{\max}$ та мінімальне $\lambda_{\min}$ значення інтенсивності відмов, середній час відновлення зв'язку $t_{счвз}$) 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.

В цілому, результати розробок в дисертації дозволили створити комплекси теоретичних та практичних підходів до забезпечення надійності ВОЛЗ при проєктуванні та експлуатації, що становлять її наукову новизну.

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 мають практичне значення та підтверджено актами впровадження результатів дисертаційної роботи у:

1. Роботі лабораторії випробувального центру Державного підприємства

«Одеський науково-дослідний інститут зв'язку» в галузі волоконної оптики. До таких результатів відносяться:

а) метод контролю ймовірнісних показників надійності лінійних споруд ВОЛЗ при 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 її технічне обслуговування.

2. Роботі регіональної філії акціонерного товариства «Укрзалізниця». До таких результатів відносяться:

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 повітряної ВОЛЗ (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 акціонерного товариства «Укртелеком». До таких результатів відносяться:

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 акціонерного товариства «Укртелеком».

4. Роботі філії товариства з обмеженою відповідальністю «Атраком» для

покращення якості та надійності роботи ВОЛЗ при експлуатації і організації роботи її лінійних підрозділів. До таких результатів відносяться:

а) метод контролю технічного стану лінійних споруд ВОЛЗ при експлуатації в різних географічних та 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 монографії, проведенні лекційних, практичних та лабораторних занять.

Ключові слова: волоконно-оптична лінія зв'язку, відмови та пошкодження, запасні частини і 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. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

A thesis submitted in fulfillment of D.Sc degree in technical science on 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 the scientific and practical problem – methods of ensuring the reliability of fiber-optic communication lines (FOCL) at the design and operation stages.

Based on the systematization and analysis of the current state of the problem of ensuring the reliability of fiber-optic communication lines, it was found that the main principles of ensuring their reliability are:

- justification of the components of ensuring the reliability of the line at different stages of the life cycle;
- the current state of the field of development and design of optical cable (OC) structures;
- development and justification of the theory of ensuring reliability at the stages of designing FOCL and its components.

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 tasks and develop methods:

- multi-criteria optimization of the modular design of the OC based on the identified criteria of structural and parametric optimization of the multi-layer cable core models allowed us to carry out a justified accelerated selection of the cable brand at the FOCL design stage simultaneously according to technical and economic efficiency. The methods allow to obtain a more economically advantageous cable design by determining the optimal structure and parameters of the elements following the first layer while simultaneously ensuring its technical characteristics and a given total number of optical fibers (OF). The results of research in the methods have shown that their application when choosing the OC brand at the FOCL design stage will allow to reduce the cost of the cable by up to 8.75% while ensuring the given technical efficiency;

- improvement of the selection of the strength elements of a single-layer optical cable design based on the established dependences of the permissible tensile loads of dielectric central strength element (CSE) and peripheral strength element (PSE) (fiberglass rods and aramid threads) of the cable on the geometric size of the central element, which allows for an accelerated selection of the OC brand with optimal strength and other structural elements at the design stage of the FOCL. Studies have shown that the use of aramid threads as a PSE contributes to the total value of the maximal allowable tensile load approximately an order of magnitude greater than that of the fiberglass rod of the CSE. Therefore, the correct choice of the CSE and its diameter make it possible to optimize the dielectrical cable design model;

– assessment of the thermomechanical influence 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 design stage of the FOCL changes in the mechanical parameters of the cable during operation. Based on the study of the impact of operating conditions on the geometric dimensions (change of step $\Delta h(t)$ and radius $\Delta R(t)$ of spiral laying in cable core, diameter of CSE $d_{\text{CSE}}(t)$, diameter of optical module tube $d_{\text{TOM}}(t)$) and design parameters (relative elongation $\varepsilon_{\text{ac}}(t)$, tensile load $F_{\text{acCSE}}(t)$) of the OC and its elements, it was established that due to the lower value of the temperature coefficient of linear expansion (TCLE) of the material, the optical fibers, due to the helical arrangement in the optical module tube, become longer than it, which provides a technological margin of OF and an increase in Fmk of the cable design.

– control of probabilistic reliability indicators (failure density, mean time to failure, mean time to restore communication and readiness factor) of linear structures of FOCL during the initial period of operation. It is based on determining the laws of distribution of random variables according to accumulated statistical data during the operation of FOCL, which describe the real processes of failure of linear structures, and allows to control the technical condition of elements and optimize the maintenance of fragments of transport electronic communication network (TECN);

– control of the mechanical condition of the dielectrical self-supporting cable (DSSC) fiber to monitor their changes. The method established the relation between the actual mechanical stress in the DSSC structure under physical and climatic loads acting on the cable and the relative elongation of the fiber, which allows to monitor changes in its mechanical condition and the cable as a whole in order to prevent the additional occurrence of unacceptable tensile forces and failure of the communication line;

– determination of the optimal location of the spare parts by the distance between the nodes and the intensity of FOCL failures. The method based on a network model constructed using graph theory makes it possible to determine, based on the magnitude of the failure flow parameter, the areas with the maximum damageability on the

fragments of the communication TECN and the nearest nodes for the location of spare parts sets in them. This allowed, based on real statistical data on damage to the fragment of the communication TECN in the Odessa region, to correct the efficiency of the placement of spare parts in the network nodes that are not evenly located, but close to the areas with the greatest damageability. The method for optimizing approaches to determining the location of spare parts is recommended for technical operation object (TOO) divisions of communication enterprises for the optimal placement of spare parts on the communication network and improving the technical maintenance of linear structures of the fiber optic network;

- determination of the optimal location of the spare parts by the total communication restoration time and the readiness factor. It allows, by the magnitude of the components of the communication restoration time and the delivery time to the damage site in case of its absence in the emergency recovery team (ERT), to estimate changes in the availability factor component due to the delivery of spare parts. The method requires communication units to qualitatively control the indicators of operational reliability and the time of communication restoration by spare parts of the FOTS network fragment to ensure a greater value of readiness ration K_{ISPTE} . The application of the method allowed, based on real operational data on the fragment of the ECM communication in the Odessa region, to make a correction in the placement of spare parts in the network nodes and reduce the value of the downtime factor component by 20% (1.25 times).

The sequence of designing the total reliability indicators of FOCL or FOTS has been improved to assess their reliability parameters during design and operation. More reliable calculated values of the average operational indicators of the quality of work of the fiber optic cable (average failure rate λ , maximum λ_{max} and minimum λ_{min} failure rate, average time of recovery connection t_{atrc}) of the TECN in different climatic regions of the country were obtained to increase the accuracy of determining the reliability indicators of the fiber optic cable or the FOTS during their design and operation.

A selection of mathematical models for determining the optimal location of spare

parts of a fragment of the fiber optic cable network was carried out.

In general, the results of the developments in the dissertation allowed creating comprehensive theoretical and practical approaches to ensuring the reliability of the fiber optic cable during design and operation, which constitute its scientific novelty.

The mathematical relations, methods and mathematical models obtained as a result of the performed complex of theoretical and experimental research allowed to develop the theory and methods of ensuring the reliability of FOCL, which have practical significance and are confirmed by the acts of implementation of the results of the dissertation work in:

1. The work of the testing center laboratory in State Enterprise "Odessa Research Institute of Telecommunications" in the field of fiber optics. Such results include:

a) the method for controlling the probabilistic reliability indicators of linear FOCL structures at the initial stage of operation;

b) the method for determining the parameters for assessing the technical condition of FOCL elements of the FOTS regeneration section by signal attenuation;

c) the implemented FOCL "Bilgorod-Dnistrovskiy - Shabo" of the Odessa region based on cables OKSB-0.2-50-1.0/1.3-4 and OKSP-0.1-50-1.0/1.3-4 and equipment FOTS 30/120. Monitoring the technical condition of its linear structures allowed to improve its maintenance.

2. The work of the regional branch of joint-stock company "Ukrzaliznytsia". Such results include:

a) the method for assessing the temperature impact of the operating conditions of the FOCL on the geometric dimensions and design parameters of the OC, taken as a basis for choosing the brand and assessing the mechanical characteristics of the cable at the line design stage;

b) theoretical developments and practical recommendations for the design of the overhead FOCL (OFOCL) on the supports of the contact network of the transport railway between the Odesa Main and Peresyp stations using the OKL-3-D2A-14 cable for the operating conditions of the Black Sea climatic zone.

3. The work of the Lviv branch office of joint-stock company "Ukrtelecom".

Such results include:

a) the methods for selecting the optimal design of the OC according to mass-dimensional and economic indicators when designing the FOCL, which was taken as a basis for ensuring both technical and economic efficiency of the line, especially in conditions of lack of space in the city cable sewer;

b) theoretical developments and practical recommendations for the accelerated selection of the OC brand of the optimal and economically efficient design when designing the FOCL of the Western macroregion of JSC "Ukrtelecom".

4. The work of Limited Liability Company "Atracom" to improve the quality and reliability of the FOCL operation during operation and organization of the work of its linear divisions. Such results include:

a) the method for monitoring the technical condition of linear structures of the FOCL during operation in various geographical and climatic conditions;

b) practical recommendations for optimizing approaches to determining the location of spare parts sets on a fragment of the electronic communication network.

5. The educational process of the State University of Intelligent Technologies and Telecommunications: when updating the content of the educational program "Telecommunications and Radio Engineering" of the first (bachelor's) level of education in the specialty 172 "Electronic Communications and Radio Engineering", publishing methodological manuals and monographs, lecture notes, practical and laboratory classes.

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.

Список публікацій здобувача:

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Бондаренко О.В., Степанов Д.М., Боярова Г.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. *Научно-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/TKEA2013.6.37>.

4. Бондаренко О.В., Манько О.О., Стащук О.М., Степанов Д.М., Багачук Д.Г. Компенсация дисперсии сигнала за допомогою оптического волокна с анизотропными свойствами. *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., Кіфорук 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., Ромашенко 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 / Bahachuk D., Hadzyiev M., Nazarenko A., Odegov N., Stepanov D. // *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 // Сталій 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 міжнародних наукометричних баз 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., Кіфोरук 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., Вербицкий 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 трубі 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. Лондон, 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 G 02 B 6/44, заявник та патентовласник Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова; заявл. 11.06.2013; опубл. 25.11.2013, Бюл. № 22.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	28
ВСТУП.....	31
 РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЛІНІЙ ЗВ’ЯЗКУ ВОСП, ПЕРЕДУМОВИ ЇХ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	44
1.1 Сучасний стан галузі розробки та проектування конструкцій ОК для волоконно-оптичних ліній зв’язку	44
1.2 Загальні положення про надійність волоконно-оптичних ліній зв’язку	51
1.2.1 Основні терміни та визначення теорії надійності.....	52
1.2.2 Властивості надійності.....	55
1.2.3 Поняття «відмова». Класифікація і характеристики відмов.	57
1.3 Обґрунтування складових забезпечення надійності волоконно- оптичних ліній зв’язку на різних етапах життєвого циклу.....	60
1.4 Сучасний стан галузі розробки та проектування конструкцій оптичних кабелів	62
1.4.1 Загальні положення.....	62
1.4.2 Аналіз існуючих підходів до розрахунку конструкцій ОК.....	65
1.5 Розвиток та обґрунтування теорії забезпечення надійності на етапах проектування ВОЛЗ та її компонентів	76
1.5.1 Загальні рекомендації щодо забезпечення надійності ліній зв’язку ВОСП при їх проектуванні	76
1.5.2 Методика розрахунку та проектування показників надійності ліній зв’язку ВОСП	78
1.5.2.1 Основні вимоги щодо розрахунку та проектування показників	

	22
надійності ліній зв'язку ВОСП	78
1.5.2.2 Порядок розрахунку показників надійності при проєктуванні ліній зв'язку ВОСП.....	86
1.5.2.3 Практичні рекомендації з мінімізації ризику пошкоджень лінійних споруд ВОЛЗ та забезпечення норм її показників надійності.....	89
1.5.3 Роль і значення експлуатаційної статистики для забезпечення якості та надійності роботи ВОЛЗ	90
1.6 Постановка задач для дослідження та розв'язання проблеми.....	94
1.7 Висновки до першого розділу.....	95
 РОЗДІЛ 2. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕХНІЧНОЇ І ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЄКТУВАННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВОЛЗ ОПТИМАЛЬНИМИ МОДУЛЬНИМИ КОНСТРУКЦІЯМИ ОК.....	98
2.1 Розвиток теорії конструювання та оптимізації модульних моделей ОК для удосконалення проєктування і експлуатації ЕКМ.....	98
2.2 Обґрунтування послідовності проєктування та розробки оптимальних конструкцій оптичних кабелів.....	100
2.2.1 Загальні положення з проєктування та розробки ОК.....	101
2.2.2 Обґрунтування основних вимог до конструкцій ОК.....	102
2.2.3 Теоретичні підходи забезпечення механічної міцності та параметрів передавання ОК на основі загальних вимог до ВОЛЗ.....	108
2.2.3.1 Розробка теоретичних підходів забезпечення механічної міцності оптичних кабелів	108
2.2.3.2 Визначення передавальних параметрів ОК на основі загальних вимог до ВОЛЗ.....	119
2.2.4 Обґрунтування шляхів створення високонадійних конструкцій оптичних кабелів	123
2.3 Розробка методів багатокритеріальної оптимізації конструкцій оптичних кабелів	124
2.3.1 Розробка методу оптимізації осердя багатомодульної моделі	

	23
конструкції ОК	124
2.3.2 Обґрунтування та оптимізація процесу прискореного вибору структури трьохповивного осердя ОК	134
2.3.3 Розробка методу оптимізації багатомодульної моделі конструкції ОК за критерієм мінімальної собівартості	144
2.4 Розробка методу удосконалення вибору силових елементів при проектуванні оптимальної конструкції оптичного кабелю	155
2.5 Висновки до другого розділу.....	164
 РОЗДІЛ 3. РОЗВИТОК ТЕОРІЇ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВОЛЗ НА ЕТАПАХ ПРОЄКТУВАННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ	167
3.1 Загальні положення з виробництва ОК, будівництва та експлуатації ВОЛЗ.....	167
3.2 Постановка задачі дослідження забезпечення надійності ВОЛЗ на етапах виробництва ОК та її будівництва і експлуатації.....	168
3.3 Дослідження термомеханічного впливу на оптичні волокна при їх розташуванні в трубі оптичного модуля	169
3.4. Термомеханічний вплив на оптичні волокна в процесах виготовлення ОК, будівництва та умов експлуатації ВОЛЗ..	177
3.4.1 Дослідження термомеханічного впливу на оптичні волокна на етапі виготовлення кабелю.....	179
3.4.2 Дослідження термомеханічного впливу на ОВ кабелю на етапах будівництва та умов експлуатації ВОЛЗ.....	182
3.5 Розробка методу оцінки температурного впливу умов експлуатації ВОЛЗ на геометричні розміри і параметри осердя ОК	187
3.6 Аналіз основних порушень технології виробництва ОК та рекомендації з їх недопущення.	199
3.7 Аналіз основних порушень технології будівництва ВОЛЗ та рекомендації з їх недопущення	201
3.7.1 Порушення технології вхідного контролю ОК на кабельному	

	24
майданчику.....	204
3.7.2 Порушення технології прокладання оптичних кабелів.....	211
3.7.3 Порушення технології монтажу ОК та компонентів лінійного тракту волоконно-оптичних ліній зв'язку.....	213
3.7.4 Порушення технології приймально-здавальних робіт в експлуатацію лінійних споруд ВОЛЗ.....	217
3.7.5 Порушення під час вимірювань параметрів ОК та ВОЛЗ, що будується.....	220
3.8 Висновки по третього розділу.....	223

РОЗДІЛ 4. РОЗВИТОК ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ПІДХОДІВ ДО ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ

ВОЛЗ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАВАННЯ.....	227
4.1 Оцінки надійності волоконно-оптичних ліній зв'язку	227
4.1.1 Загальні положення.....	227
4.1.2 Експлуатаційні показники якості роботи та кількісні характеристики надійності ВОЛЗ	228
4.1.3 Взаємозв'язок окремих кількісних характеристик надійності та оцінка їхньої ймовірності.....	233
4.2 Дослідження реальних експлуатаційних показників якості роботи ВОЛЗ Донецької та Луганської областей	236
4.3 Дослідження реальних експлуатаційних показників якості роботи ВОЛЗ в різних кліматичних районах	249
4.4 Обґрунтування необхідності та послідовності визначення показників надійності при проєктуванні та експлуатації ВОЛЗ або ВОСП	257
4.5 Приклади визначення надійності ВОЛЗ або ВОСП при їх проєктуванні та експлуатації	261
4.6 Висновки до четвертого розділу.....	271

РОЗДІЛ 5. КОНТРОЛЬ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ

	25
ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ЛІНІЙ ЗВ'ЯЗКУ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ.....	275
5.1 Загальні положення	275
5.2 Обґрунтування підходів до визначення розподілу випадкових величин.....	275
5.2.1 Закони розподілу дискретних випадкових величин.....	283
5.2 Закони розподілу неперервних випадкових величин.....	286
5.3 Критерії згоди.....	290
5.4 Визначення закону розподілу пошкоджень лінійних споруд ВОЛЗ транспортної електронної комунікаційної мережі зв'язку країни	297
5.5. Контроль технічного стану лінійних споруд ВОЛЗ за якістю та безвідмовністю роботи в різних кліматичних районах.....	305
5.5.1 Дослідження статистичних даних розподілу часу напрацювання на відмову лінійних споруд ВОЛЗ.....	306
5.5.2 Розробка методу контролю ймовірнісних показників надійності лінійних споруд ВОЛЗ при початковому терміні експлуатації	313
5.6 Розробка методу контролю механічного стану оптичного волокна діелектричного самоутримного оптичного кабелю при експлуатації.....	319
5.7 Розробка способу визначення параметрів оцінки технічного стану елементів ВОЛЗ ділянки регенерації ВОСП.....	336
5.8 Висновки до п'ятого розділу.....	347
 РОЗДІЛ 6. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ЛІНІЙ ЗВ'ЯЗКУ КОМПЛЕКТАМИ ЗІП.....	351
6.1. Загальні передумови та постановка задачі	351
6.1.1 Структура системи ЗІП.....	353
6.1.2 Показники достатності системи ЗІП.....	354
6.1.3 Задачі оптимізації системи ЗІП при її проектуванні	360
6.2 Стратегія поповнення запасів комплектів ЗІП лінії.....	362
6.3 Склад розрахунку показників достатності системи ЗІП складної структури.....	364

6.4. Узагальнення підходів до забезпечення норм надійності ВОЛЗ запасними елементами ЗІП.....	367
6.4.1 Основні підходи з оптимізації розташування запасних частин ЗІП мережі ВОЛЗ.....	368
6.4.2 Роль логістики в системі забезпечення ЗІП на мережі ВОЛЗ.....	369
6.5 Розрахунок показників достатності комплектів ЗІП.....	372
6.5.1 Розрахунок показників достатності одиночного комплекту ЗІП.....	372
6.5.2 Розрахунок показників достатності ремонтного комплекту ЗІП.....	373
6.5.3 Розрахунок показників достатності групового комплекту ЗІП.....	375
6.6 Оптимальне проєктування комплектів ЗІП	379
6.7 Оптимальне проєктування системи ЗІП складної структури	380
6.8 Використання теорії графів для розробки математичних моделей фрагмента ТЕКМ зв'язку	382
6.9 Оптимізація підходів до визначення місця розташування комплектів ЗІП фрагмента ТЕКМ зв'язку.....	385
6.9.1 Розробка методу визначення розташування ЗІП за відстанню між вузлами	385
6.9.1.1 Метод визначення місця розташування ЗІП за критерієм мінімальної відстані між вузлами.....	385
6.9.1.2 Розробка методу визначення місця розташування ЗІП за відстанню між вузлами та інтенсивністю відмов ВОЛЗ.....	387
6.9.2 Розробка методу визначення місця розташування ЗІП за сумарним часом відновлення зв'язку та коефіцієнтом готовності.....	395
6.10 Вибір математичних моделей визначення оптимального місця розташування запасних частин фрагменту мережі ВОЛЗ.....	401
6.11 Висновки до шостого розділу.....	403
ВИСНОВКИ	404
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	409
Додаток А. Акти впровадження результатів дисертаційної роботи.....	435

Додаток Б. Довідникові дані до проєктування та оптимізації модульних конструкцій оптичних кабелів.....	444
Додаток В. Довідникові дані до забезпечення надійності ВОЛЗ на етапах виробництва ОК та її будівництва.....	447
Додаток Г. Результати розрахунку ймовірнісних характеристик та перевірки відповідності закону розподілу кількості пошкоджень та часу напрацювання на відмову лінійних споруд ВОЛЗ в різних кліматичних районах.....	456
Додаток Д. Програмний код для визначення місця розташування ЗІП на ТЕКМ зв'язку та результати обробки даних	462
Додаток Е. Вибір математичних моделей визначення оптимального місця розташування запасних частин фрагменту мережі ВОЛЗ.....	475
Додаток Ж. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	476

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ЄНСЗ	Єдина національна система зв'язку
ЕКМ	Електронна комунікаційна мережа
ТЕКМ	Транспортна електронна комунікаційна мережа
ВОСП	Волоконно-оптична система передавання
ВОЛЗ	Волоконно-оптична лінія зв'язку
ЛС	Лінійні споруди
ПВОЛЗ	Повітряна волоконно-оптична лінія зв'язку
ОК	Оптичний кабель
СОК	Самоутримний оптичний кабель
ДСОК	Діелектричний самоутримний оптичний кабель
ОВ	Оптичне волокно
ООВ	Одномодове оптичне волокно
БОВ	Багатомодове оптичне волокно
ОМ	Оптичний модуль
ТЗО	Трубчата захисна оболонка
ЩЗО	Щільна захисна оболонка
СЕ	Силовий елемент
ПСЕ	Периферійний силовий елемент
ЦСЕ	Центральний силовий елемент
ЗЕ	Заповнювальний елемент (для розділу 2)
ЗЕ	Запасний елемент (для розділу 6)
ПО	Профільоване осердя
ТКЛР	Температурний коефіцієнт лінійного розширення
ПКВ	Параметр-критерій відмови
ЗВФ	Зовнішній впливовий фактор
A	Загасання оптичного сигналу
α	Коефіцієнт загасання сигналу в оптичному волокні
$\alpha_{\text{ОВ}}$	Коефіцієнт загасання оптичного волокна (для розділу 2)

$\alpha_{ОВ}$	Температурний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу волокна (для розділу 3)
$\Delta\alpha$	Приріст загасання оптичного сигналу
ЦСП	Цифрова система передавання
СЦІ	Синхронна цифрова ієрархія
МДРН	Максимально допустиме розтягувальне навантаження
ДРН	Допустиме розтягувальне навантаження
ТУ	Технічні умови
ТС	Технічний стан
НТД	Нормативно-технічна документація
ЗІП	Запасні частини, інструменти і приладдя

Додаткові позначення

M – число різних комплектів у системі ЗІП заданої структури;

$N_j, j = 1, \dots, M$ – кількість типів елементів в j -ому комплекті;

N – кількість типів елементів у даному комплекті;

Δ^*, K^* – показники достатності системи ЗІП;

Δ^* – показник достатності j -го комплекту;

Δ_{ij}^* – показник достатності запасу елементів i -го типу в j -му комплекті;

P_{ij} – середнє в часі значення ймовірності наявності в даному комплекті черги з j незадоволених заявок на елемент i -го типу;

Λ – середня кількість заявок, що поступають в даний комплект в одиницю часу;

Λ_i – середня кількість заявок на елемент i -го типу, що поступає в даний комплект в одиницю часу;

Λ_0, K_0 – значення показників достатності ЗІП, що вимагаються;

$Q = \Delta^*$ або $Q = -\ln K^*$; $Q_0 = \Delta_0$ або $Q_0 = -\ln K_0$,

в залежності від вибору показника достатності ЗІП в конкретній задачі;

$n_j = (n_{ij}, i = 1, \dots, N_j) n_{ij}$ – початкова кількість запасних елементів i -го типу в j -му

комплекті;

$n = (n_i, i = 1, \dots, N_j) n_i$ – початкова кількість запасних елементів даного i -го типу в даному комплекті;

n – початкова кількість запасних елементів даного типу в даному комплекті;

c_{ij} – витрати на один елемент i -го типу в номенклатурі j -го комплекту;

$m(l)$ – кількість основних (резервних) елементів даного типу в об'єкті;

$\lambda(\lambda', \sigma)$ – інтенсивність відмов основного (резервного, запасного) елементу даного типу;

α_i – тип стратегії поповнення запасу елементів i -го типу в даному комплекті;

T_{i1}, T_{i2} – числові параметри стратегій поповнення запасу елементів i -го типу;

T_{Π} – період поповнення запасу елементів даного типу;

T_p – середній час ремонту одного елемента даного типу;

T_d – середній час доставки елементів даного типу з джерела поповнення;

$T_{ед}$ – середній час екстреної доставки елементів з джерела поповнення;

k – рівень поповнення запасу елементів даного типу;

N_0 – кількість типів елементів об'єкта;

$\Lambda_0 = \sum_{i=1}^{N_0} \Lambda_{0i}$, Λ_{0i} – інтенсивність відмов елементів i -го типу в об'єкті.

ВСТУП

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. Вона здатна перетворювати електричні сигнали різноманітних цифрових пристроїв в оптичні та передавати їх по волоконно-оптичним лініям зв'язку, що є основним середовищем передачі в мережі.

В умовах стрімкого розвитку інформаційного суспільства та зростаючих 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 зв'язку, через яку передаються велика кількість каналів та об'єм інформації, що постійно збільшується, в першу чергу, 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 на етапі проектування 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 і інструментів та приладь на фрагменті мережі зв'язку можуть привести до погіршення якості та безвідмовності роботи лінії і, як наслідок, її показників надійності. Неякісні проєктування та технічна експлуатація лінії можуть зумовити появу відмов на мережі зв'язку і, як наслідок, втрати великого об'єму інформації у разі простою лінії, збільшення часу її передавання через обхідні шляхи або значних фінансових втрат.

Актуальність теми. Проблема забезпечення надійності ВОЛЗ полягає в загостренні на сьогоднішній день 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. Ця проблема набуває все більшої актуальності, а її вирішення потребує комплексного підходу. 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 вклад у розвиток цих задач внесли 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, розроблені і досліджені характеристики різних типів оптичних волокон та ОК, створені та досліджені методи прискореної оцінки технічного стану елементів ВОЛЗ, визначені загальні підходи до забезпечення надійності та мінімізації ризику їх пошкодження.

Вивчення літературних джерел показало, що низка задач зі створення, в

першу чергу, 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, проектування, будівництва і експлуатації; контролю технічного стану елементів ВОЛЗ при експлуатації; забезпечення надійності ВОЛЗ комплектами ЗІП.

Стан науково-практичної проблеми. Діюча нормативна база з проектування лінійних споруд (ЛС) електронних комунікацій передбачає необхідність приймання технічних рішень, які забезпечать надійність і довгострокову експлуатацію ЛС ВОЛЗ з найбільш сприятливими умовами та 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 проектування та забезпечують подальшу якісну та надійну роботу ВОЛЗ при експлуатації, відсутні в повній 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 їх механічних параметрів конструкції, зокрема, максимального допустимого розтягувального навантаження. 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 проектування та багатокритеріальної оптимізації моделей конструкцій ОК.

Відомі в 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 відсутні в повній мірі. Це вимагає розробки методу оцінки температурного впливу умов експлуатації ВОЛЗ на геометричні розміри і 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 в розвитку та обґрунтуванні 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 при початковому терміні експлуатації.

Забезпечення надійності ВОЛЗ при експлуатації та технічному обслуговуванні підприємством зв'язку комплектами ЗІП відсутні в повній мірі. 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 виконані в роботі.

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 відносяться необхідність:

а) розробки методів: – обґрунтованого прискореного вибору та оптимізації моделей модульних конструкцій ОК, що є однією з основних складових на етапі проєктування ВОЛЗ з 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 і 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.

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 у 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 пропускну 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 даної 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 ЗП.

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 використані: методи теорії ліній передавання – для дослідження та оптимізації конструкцій оптичних кабелів, методи теорії пружності – для дослідження та оцінки механічної міцності різних силових елементів 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 ЗП на мережі зв'язку.

Наукова новизна одержаних результатів роботи полягає у 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 ОВ 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, її максимальних та мінімальних значень, середнього часу відновлення зв'язку 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 при уточненні існуючої 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 та 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 у 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, одержані автором самостійно, або в розробку яких автор вніс основний творчий вклад. У друкованих працях, опублікованих особисто та у співавторстві, надані результати розробки теоретичних підходів з забезпечення надійності ВОЛЗ у цілому на етапах проектування та експлуатації. 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 положення дисертації були опубліковані та обговорені на 26 всеукраїнських та міжнародних науково-технічних, науково-практичних конференціях: 67-й наук.-техн. конф. проф.-викл. складу, науковців, асп. та студ. ОНАЗ ім. О.С. Попова, м. Одеса, 5 – 7 груд. 2012 р.; XIII міжнародній науково-технічній конференції «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах», м. Одеса (Затока), 6 – 12 черв. 2014 р.; 4-й міжнародній науково-практичній конференції «Інфокомунікації – сучасність та майбутнє», м. Одеса, 30 – 31 жовтня 2014 р.; 69-й наук.-техн. конф. проф.-викл. складу, науковців, асп. та студ. ОНАЗ ім. О.С. Попова, м. Одеса, 3 – 5 груд. 2014 р.; XIV міжнародній науково-технічній конференції «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах», м. Одеса (Затока), 5 – 10 черв. 2015 р.; 5-й міжнародній науково-практичній конференції «Інфокомунікації – сучасність та майбутнє». – м. Одеса, 29 – 30 жовтня 2015 р.; 16-й міжнародній науково-технічній конференції «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах», Одеса (Затока), 10-15 червня 2016 р.; International scientific and technical conference “The modern situation and prospects development information and communication technologies”, 23 – 25 November 2016, Baku; V-й міжнародній науково-практичній конференції «Фізико-технологічні проблеми передавання, оброблення та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах», Чернівці, 3 – 5 листопада 2016 р.; 6-й, 7-й, 8-й та 9-й міжнародній науково-практичній конференції «Інфокомунікації – сучасність та майбутнє», м. Одеса, 27 – 28 жовтня 2016 р., 26 – 27 жовтня 2017 р., 16 – 17 листопада 2018 р., 12 – 15 листопада 2019 р.; VI-й міжнародній науково-практичній конференції «Практичне застосування нелінійних динамічних систем в інфокомунікаціях», м. Чернівці, 9 – 11 листопада 2017 р.; 5th International scientific and practical conference “The world of science and innovation”, Лондон, Великобританія, 9 – 11 грудня 2020 р.; VIII міжнародній науково-практичній конференції «World science: problems, prospects and innovations», Торонто, Канада, 21 – 23 квітня 2021 р.; IX Міжнародній науково-практичній конференції “Priority directions of science and technology development”, м. Київ, 16 – 18 травня 2021 р.; 9 International

scientific and practical conference “Modern research in world science”, Lviv, November 28 – 30, 2022; III міжнародній науково-практичній конференції «Global science: prospects and innovations», м. Ліверпуль, Великобританія, 2 – 4 листопада 2023; IX International Scientific and Practical Conference «Perspectives of contemporary science: theory and practice», Lviv, 14 – 16 October 2024; II International Scientific and Practical Conference «Science in the modern world: innovations and challenges», Toronto, Canada, 24 – 26 October 2024; XI International Scientific and Practical Conference «European congress of scientific achievements», Barcelona, Spain, 4 – 6 November 2024; X International Scientific and Practical Conference «Perspectives of contemporary science: theory and practice», Lviv, 11 – 13 November 2024.

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

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЛІНІЙ ЗВ'ЯЗКУ ВОСП, ПЕРЕДУМОВИ ЇХ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Сучасний стан галузі розробки та проектування конструкцій ОК для волоконно-оптичних ліній зв'язку

На сьогодні електронна комунікація (телекомунікація, електрозв'язок) вже набула значної інтеграції та повсюдного 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 [1].

Електронна комунікаційна послуга має високий рівень затребуваності та полягає в прийманні та/або передачі інформації, що передається за допомогою електронних комунікаційних мереж і послуг [1].

В загальному випадку, передача/приймання інформації між кінцевими обладнаннями користувачів, вузлами зв'язку, мережними пристроями (серверами, базами даних тощо) відбувається через ЕКМ, що за технологічним розвитком та розгортанням можна охарактеризувати дворівневою структурою:

- транспортна ЕКМ, що, як правило, має кільцеву топологію та призначена для обміну великих об'ємів мультимплексованих високошвидкісних потоків інформації між вузлами зв'язку та іншими елементами мережі;
- абонентські лінії ЕКМ, що призначені для доступу кінцевих пристроїв абонентів до цієї мережі та надання відповідних комунікаційних послуг.

Електронна комунікаційна мережа (раніше телекомунікаційна мережа) – комплекс технічних засобів електронних комунікацій та споруд, призначених для надання електронних комунікаційних послуг [1].

Абонентська лінія ЕКМ – складова частина цієї мережі, що з'єднує кінцеве (термінальне) обладнання [1].

Зв'язок через електронні комунікації став невід'ємною частиною сучасного життя. Він дозволяє швидко та ефективно обмінюватися усіма видами трафіка (телефонія, відео, дані), а також знаходити нові можливості для розвитку та зростання. Важливість електронних комунікацій полягає в їх здатності обміну інформації між користувачами, сприяти розвитку бізнесу та освіти, а також забезпечувати доступ до інформації та можливостей для всіх шарів суспільності. Використання електронних комунікацій є ключовим для подальшого розвитку комунікацій країни в цифрову епоху. Крім того, електронні комунікації сприяють розвитку економіки країни, допомагаючи підприємствам та різним господарствам залучати нових клієнтів та розширювати свої можливості на міжнародному ринку. Важливо підтримувати та розвивати інфраструктуру електронних комунікацій, щоб забезпечити доступність та якість цих послуг для всіх громадян.

Процеси, події в суспільстві та розвиток людства в XXI столітті характеризуються швидким розповсюдженням та впровадженням засобів цифровізації. Протягом останніх двох десятиріч років цифровізація змінила оточуючий світ, життя людей в суспільстві та процеси в ньому. Всі люди розвинених країн світу в більшій або меншій мірі стали учасниками цифрової трансформації, що є проявом настання цифрової епохи.

Цифрова епоха – це вже сучасна ера, в якій соціальна, економічна та політична діяльність залежить від інформаційно-комунікаційних технологій.

Причиною виникнення такої інформаційної ери стала необхідність в передаванні інформації між людьми. І з кожним роком зростає потреба в збільшенні швидкості, об'єму, дальності, легкості та доступності передавання різного виду інформації між користувачами.

Згідно до [2] телекомунікаційні системи та мережі відносяться до галузі науки й техніки, яка вивчає системи та мережі, призначені для передавання інформації на відстань засобами електричного та поштового зв'язку, методи теорії зв'язку й побудови зазначених систем, мереж і керування ними.

В електронній комунікаційній мережі передавання/приймання оптичних

сигналів забезпечує волоконно-оптична система передавання. Вона здатна перетворювати електричні сигнали від різноманітних цифрових пристроїв в оптичні та передавати їх по волоконно-оптичним лініям зв'язку, що є основним середовищем передачі в цій мережі.

Вивчення надійності ВОЛЗ є критично важливим аспектом для забезпечення безперебійної та ефективної роботи електронних комунікацій. Вона, як найбільший елемент, який є основою ЕКМ, використовується для передачі великої кількості даних на великі відстані з високою швидкістю та точністю. Надійність цих ліній є ключовою для забезпечення стабільності функціонування мережі і уникнення втрат даних, що передаються.

Вивчення надійності ВОЛЗ включає аналіз різних аспектів, таких як механічна міцність оптичних кабелів, стабільність їх оптичних параметрів, якість її проектування, будівництва та експлуатації, а також стійкість до впливу зовнішніх факторів (вологість, температура, тиск), аналіз причин відмов та пошкоджень, а також контроль, прогнозування та усунення можливих дефектів у лініях зв'язку.

Дослідження надійності ВОЛЗ дозволяє покращити якість та ефективність електронної комунікаційної мережі, зменшити ризик виникнення аварій та збільшити їх стійкість до різних впливів. Це допомагає забезпечити безперебійну та якісну роботу мережі зв'язку, що є критично важливим у сучасному світі.

Волоконно-оптичні системи передачі, створені на основі мікроелектронних компонентів, мають високу надійність, тобто коефіцієнт готовності порядку 0,999. Надійність лінійних споруд ВОЛЗ нижче за показники надійності станційного обладнання та становить коефіцієнт готовності порядку 0,995 [3]. Це обумовлено жорсткішими та непередбачуваними умовами експлуатації ВОЛЗ.

Проблема забезпечення надійності ВОЛЗ, яка включає в себе широке коло питань, що пов'язані з розробкою та виробництвом усіх її елементів, проектуванням, будівництвом та технічною експлуатацією лінії, не перестає набувати все більшого значення.

Дослідження, які вивчають явища, що протікають у часі і приводять до

порушення нормальної роботи тих або інших елементів ВОЛЗ, створюють основи для визначення надійності, вишукують способи її підвищення при розробці, будівництві й експлуатації, визначають способи контролю, а також методику збору, обліку та аналізу статистичних даних, які характеризують надійність [3].

При вирішенні проблеми надійності ВОЛЗ виникає певний комплекс питань, що потребує теоретичних та практичних досліджень.

Так, до основних питань цього комплексу слід віднести [4]: математичний апарат теорії надійності, методики розрахунків і оцінки надійності ВОЛЗ під час проектування, будівництва та технічної експлуатації, експлуатаційні та кількісні показники надійності, що можливо визначати на основі статистичних даних під час технічної експлуатації ВОЛЗ, методики обґрунтування вимог до надійності, аналіз факторів, що впливають на надійність, методи забезпечення надійності на кожному з життєвих циклів ВОЛЗ, організаційно-технічні заходи.

Необхідність вирішення проблеми надійності елементів ВОЛЗ обумовлена низкою причин, основними з яких є [4]: науково-технічний прогрес в галузі зв'язку, що характеризується настійною необхідністю визначення та покращення ефективності та якості роботи технічних засобів при оцінці надійності їх функціонування; підвищення складності та розширення функцій складових елементів ВОЛЗ, а також обладнання для її обслуговування, умов їх експлуатації та відповідності задач, які на них покладаються; економічні фактори, що проявляються у необхідності передачі великого об'єму трафіка, тобто великого об'єму втрат у разі його простою, і велика протяжність між сусідніми проміжними пунктами лінії, тобто збільшення часу відновлення зв'язку.

Крім того, недостатня надійність ВОЛЗ призводить до збільшення долі експлуатаційних витрат порівняно з загальними витратами на проектування, виробництво і використання її елементів.

Як відомо, при розв'язанні проблеми надійності технічних засобів зв'язку необхідно враховувати такі особливості [5]:

- теорія надійності є складним предметом через широке застосування

математики, а саме ймовірнісної та математичної статистики, розв'язання інтегральних, алгебраїчних та диференціальних рівнянь, елементів теорії графів, методів статистичного моделювання, методів оптимізації, тощо;

- необхідність використання комп'ютерної техніки для розв'язання складних практичних задач;

- випадковий характер відмов та відновлень, що призводить до того, що будь-яке рішення задачі носить ймовірнісний характер;

- труднощі математичного моделювання об'єктів через відсутність достовірних даних про надійність елементів системи, зокрема, даних про закони розподілу відмов та відновлень;

- труднощі, а інколи й неможливість статистичних випробувань через технічні та економічні обмеження;

- складність сучасних систем й, тому, великі розмірності рівнянь, розв'язання яких в багатьох випадках неможливо навіть при використанні комп'ютерних технологій.

В загальному випадку якість процесів – це сукупність властивостей, що визначають їх придатність для експлуатації. Надійність є найважливішим техніко-економічним показником якості будь-якого технічного засобу, яким є елемент ВОЛЗ, що визначає здатність безвідмовно працювати з незмінними технічними характеристиками протягом заданого проміжку часу при певних умовах експлуатації [4].

Як відомо, при зростанні швидкості передавання інформації по ВОЛЗ зростають вимоги до їх надійності, так як втрати від простою зв'язку збільшуються пропорційно швидкості передавання. Тому питанням забезпечення надійності ВОЛЗ необхідно приділяти увагу на етапах їх проектування, будівництва та експлуатації [5]. Проблема забезпечення надійності стає ще більш актуальною через значний розвиток оптичної мережі зв'язку, та збільшення експлуатаційних витрат порівняно з першочерговими капітальними витратами й тому питання правильного аналізу та планування мереж зв'язку необхідно приділяти достатньо уваги [6].

Значна доля цієї проблеми покладається на організації, що ведуть технічну експлуатацію ВОЛЗ та мереж зв'язку. Проте правильно спроектована і побудована мережа полегшить досягнення високої надійності при експлуатації та дозволить знизити експлуатаційні витрати [5].

Проблема забезпечення надійності пов'язана з усіма етапами створення ВОЛЗ та її компонентів, й усім періодом їх практичного використання. Тому потребує вивчення не на окремих етапах проектування (що включає розробку дослідного зразка), виробництва складових компонентів, будівництва ВОЛЗ та її експлуатації, а вимагає комплексного підходу до визначення надійності [4].

Надійність ВОЛЗ в цілому вже закладається в процесі виготовлення її складових елементів шляхом правильного вибору технології виготовлення, контролю якості початкових матеріалів, контролю режимів і умов виготовлення, повноти методів випробування за різними показниками [4].

Належна надійність збудованої лінії забезпечується шляхом правильних зберігання та підтримання експлуатації лінійних споруд ВОЛЗ, серед якої профілактичний контроль та ремонт [4].

Крім того, надійність ВОЛЗ залежить від надійності її комплектувальних елементів. Тому питання визначення та забезпечення показників надійності є нині необхідною умовою для якісної та безвідмовної роботи ВОЛЗ.

Широкий розвиток ВОЛЗ на мережах зв'язку потребує забезпечення їх технічної здатності та підвищення ефективності за різними показниками, що є неминучим та необхідним шляхом удосконалення кабельної техніки.

Широке будівництво мереж ВОЛЗ потребує, в першу чергу, значної кількості різноманітних конструкцій ОК. Для масового виробництва повинні відбиратися такі конструкції кабелів, які з найменшими матеріальними витратами задовольняють вимоги міжнародних стандартів. Для цього в процесі конструювання ОК потрібно враховувати й аналізувати дуже багато різних факторів, що чинять безпосередній вплив на їх якість та надійність [3].

Всі ці фактори мають складний взаємний зв'язок, який не повною мірою розкритий та вивчений.

Так, наприклад, при розбудові оптичних транспортних ЕКМ та абонентських ліній виробники оптичних кабелів у своїх каталогах продукції зазначають можливість виготовлення ОК певної конструкції та з певними матеріалами за умовами замовника.

Проте відсутність або недостатнє розкриття певних питань конструювання та виробництва таких ОК в деяких країнах, порівняно з досвідом провідних фірм-виробників кабельної продукції, може призвести до виготовлення конструкцій кабелю із занадто великими запасами значень характеристик та недоцільними, неефективними економічними витратами при виробництві.

Таким чином, відсутність певних знань і досвіду в деяких виробників кабельної продукції призвели фактично до виготовлення недостатньо економічної продукції. Останнє потребує у подальшому перегляду окремих питань технології виготовлення і розробки методів контролю якості кабелів.

Розширення функцій сучасних ВОЛЗ також вимагає підвищеної уваги до надійності ОК та інших її елементів.

Вивчення надійності ВОЛЗ під час експлуатації є критично важливим для забезпечення безперебійної, якісної та ефективної роботи телекомунікаційних систем. Під час експлуатації ВОЛЗ можуть зазнавати різних впливів, таких як механічні пошкодження, вплив навколишнього середовища, температурні коливання та інші фактори, які можуть вплинути на їхню здатність виконувати свою задачу при заданих якості та надійності. Тому вивчення надійності ВОЛЗ під час експлуатації включає в себе постійний моніторинг стану ліній, виявлення можливих дефектів та вчасне їх усунення. А також розробку та удосконалення існуючих методів контролю та прогнозування технічного стану лінії.

Дослідження надійності ВОЛЗ під час експлуатації дозволяє попередити можливі аварійні ситуації, забезпечити безперебійну роботу електронних комунікаційних систем, зменшити час відновлення після виникнення неполадок та забезпечити високу якість обслуговування для користувачів. Такий підхід допомагає зберегти ефективність та надійність мережі зв'язку в умовах постійних технологічних змін та зростаючих вимог до швидкості та якості передачі даних.

Оцінка надійності потребується як для діючих або проєктованих кабельних ліній, так і для перевірки ОК та інших елементів ВОЛЗ як промислових виробів. Оцінка надійності діючих або проєктованих ВОЛЗ вирішується на основі збору й оброблення експлуатаційних статистичних даних про кількість, характер і причини пошкоджень.

1.2 Загальні положення про надійність волоконно-оптичних ліній зв'язку

Як відмічається в [4, 5, 7 – 9, 12] теорія надійності є однією з фундаментальних наук, математичний апарат якої складають теорія ймовірностей та математична статистика.

Поняття надійності тісно пов'язане з поняттям якості. Під якістю системи або виробу розуміється сукупність властивостей, що визначають ступінь придатності для використання за призначенням. Залежно від умов прокладання та призначення ВОЛЗ піддається цілому ряду контрольних випробувань і вимірювань, які й визначають її якість. Так, наприклад, до електричних вимірювань відноситься – перевірка опору ізоляції захисного шлангу, що свідчить про технічний стан зовнішніх покриттів ОК, а до оптичних – перевірка коефіцієнта загасання, коефіцієнта хроматичної дисперсії, наявності неоднорідностей по довжині ОК [3, 5].

Якщо при будівництві ВОЛЗ її параметри відповідають встановленим нормам, то вона вважається цілком доброякісною і приймається в експлуатацію спеціальною приймальною комісією [5].

Для нормативного забезпечення методів, заходів і засобів вимірювання, спрямованих на досягнення необхідного рівня надійності, використовується система стандартів «Надійність техніки» [7, 8]. Ця система відповідно до міжнародного стандарту ISO 9000: 2015 забезпечує ефективність організаційно-технічних, конструкторсько-технологічних і експлуатаційних заходів, спрямованих на досягнення необхідного рівня надійності технічних засобів [9].

Аналізуванням і дослідженням цих питань займається наука, що називається теорія надійності. Таким чином, однією із основних її задач є вивчення закономірностей виникнення відмов в досліджуваних об'єктах [4].

З точки зору теорії надійності будь-який об'єкт можна охарактеризувати його властивостями, технічним станом та можливістю відновлення після втрати працездатності. Найважливішою комплексною властивістю об'єкта є надійність.

Основними питаннями вивчення теорії надійності є [4, 6, 8 – 12]: критерії надійності технічних систем різного призначення, методи аналізу надійності в процесі проектування та експлуатації технічних систем, методи аналізу технічних систем, шляхи забезпечення та підвищення надійності техніки, наукові методи експлуатації техніки, які забезпечують її високу надійність.

На протязі існування об'єкта він поглинає певним технічним ресурсом, закладеним у нього на етапі проектування. Під час технічної експлуатації об'єкт витрачає свій технічний ресурс до досягнення граничного стану. Досягнення граничного стану можна відтягнути у часі шляхом проведення профілактичних та ремонтних робіт. Таким чином, надійність об'єкта від початку експлуатації зменшується за рахунок витрати його технічного ресурсу. Цей процес може тривати доти, поки експлуатація технічного засобу є доцільною.

1.2.1 Основні терміни та визначення теорії надійності ВОЛЗ

Надійність – один з найважливіших параметрів ВОЛЗ. Її показники оцінюють якість лінії, її ефективність, безвідмовність, живучість, ризик пошкоджень [5 – 8]. Надійність включає в себе властивості: безвідмовність, довговічність, збереженість та ремонтпридатність. Вона залежить від багатьох зовнішніх і внутрішніх факторів, оцінюється багатьма критеріями і показниками [5 – 10].

Далі зупинимося на основних термінах надійності, які використовуються в роботі [7 – 10].

Прогнозування надійності – окремий випадок розрахунку надійності на

основі математичних моделей, які відображають тенденції зміни раніш оціненої надійності об'єктів-аналогів або їх складових частин з урахуванням зміни конструкції та умов експлуатації [7].

Життєвий цикл – інтервал часу з моменту виникнення об'єкта до його повного зняття з використання (утилізації) [7].

Зростання безвідмовності – процес прогресуючого покращення показників безвідмовності об'єкта з часом [7].

Інженерне забезпечення – дії під час проєктування, виготовлення та експлуатації, керівні вказівки, інструкції, методи та способи, процедури, підготовка обслуговуючого персоналу тощо, які націлені на досягнення рівня надійності, що вимагається [6].

Напрацювання (наробіток) – тривалість або обсяг роботи об'єкта ВОЛЗ, вимірювані одиницями часу, числом циклів навантаження і т.п. [7].

Напрацювання до відмови – напрацювання об'єкта ВОЛЗ від початку її експлуатації до виникнення першої відмови [7].

Напрацювання між відмовами – напрацювання ВОЛЗ від закінчення відновлення її працездатного стану до виникнення наступної відмови [7].

Технічний ресурс – напрацювання об'єкта від початку його експлуатації (або її поновлення після ремонту) до переходу в граничний стан. Він може бути також регламентований, наприклад, від початку експлуатації до середнього або капітального ремонту, або від середнього до капітального ремонту, після якого потрібно продовження цього ресурсу. При відсутності регламентації, то це є ресурс від початку експлуатації до граничного стану після усіх ремонтів [7].

Термін служби – календарна тривалість експлуатації (у тому числі зберігання, ремонт і т.п.) від її початку до настання граничного стану [5, 7].

Час відновлення працездатного стану – тривалість відновлення робочого стану лінії [7].

Лінія при функціонуванні знаходиться в різних певних станах, оцінюваних показниками. До станів функціонування ліній відносяться:

а) справність – стан, при якому вона відповідає всім вимогам,

встановленим нормативно-технічною документацією (НТД) [5 – 10];

б) несправність – стан, при якому вона не відповідає хоча б одній з вимог нормативно-технічної або конструкторської документації [7];

в) працездатність – стан, при якому вона здатна виконувати задані функції, зберігаючи значення основних параметрів, встановлених НТД [7 – 10];

г) непрацездатність – стан, при якому її значення хоча б одного параметра, який характеризує здатність виконувати задані функції, не відповідає вимогам нормативно-технічної або конструкторської документації [5, 7].

Граничний стан – стан об'єкта, при якому його подальша експлуатація недопустима або недоцільна, або відновлення його працездатного стану неможливо або недоцільно [7].

Перехід об'єкту (виробу) з одного вищого за рівнем технічного стану в нижчий відбувається внаслідок таких подій, як відмови чи пошкодження [7].

На рис. 1.1 показана схема станів об'єкту та переходів з одного в інший [15].

Пошкодження – подія, що полягає в порушенні справного стану об'єкта призначеного для тривалої експлуатації [7].

Відмова – це подія, що полягає в порушенні працездатності об'єкта [12].

Збій – самоусувна відмова або одноразова відмова, що усувається незначним втручанням оператора [7].

Застосування (використання) об'єкта за призначенням припиняється в наступних випадках при: суттєвому порушенні безпеки і відхиленні величин заданих параметрів, неприпустимому збільшенні експлуатаційних витрат [6].

Елементи ВОЛЗ складаються з відновлювальних і невідновлювальних.

Оптичні кабелі відносяться до відновлювальних, оскільки їх відмови пов'язані з ушкодженнями одного або небагатьох елементів, які можуть бути відремонтовані або замінені.

До числа невідновлювальних об'єктів відносяться, наприклад, конектори, патчкорди і т.д.

1.2.2 Властивості надійності

У теорії надійності важливу роль відіграють поняття, як безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність, збереженість. Часто помилково вважають ці поняття складовими надійності і визначають як фізичні властивості [5].

Для кількісної оцінки надійності об'єкта застосовуються кількісні показники оцінки окремих його властивостей, представлені на рис. 1.2 [4 – 14].

Безвідмовність – це властивість об'єкта зберегти працездатний стан протягом деякого часу.

Показники безвідмовності – ймовірність безвідмовної роботи, ймовірність відмови, щільність розподілу напрацювання до відмови, функція розподілу часу до відмови, середнє напрацювання до відмови, напрацювання на відмову, інтенсивність і параметр потоку відмов [4 – 12].

Часто безвідмовність ототожнюють з поняттям «надійність» і характеризується показниками: ймовірністю безвідмовної роботи, середнім напрацюванням на відмову, інтенсивністю і параметром потоку відмов [5].

Зростання безвідмовності – процес прогресуючого покращення показників безвідмовності об'єкта з часом.

Довговічність – це властивість об'єкта зберігати працездатний стан до настання граничного стану при встановленій системі технічного обслуговування і ремонту [8]. Вона визначається наступними показниками [4 – 6, 8]: середній ресурс – математичне очікування технічного ресурсу; гама-відсотковий термін служби – календарна тривалість від початку експлуатації об'єкта, протягом якої він не досягне граничного стану із заданою ймовірністю у відсотках; середній термін служби – математичне очікування терміну служби.

Ремонтпридатність – властивість об'єкта, що полягає у пристосуванні до підтримання та відновлення працездатного стану шляхом технічного обслуговування і ремонту.

Показники ремонтпридатності: ймовірність відновлення в заданий час і середній час відновлення [4, 5 – 10].

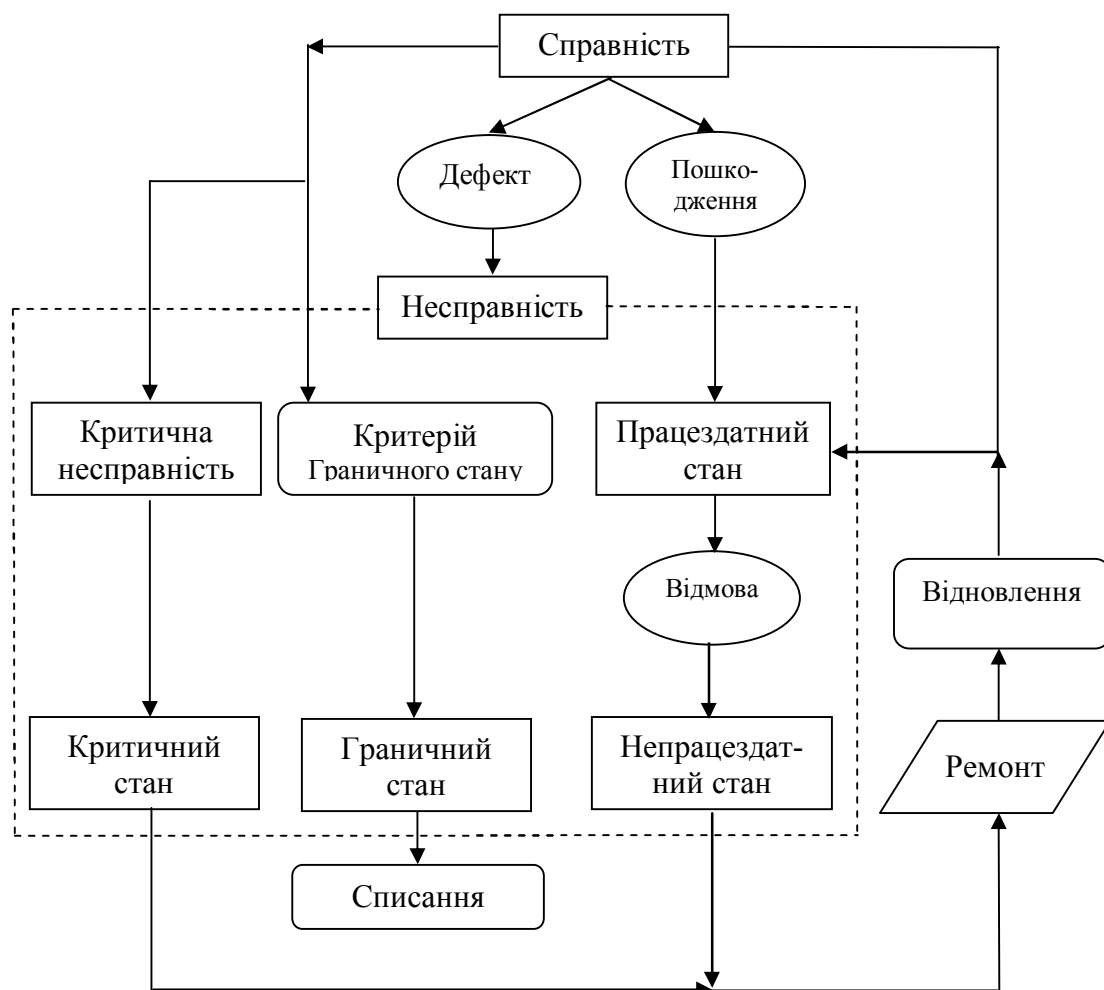


Рисунок 1.1 – Схема станів об'єкту та переходів з одного стану в інший

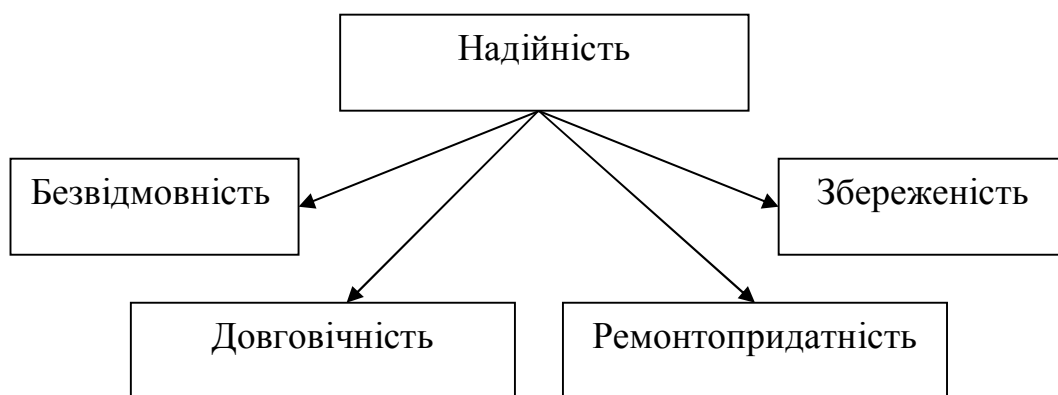


Рисунок 1.2 – Властивості надійності об'єкта

Збережуваність – властивість об'єкта зберегти в заданих межах значення параметрів, що характеризують здатність об'єкта виконати необхідні функції протягом і після зберігання та (або) транспортування.

Показники зберігання: середній термін зберігання і гамма-процентний термін збереженості [4, 6 – 10].

Кожна із зазначених вище властивостей об'єктів в цілому характеризують його надійність та визначаються відповідними показниками надійності за певними планами спостереження [4, 7 – 10].

Для об'єктів різного призначення і пристроїв застосовуються різні показники надійності. Можливо виділити п'ять груп об'єктів (рис. 1.3), що розрізняються показниками і методами оцінки надійності [4, 6 – 10, 14]: – неремонтуємі об'єкти, що застосовуються до першої відмови; – ремонтуємі об'єкти: а) відновлення яких можливо; б) відновлення яких в процесі застосування неможливо; в) відновлювані в процесі застосування, для яких неприпустимі перерви в роботі; г) відновлювані в процесі застосування об'єкти, для яких допустимі короточасні перерви в роботі.

Згідно до такої класифікації об'єктів ВОЛЗ в цілому відносяться до п'ятої групи. Проте деякі складові елементи ВОЛЗ можуть бути віднесені до інших груп. Класифікація об'єктів за показниками і методами оцінки надійності наведена на рис. 1.3.

Показники надійності поділяються на складові властивості надійності для об'єктів, що відновлюються і не відновлюються (табл. 1.1).

1.2.3 Поняття «відмова». Класифікація і характеристики відмов

Успішне вирішення практичних питань забезпечення надійності ВОЛЗ залежить від правильного розуміння фізичної сутності відмов, причин їхнього виникнення, можливих наслідків і способів боротьби з ними. Перехід ВОЛЗ з одного стану в інший відбувається внаслідок таких подій як відмова або пошкодження [7 – 10]. Відмова – це подія, коли порушується працездатність



Рисунок 1.3 – Класифікація об'єктів за показниками надійності

Таблиця 1.1 – Складові надійності для невідновлюваних та відновлюваних об'єктів

Властивості об'єкта	Показники надійності для об'єктів	
	невідновлюваних	відновлюваних
Безвідмовність	$T_{0\text{сер}}$ – середній час напрацювання на відмову, $\lambda(t)$ – інтенсивність відмов	T_0 – напрацювання на відмову, Λ – параметр потоку відмов
Довговічність	Співпадають з показниками безвідмовності	T_p – середній ресурс, $T_{\text{сл}}$ – середній термін служби
Ремонто- придатність	–	T_v – середній час відновлення
Збереженість	T_z – середній термін збереженості, $T_{\text{збер}}$ – призначений термін зберігання	
Безвідмовність і ремонтпри- датність (комплексні показники)	–	k_r – коефіцієнт готовності, $k_{\text{тв}}$ – коефіцієнт технічного використання, $k_{\text{ор}}$ – коефіцієнт оперативної готовності

лінії, або її певні характеристики (параметри) виходять за допустимі межі [7 – 10].

Пошкодження – стан ВОЛЗ, що полягає в порушенні її справного стану при збереженні працездатного стану [7].

За часом виникнення відмови ВОЛЗ поділяються на припрацювальні, що виникають в початковий період експлуатації, відмови при нормальній експлуатації, зносіві відмови, викликані незворотними процесами зносу, старіння матеріалів її елементів і т. п. [5 – 10].

Аналіз відомостей про відмови ВОЛЗ при експлуатації показує, що з плином часу відбувається старіння елементів і збільшується число відмов, що призводять до значного зростання витрат (матеріальних, часових, фінансових) ресурсів. Багаторічна практика експлуатації складових ВОЛЗ показує, що важливим завданням при підтримці роботи елементів лінійних споруд у стані працездатності є організація і проведення технічного обслуговування і різних видів ремонтів [5 – 10].

Інтенсивність відмов, яку інколи називають небезпекою відмов, є широко розповсюдженою кількісною характеристикою надійності при оцінці ВОЛЗ. Ця характеристика є функцією часу та дозволяє встановити характерні ділянки роботи лінії в часі, що дозволяє прийняти відповідні заходи з підвищення надійності. Характеристика легко визначається безпосередньо з результатів випробувань або експлуатаційних даних. За допомогою цієї характеристики можна порівняно легко визначити інші кількісні характеристики надійності [5].

Досвід експлуатації показує, що зміна інтенсивності відмов у часі тривало працюючих систем, до яких відносяться і кабельні лінії зв'язку, ВОЛЗ, відбувається в більшості випадків по характерному закону, представленому на рис. 1.4 [3, 4].

Мала тривалість періоду припрацювання залежить від якості ВОЛЗ і її обслуговування. Вона є перевагою лінії. Інтенсивність відмов ВОЛЗ в період нормальної експлуатації може бути знижена за рахунок якості обслуговування і профілактичних заходів [4].

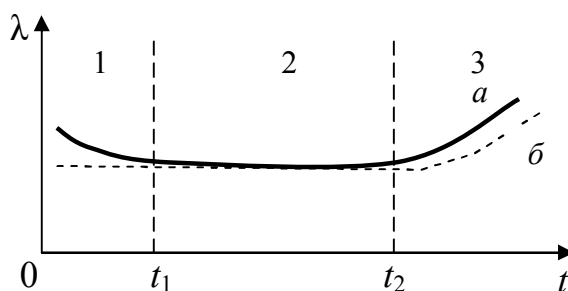


Рисунок 1.4 – Типова крива зміни інтенсивності відмов системи в часі

1.3 Обґрунтування складових забезпечення надійності волоконно-оптичних ліній зв'язку на різних етапах життєвого циклу

Основні складові цієї проблеми можливо представити блок-схемою процесу забезпечення надійності ВОЛЗ, що наведена на рис. 1.5 [3].

Етапами реалізації любого елемента – складової ВОЛЗ для забезпечення її надійності ВОЛЗ під час розробки та постановки на виробництво являється: конструювання, розробка технології виробництва та постановка на виробництво.

Основні складові цієї проблеми можливо представити блок-схемою процесу забезпечення надійності ВОЛЗ (рис. 1.5) [4]. Згідно з ДСТУ [10], доцільно показати розподіл цих складових по стадіям життєвого циклу ВОЛЗ.

В свою чергу, кожна із складових (рис. 1.5) розбивається на низку окремих етапів її реалізації. Наприклад, етапи складової забезпечення надійності ВОЛЗ при розробці і постановці її елементів на виробництво показані на рис. 1.6 [4].

Частина складових забезпечення надійності елементів ВОЛЗ на даному періоді розвитку ВОСП реалізована на базі дотримання вимог існуючої нормативної документації з: проєктування ВОЛЗ та розробки її складових компонентів [3, 19 – 23]; виробництва компонентів ВОЛЗ та її будівництва [3, 12, 23 – 27]; технічної експлуатації [3, 12, 28 – 32].

Аналіз літературних джерел [3, 4, 12, 19 – 32] показав, що не всі етапи складових забезпечення надійності ВОЛЗ (рис. 1.5) розроблені та відтворені у нормативній документації повною мірою, а саме: оптимізація та підвищення ефективності параметрів конструкцій ОК на етапі розробки та проєктування



Рисунок 1.5 – Блок-схема процесу забезпечення надійності ВОЛЗ: 1, 2, 3, 4, 5 – порядок реалізації складових забезпечення надійності

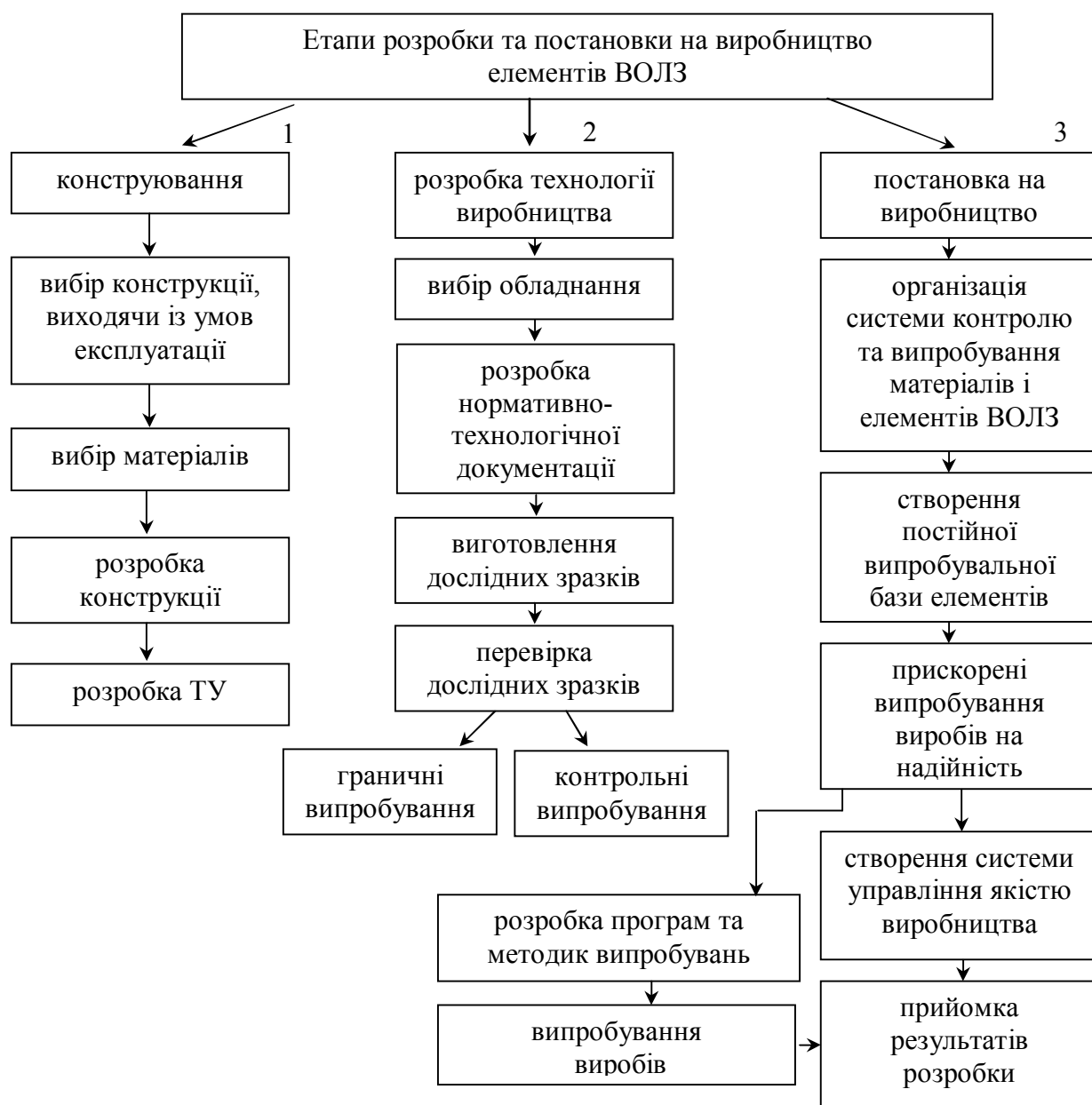


Рисунок 1.6 – Три етапи розробки та постановки на виробництво елементів ВОЛЗ

компонентів ВОЛЗ; систематизація та врахування особливостей фізико-механічних процесів в конструкціях ОК під час виробництва та будівництва ВОЛЗ; обґрунтування методів контролю технічного стану ДСОК на ПВОЛЗ, методів визначення та аналізу експлуатаційних та кількісних показників надійності ВОЛЗ на етапі технічної експлуатації; прогнозування показників надійності елементів та ВОЛЗ у цілому; методів визначення розташування та розподілу по мережі комплектів ЗІП.

Як показує статистика, при експлуатації на підземний кабель впливають всі зовнішні чинники (рис. 1.7), що знижують надійність [4]. З досвіду експлуатації ВОЛЗ, кожний з елементів знаходиться під дією своїх зовнішніх чинників, що впливають на надійність. Тому, проблема розвитку теорії та заходів забезпечення надійності ВОЛЗ та її елементів являється актуальною та вимагає вирішення широкого кола питань.

1.4 Сучасний стан галузі розробки та проектування конструкцій оптичних кабелів

1.4.1 Загальні положення

Розрахунок та конструювання ОК є складною проблемою, що підтверджується вже більшим обсягом публікацій з цього питання [3, 4, 19 – 22, 31 – 45].

Найважливішими принципами конструювання ОК є забезпечення [4]: заданих параметрів якості, в першу чергу, параметрів надійності; стабільності характеристик передавання при впливі на кабель зовнішніх факторів, серед яких, в першу чергу, слід виділити кліматичні та механічні.

У сучасних конструкціях ОК ці принципи, насамперед, реалізуються за рахунок створення відносного запасу (збиткової довжини) оптичного волокна у кабелі, підбору необхідних матеріалів елементів кабелів і розрахунку їх геометричних розмірів [3, 4, 37, 40].



Рисунок 1.7 – Чинники, що впливають на надійність кабелів зв'язку

Задача в забезпеченні конструкцією ОК стійкості до зовнішніх впливових факторів полягає у визначенні деформації її елементів.

Жорсткі вимоги до деформації ОВ і ОК не дозволяють використовувати методи конструювання кабелів зв'язку з металевими жилами, каротажних кабелів та канатів. Відомі дослідження [4], присвячені аналізу напруг у кабелях і канатах, найбільш повно торкалися лінійних задач (для малих деформацій) з абсолютно жорстким у радіальному напрямі осердям.

Як зазначено у [37, 40] для розрахунку ОК необхідно враховувати збільшення поздовжньої деформації кабелю за рахунок радіального переміщення спіральних елементів у цьому напрямку.

Необхідна реакція ОК під час будівництва й експлуатації ВОЛЗ закладається його конструкцією. Для правильного розрахунку конструкції ОК необхідно [4]:

1. Визначити механічні навантаження, що будуть діяти на ОВ.
2. Визначити оптичний відгук ОВ на дію механічного навантаження.

Визначення механічного навантаження, що діє на ОВ, зводиться, у свою чергу, до розрахунків [3, 4]: а) параметрів зовнішніх механічних факторів, що діють на ОК за заданих умов експлуатації кабелю; б) механічної міцності ОК; в) термостабільності конструкції ОК; г) вибору відповідних полімерних матеріалів і елементів конструкції ОК; д) розрахунку поздовжньої та поперечної герметизації кабелю; е) визначення надійності ОК.

Оптичний відгук на дію механічних навантажень вивчено і викладено у цілій серії монографій та публікацій [46 – 50].

У цілому аналіз документів, монографій та публікацій, що регламентують основи конструювання ОК показав, що сьогодні вони є «know how» кожного виробництва. Вони потребують розвитку, в першу чергу, із-за відсутності розгорнутих методик визначення розтягувальних зусиль ОК на базі армуючих елементів різного конструктивного виконання та із різних матеріалів.

У даний час в цілому у ряді країн світу відсутня нормативно-технічна база з конструювання та з оптимізації конструкцій ОК. В першу чергу це відноситься

до регламентації розрахунків: механічної міцності ОК, геометричних розмірів ОК і його елементів, мас ОК і його елементів, повної собівартості та вплив на неї усіх вищезазначених характеристик, оптимізації конструкції ОК в залежності від призначення кабелю та умов експлуатації.

Все викладене вище потребує розвитку теоретичних основ конструювання ОК та розробки нормативно-технічної бази, що регламентує методику розрахунку та оптимізації їх конструкцій.

1.4.2 Аналіз існуючих підходів до розрахунку конструкцій ОК

Конструювання оптичних кабелів є однією з найважливіших задач розвитку сучасної кабельної промисловості. Воно вимагає розробки конструкцій ОК, які одночасно забезпечували б необхідну стійкість до механічних навантажень, що виникають у процесі прокладання, підвішування та їх експлуатації, економічність використання витратних матеріалів та напівфабрикатів на конструктивні елементи і стабільність передавальних характеристик ОК при дії механічних навантажень [51, 52].

Розробка конструкцій ОК передбачає низку розрахунків, серед яких визначальним є розрахунок їх максимально допустимих розтягувальних навантажень. Забезпечення механічної міцності ОК за заданим розтягувальним навантаженням потребує визначення в кабелях допустимих деформацій, внаслідок яких можуть виникати небажані зміни передавальних характеристик ОК (параметрів передачі) [51, 52].

Розробка конструкцій ОК досягається шляхом визначення максимально допустимих розтягувальних навантажень кабелів та відповідності їх значень установленим нормам у технічних умовах на кабель. В першу чергу, за менших розтягувальних зусиллях від нормованого навантаження до ОК кабелю що не прикладається, і, таким чином, забезпечується стабільність їх передавальних характеристик. Відповідність максимально допустимого розтягувального навантаження необхідним значенням в технічних умовах (ТУ) вимагає вибору

оптимальних конструктивних розмірів та матеріалів елементів ОК [51, 52].

На сьогодні розглянуті різні способи визначення механічної міцності конструкцій ОК. Як відомо, в загальному виді величина максимального допустимого розтягувального навантаження, що забезпечується конструкцією кабелю, визначається за виразом [3, 4, 52]:

$$F_{\text{мк}} = \sum_{i=1}^n E_i S_i \varepsilon_{\text{мк}} = \sum_{i=1}^n \sigma_i S_i = \sigma_{\text{фк}} \sum_{i=1}^n S_i, \quad (1.1)$$

де $F_{\text{мк}}$ – максимально допустиме розтягувальне навантаження кабелю, Н; n – кількість елементів оптичного кабелю, без урахування ОВ; E_i , S_i – модуль Юнга, Н/мм², та площа поперечного перетину, мм², i -го елемента кабелю; $\varepsilon_{\text{мк}}$ – максимально допустиме відносне видовження кабелю; σ_i – механічна напруга в i -му елементі кабелю, Н/мм²; $\sigma_{\text{фк}}$ – фіктивна механічна напруга кабелю, Н/мм².

Допустиме розтягувальне навантаження ОК, яке забезпечуються лише силовими елементами (центральною та периферійною, наприклад, у вигляді відповідно склопластикового стержня та арамідних ниток) можливо визначити за виразом, який застосовується на практиці [4, 37, 40]:

$$F_{\text{дк}} = F_{\text{ЦСЕ}} + F_{\text{ПСЕ}} = \varepsilon_{\text{дк}} E_{\text{сп}} S_{\text{ЦСЕ}} + \frac{\varepsilon_{\text{дк}}}{\sin \beta} E_{\text{ан}} S_{\text{ПСЕ}}, \quad (1.2)$$

де $F_{\text{дк}}$ – допустиме розтягувальне навантаження ОК, яке забезпечується лише силовими елементами, Н; $F_{\text{ЦСЕ}}$, $F_{\text{ПСЕ}}$ – розтягувальні навантаження, які можуть бути забезпечені ЦСЕ та ПСЕ відповідно, 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 – кут укладання елементів ПСЕ, рад.

Критерієм для розрахунку максимального розтягувального навантаження ОК є максимально допустиме відносне видовження кабелю. Розрахунок максимального допустимого відносного видовження кабелю проводиться за виразом [3, 4, 37, 40]:

$$\varepsilon_{\text{мк}} = \varepsilon_{\text{дк}} + \varepsilon_{\text{дов}} \text{ ,} \quad (1.3)$$

де $\varepsilon_{\text{мк}}$ – максимально допустиме відносне видовження кабелю; $\varepsilon_{\text{дк}}$ – допустиме відносне видовження кабелю; $\varepsilon_{\text{дов}}$ – допустиме відносне видовження ОВ.

Величини $\varepsilon_{\text{дк}}$ та $\varepsilon_{\text{дов}}$ не дорівнюють одна одній, тому що ОВ в оптичному модулі (ОМ) має деяку надлишкову довжину за рахунок спірального укладання в трубці ОМ за гелікоїдою, отриманою в процесі виготовлення кабелю. Тобто, конструкції ОК повинні передбачати таку надлишкову довжину оптичних волокон, щоб ОВ не підлягали деформаціям до деякого видовження кабелю $\varepsilon_{\text{дк}}$.

Це значення поздовжнього видовження кабелю відповідає умові, коли оптичне волокно розпрямляється в трубці ОМ та втрачає свободу вільного переміщення в ньому. Подальше видовження кабелю допустиме на величину $\varepsilon_{\text{дов}}$, яка може сягати 0,25 % [3, 4, 51, 52].

Величина $\varepsilon_{\text{дк}}$ визначається геометричними параметрами конструкції кабелю, такими як радіус, крок спірального укладання елементів повиву навколо ЦСЕ, величиною повітряного зазору між оптичним волокном або скрутнем ОВ, які знаходяться в трубці ОМ, та внутрішньою поверхнею стінки модуля. Таким чином, змінюючи значення цих трьох геометричних параметрів осердя кабелю можливо одержати необхідну величину видовження кабелю [3, 4, 51, 52].

Розрахунок допустимого відносного видовження кабелю тільки з урахуванням подовження уздовж його осі проводиться за виразом [3, 4, 51]:

$$\varepsilon_{\text{дк}} = -1 + \sqrt{1 + \frac{4\pi^2 R^2}{h^2} \cdot \left(\frac{2\Delta R}{R} \pm \frac{\Delta R^2}{R^2} \right)}, \quad (1.4)$$

де $\varepsilon_{\text{дк}}$ – допустиме відносне видовження кабелю; R , h – радіус та крок спірального укладання елементів осердя навколо ЦСЕ, відповідно, мм; ΔR – повітряний зазор між оптичним волокном або скрутнем ОВ, що знаходяться в трубці ОМ, та внутрішньою поверхнею стінки модуля, мм.

Знак «плюс» у виразі (1.4) у дужках використовується для розрахунку процесу стискання кабелю, а «мінус» – видовження.

Можна зазначити, що величини R та h для ОВ та ОМ є однаковими за

відсутності розтягувальних навантажень (рис. 1.8), оскільки вважається, що у вільному стані ОВ розміщуються в центрі ОМ, і, таким чином, їх осі збігаються.

Згідно з [3, 51], поряд з розтягувальним навантаженням ОК повинен витримувати вплив зміни температури в певних межах, які можливі протягом всього терміну експлуатації.

Зміна температури оточуючого середовища викликає появу сил розтягування або стискання в конструктивних елементах ОК відповідно до їх значень температурного коефіцієнта лінійного розширення (ТКЛР) [53].

Якщо елемент конструкції ОК має додатнє значення ТКЛР, то при підвищенні (зниженні) температури в ньому виникають сили розтягування (стискання). Якщо значення ТКЛР елемента від'ємне, то все відбувається навпаки. Таким чином, якщо в конструкції ОК входять елементи, які мають різні (додатні та від'ємні) значення ТКЛР, то реакція кабелю на зміну температури є складним процесом та потребує детального вивчення [53].

Як зазначалося в [3, 21, 51], ТКЛР матеріалів елементів ОК характеризує відносну зміну його довжини при зміні температури:

$$\varepsilon_k = \frac{\Delta L}{L} = \alpha_0 \Delta T, \quad (1.5)$$

де ε_k – відносна зміна довжини ОК; ΔL – абсолютне видовження ОК, м; L – початкова довжина кабелю, м; α_0 – ТКЛР кабелю, K^{-1} ; ΔT – зміна температури середовища, К.

Як відмічалось раніше, при нормальній температурі навколишнього середовища та відсутності дії розтягувального навантаження на ОК укладене ОВ в трубці ОМ по гелікоїді має довжину більшу за довжину кабелю.

Крім того, ОМ спірально укладається навколо центрального силового елемента ОК з постійним кроком h та радіусом R щодо своєї поздовжньої осі (рис. 1.9). Передбачається, що вільно розташоване волокно або скрутень волокон розташовуються в центрі оптичного модуля (рис. 1.10) і за наявності розтягування кабелю може переміщатися в ньому, змінюючи свій радіус укладання, без погіршення своїх передавальних характеристик. При цьому ОВ

вільно укладається в ОМ, не випробовуючи на собі ніяких механічних дій, тобто видовженні ОВ $\varepsilon_{ОВ} = 0$. Радіус укладання ОВ залежить від діаметрів ЦСЕ та ОМ, а величина повітряного зазору ΔR визначає величину вільного переміщення волокна або скрутня волокон в ОМ при видовженні кабелю [37, 40, 51, 53].

Для забезпечення оптимального видовження конструкцій ОК необхідно вибирати відповідні значення кроку спірального укладання, діаметри ОМ та ЦСЕ, а також кількість оптичних волокон [40].

Як показує практика, оптимальне значення допустимого видовження кабелю $\varepsilon_{дк}$ повинне бути в межах (0,25...1) %, що може бути отримане при різних значеннях діаметрів ЦСЕ та ОМ, кроку спірального укладання ОМ та кількості ОВ в кожному модулі. Таким чином, необхідно вибирати такі оптимальні розміри цих елементів ОК, що забезпечать необхідне максимальне допустиме відносне видовження кабелю при $\varepsilon_{ОВ} = 0$, та одночасно забезпечать менші витрати на матеріали, стабільність передавальних характеристик та задану стійкість ОК до механічних навантажень [37, 40, 53].

Як відомо, ОВ у трубці ОМ можуть вільно переміщатися, а в ненавантаженому стані вважається, що вони розташовуються в центрі оптичного модуля (рис. 1.8) [3, 4, 53].

Вільне переміщення ОВ в трубці ОМ є наслідком його надлишкової довжини в модулі. Ця надлишкова довжина ОВ потрібна для запобігання механічній дії на нього за поздовжнього видовження оптичного кабелю, через те, що при видовженні його елементів виникають механічні навантаження, які можуть прикладатися й до оптичного волокна.

Величина повітряного зазору ΔR (рис. 1.10) між одним або кількома ОВ в трубці ОМ та внутрішньою поверхнею його стінки визначає міру видовження всього ОК, $\varepsilon_{дк}$. Величина повітряного зазору ΔR , у свою чергу, залежить від кількості оптичних волокон, $n_{ОВ}$, та діаметра ОМ, в якому ці ОВ розміщаються.

При зменшенні повітряного зазору ΔR з'являється обмеження вільного пересування ОВ в трубці ОМ діаметром, $d_{ОМ}$, що зменшує величину видовження ОК. При збільшенні повітряного зазору все відбувається навпаки.

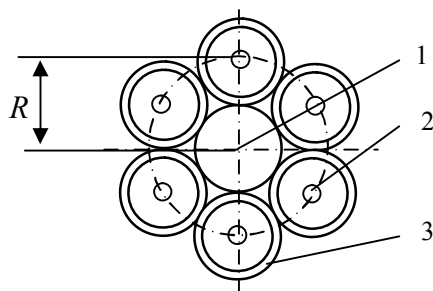


Рисунок 1.8 – Положення спірально розташованого ОВ у трубці ОМ кабелю за відсутності навантажень: 1 – ЦСЕ; 2 – ОВ; 3 – трубка ОМ

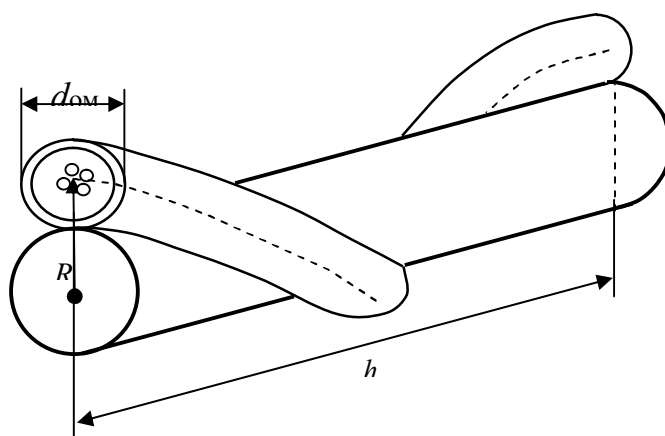


Рисунок 1.9 – Спіральне укладання трубки оптичного модуля навколо ЦСЕ

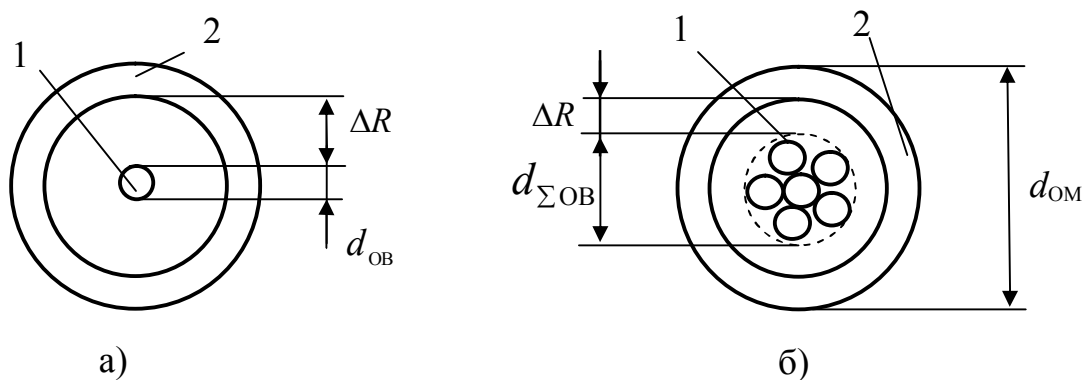


Рисунок 1.10 – Розташування вільноукладених оптичних волокон в центрі трубки ОМ: одне ОВ, а); скрутень оптичних волокон, б): 1 – ОВ; 2 – трубка ОМ

Крім того, надлишкова довжина ОВ в ОК залежить від кроку спірального укладання оптичних модулів, h , в його осерді. Отже, для оптимального конструювання та визначення зв'язку між параметрами структури кабелів та їх механічною міцністю (величиною $F_{\text{дк}}$) необхідно дослідити залежність $\varepsilon_{\text{дк}} = f(d_{\text{ом}}, \Delta R, h)$ [37, 40, 53].

Усе вищезазначене створює, в першу чергу, необхідність в дослідженні у вибраній моделі конструкції кабелю залежностей між кількістю ОВ в ОМ, його діаметром і величиною видовження ОК.

Як відомо, розрахунок $\varepsilon_{\text{дк}}$ в залежності від радіуса та кроку спірального укладання ОМ в осердя кабелю та величини повітряного зазору між стінкою модуля й усіма ОВ можна визначити за виразом (1.4). Максимально допустиме відносне видовження ОК можна визначити за виразом (1.3) [37, 40, 53].

Величина повітряного зазору між внутрішньою поверхнею стінки трубки ОМ та усіма ОВ як видно з рис. 1.10, визначаються за виразом [53]:

$$\Delta R = \frac{d_{\text{ом}} - 2\Delta t_{\text{ом}} - d_{\Sigma\text{ОВ}}}{2}, \quad (1.6)$$

де ΔR – повітряний зазор між внутрішньою поверхнею стінки трубки модуля та усіма ОВ, мм; $d_{\text{ом}}$ – зовнішній діаметр ОМ, мм; $\Delta t_{\text{ом}}$ – радіальна товщина стінки трубки ОМ, мм; $d_{\Sigma\text{ОВ}}$ – діаметр джгута оптичних волокон в ОМ, мм.

Радіус укладання R елементів осердя ОК визначається за виразом [53]:

$$R = \frac{d_{\text{ЦСЕ}} + d_{\text{ом}}}{2}, \quad (1.7)$$

де R – радіус укладання елементів осердя ОК, мм; $d_{\text{ЦСЕ}}$ – діаметр ЦСЕ, мм; $d_{\text{ом}}$ – зовнішній діаметр трубки ОМ, мм;

Величина радіуса укладання ОМ, як видно з (1.7), змінюється в залежності від його діаметра та діаметра ЦСЕ. Останній, згідно з [53], залежить від кількості ОМ (елементів) у повиві вибраної до розробки моделі конструкції кабелю.

Отже, радіус спірального укладання ОМ в осердя ОК за кількістю ОМ (або ЗЕ) в одноповивній конструкції кабелю можливо визначити за виразом [53]:

$$R = \frac{d_{\text{OM}} \cdot k}{2}, \quad (1.8)$$

де R – радіус спірального укладання ОМ в осерді ОК, мм; d_{OM} – діаметр оптичного модуля, мм; k – коефіцієнт, що враховує кількість елементів в одноповивній моделі ОК.

Враховуючи [51, 53], цей коефіцієнт можливо визначити для різної кількості елементів у повиві ОК виходячи із прямопропорційної залежності $d_{\text{ЦСЕ}}$ від d_{OM} . Результати розрахунку коефіцієнта k при кількості елементів у повиві ОК від 3 до 12 наведені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Значення коефіцієнта k , який враховує кількість елементів в одноповивній моделі ОК

Кількість елементів у повиві	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Значення коефіцієнта k	1,155	1,414	1,701	2,000	2,305	2,613	2,924	3,236	3,549	3,864

Отже, виходячи з (1.3), (1.6) та (1.8), можна показати залежність між величиною допустимого відносного видовження ОК та параметрами h , d_{OM} , Δt_{OM} , d_{SOB} і k [53]:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{\text{дк}} &= -1 + \sqrt{1 + \frac{4 \cdot \pi^2}{h^2} \cdot (d_{\text{OM}} k \Delta R - \Delta R^2)}, \\ \varepsilon_{\text{дк}} &= -1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi}{h}\right)^2 \frac{d_{\text{OM}} - 2\Delta t_{\text{OM}} - d_{\text{SOB}}}{2} \cdot \left(d_{\text{OM}} k - \frac{d_{\text{OM}} - 2\Delta t_{\text{OM}} - d_{\text{SOB}}}{2}\right)}. \end{aligned} \right\} \quad (1.9)$$

де $\varepsilon_{\text{дк}}$ – максимальне допустиме видовження ОК; h – крок спірального укладання ОМ в осерді кабелю, мм; d_{OM} – діаметр оптичного модуля, мм; d_{SOB} – діаметр скрутня оптичних волокон в трубці ОМ, мм; k – коефіцієнт, що враховує кількість елементів в одноповивній моделі ОК; ΔR – повітряний зазор між внутрішньою поверхнею стінки трубки ОМ та усіма ОВ, мм; Δt_{OM} – радіальна

товщина стінки трубки ОМ, мм.

Тоді, за необхідності вибору діаметра ОМ потрібно задатися моделлю конструкції одноповивного кабелю: кількістю ОВ та елементів у повиві (ОМ або ЗЕ), кроком спірального укладання елементів навколо ЦСЕ, товщиною трубки ОМ та відносним видовженням кабелю, за якого ОВ втрачає свободу переміщення в трубці та не підлягає дії розтягувального навантаження [37, 53].

Для дослідження залежності $\varepsilon_{\text{дк}} = f(d_{\text{ОМ}}, \Delta R, h)$ необхідно проаналізувати межі допустимих значень кожного параметра, що входять в (1.9). З урахуванням цього та даних характеристик сучасних ОК параметри, які входять в (1.9), мають наступні межі своїх значень у конструкціях сучасних кабелів (табл. 1.3) [53].

Таблиця 1.3 – Межі допустимих значень параметрів в конструкціях виразу (1.9) $h, d_{\text{ОМ}}, \Delta t_{\text{ОМ}}, d_{\Sigma \text{ОВ}}, k$

№ з/п	Параметр	Межі допустимих значень
1	Крок спірального укладання ОМ h , мм	80...120
2	Діаметр ОМ, $d_{\text{ОМ}}$, мм	1,8...3,0
3	Товщина стінки ОМ, $\Delta t_{\text{ОМ}}$, мм	(0,15...0,20) $d_{\text{ОМ}}$
4	Діаметр джгута ОВ, $d_{\Sigma \text{ОВ}}$, мм	0,51...1,53
5	Коефіцієнт, k	1,155...3,864

Товщина стінки ОМ, зазвичай, становить (15...20) % від його діаметра. Для розрахунків конструкції багатомодульних ОК товщина стінки модуля діаметром до 3 мм приймалась 15 %, а в кабелях з діаметром ОМ понад 3 мм – 20 % [53].

Діаметр скрутня ОВ, $d_{\Sigma \text{ОВ}}$, в ОМ можна визначити, знаючи їх кількість у центральному та першому шарі за аналогією розрахунку діаметра повиву пар електричного кабелю [53].

В центрі скрутня ОВ можуть розміщуватися $n = (1...5)$ оптичних волокон.

Діаметр центрального шару ОВ при $n \neq 1$ можна визначити за виразом [53]:

$$d_{\text{ц}} = d_{\text{ОВ}} \left(1 + \frac{1}{\sin\left(\frac{\pi}{n_{\text{ОВ}}}\right)} \right), \quad (1.10)$$

де $d_{\text{ц}}$ – діаметр центрального шару оптичних волокон, мм; $d_{\text{ОВ}}$ – діаметр ОВ у захисному покритті, мм; $n_{\text{ОВ}}$ – кількість ОВ, шт.

Виняток становить випадок, коли $n_{\text{ОВ}} = 1$, тоді $d_{\text{ц}} = d_{\text{ОВ}}$.

Знаючи кількість ОВ у центрі скрутня, можна визначити їх кількість у наступних шарах, що знаходяться навколо центрального шару ОВ. Так, якщо в центрі скрутня є m ОВ, то в наступному шарі згідно з законом «правильного» скручення буде $(m + 6)$ ОВ, тобто в кожному наступному шарі кількість ОВ збільшується на 6 порівняно з попереднім. Винятком є перший шар з одним ОВ. Тоді в першому шарі збільшення буде не на 6, а на 5 ОВ [37, 53].

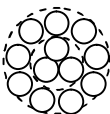
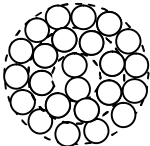
Як відомо з [54] урахуванням світового досвіду провідних фірм-виробників багатомодульних ОК діаметр ОМ, як правило, може складати від 1,2 мм до 3 мм, а кількість ОВ, які можна розміщати в них, до 24 [20].

Загальний діаметр ОВ в захисному пофарбованому покритті становить 255 мкм [19, 20]. Використовуючи (1.10) в [51] були одержані вирази для розрахунку $d_{\text{сОВ}}$ та його значення при $n_{\text{ОВ}}$ від 2 до 24 (табл. 1.4).

Одержаний вираз (1.9) показує зв'язок між $\varepsilon_{\text{дк}}$ та параметрами конструкції осердя кабелів (діаметром та товщиною стінки ОМ, кількістю ОВ в одному модулі, кроком спірального укладання та кількістю елементів повиву).

Таким чином, використовуючи даний підхід та необхідне значення відносного видовження ОК, за якого вони здатні витримувати поздовжні навантаження в конкретній кліматичній зоні експлуатації, можливо проводити оптимальний підбір елементів осердя та їх параметрів з метою забезпечення меншої матеріаломісткості та собівартості кабелів [53].

Таблиця 1.4 – Розрахункові формули діаметра скрутня ОВ $d_{\Sigma \text{ОВ}}$ в залежності від їх кількості в кабелі

№ з/п	Кількість ОВ в кабелі	Загальний вид розміщення ОВ	Розміщення ОВ у скрутні			Формула розрахунку діаметра скрутня ОВ, $d_{\Sigma \text{ОВ}}$, мм, для діаметра ОВ $d_{\text{ОВ}} =$ $= 255$ мкм	$d_{\Sigma \text{ОВ}}$, мм (для $d_{\text{ОВ}} =$ $= 255$ мкм)
			у центрі	у I шарі	у II шарі		
1	2		2	–	–	$d_{\text{ОВ}} \left(1 + \frac{1}{\sin\left(\frac{\pi}{2}\right)} \right)$	0,510
2	4		4	–	–	$d_{\text{ОВ}} \left(1 + \frac{1}{\sin\left(\frac{\pi}{4}\right)} \right)$	0,615
3	6		1	5	–	$d_{\text{ОВ}} \left(1 + \frac{1}{\sin\left(\frac{\pi}{6}\right)} \right)$	0,765
4	12		3	9	–	$d_{\text{ОВ}} \left(3 + \frac{1}{\sin\left(\frac{\pi}{3}\right)} \right)$	1,059
5	24		2	8	14	$d_{\text{ОВ}} \left(5 + \frac{1}{\sin\left(\frac{\pi}{2}\right)} \right)$	1,530

1.5 Розвиток та обґрунтування теорії забезпечення надійності на етапах проєктування ВОЛЗ та її компонентів

1.5.1 Загальні рекомендації щодо забезпечення надійності ліній зв'язку ВОСП при їх проєктуванні

Забезпечення надійності ВОЛЗ та її складових на етапі проєктування залежить від вирішення цілого ряду задач. Лінійні споруди ВОЛЗ є найбільш капіталоємними та вимагають великої кількості будівельного і обслуговуючого персоналу.

Правильний вибір типу і конструкції лінії дозволяє найбільш ефективно використовувати капіталовкладення, здешевити будівництво та знизити експлуатаційні витрати на утримання мережі. Він повинен виконуватися на основі техніко-економічних розрахунків з урахуванням початкових затрат на будівництво так і наступних затрат на утримання лінії.

Особливе місце при проєктуванні ВОЛЗ займає забезпечення надійності лінійних споруд та їх компонентів.

Згідно до розвитку теорії та практики забезпечення надійності на етапі проєктування ВОЛЗ, приведених в роботі [4], показано, що у складі вихідних даних для цього повинні бути вимоги до показників надійності.

На першому етапі проєктування рекомендується виконання техніко-економічного обґрунтування варіантів реалізації схеми зв'язку (проєкту), для чого потрібно виконувати [4, 5, 14]: визначення складу обладнання і протяжності кабелю, задіяних у проєкті; розрахунки довжин регенераційних або підсилювальних ділянок; розрахунок та проєктування показників надійності; розрахунок запасів ЗІП та їх розподіл; оцінку техніко-економічної ефективності реалізації проєкту.

З метою скорочення витрат на будівництво та експлуатацію ВОЛЗ і забезпечення її високої надійності на етапі проєктування необхідно за вишукувальними роботами вибрати найбільш доцільний та економічний варіант

траси, що забезпечить [4]: найменшу довжину, віддалення від доріг, кількість переходів (шосе і залізниць та перешкод), прийнятні ґрунтові умови, доречність будівництва та експлуатації; найменший обсяг робіт при будівництві та експлуатації, можливість забезпечення використання механізмів, максимальну віддаленість від джерел блукаючих струмів (електрифікованих залізниць, метрополітену, трамвая і несиметричних високовольтних ліній); розташування ВОЛЗ паралельно шосейним і ґрунтовим дорогам та дотримання допустимої відстані між нею та іншими наземними та підземними спорудами.

З метою підвищення надійності, зменшення експлуатаційних та капітальних витрат, пов'язаних з розвитком ВОЛЗ та ВОСП у цілому на перспективу рекомендується орієнтуватися на [4]: використання ОК тільки з одномодовими оптичними волокнами, навіть і на ділянках мереж з малою пропускнуою здатністю; використання ОК з резервними ОВ; використання більш високошвидкісної апаратури лінійного тракту (на один або два вищі рівні СТМ-*N* в ЦСП СЦІ) порівняно з вихідними даними в частині пропускнуої здатності, що вимагається.

Використання ОК з резервними ОВ забезпечує [4, 5]:

а) запас пропускнуої здатності ВОЛЗ на перспективу розвитку, так званий просторовий спосіб ущільнення інформації;

б) ефективне використання резервних ОВ для збільшення надійності функціонування ВОЛЗ. При цьому резервні ОВ можна використовувати для:

1) заміни робочих волокон, якщо значення їхніх параметрів вийшли за межі допустимих значень за рахунок прокладання або експлуатації ОК;

2) організації перемикання на резервний лінійний тракт для ВОСП ПЦІ або на резервну мультиплексну секцію для ВОСП СЦІ;

3) визначення та локалізації причин поступового розвитку відмов без перерви зв'язку підключенням оптичного рефлектометра до резервних ОВ, якщо причини є загальними для всіх ОВ у ОК (наприклад, при пошкодженні муфт, через зсув ґрунту та ін.), при цьому збільшення числа цих ОВ у ОК у 10 разів приводить до збільшення витрат на споруди ВОСП усього до 20 % [4].

Доцільність використання більш високошвидкісної апаратури із здатністю лінійного тракту порівняно з пропускною здатністю, що потребується, приводить до збільшення витрат у цілому на будівництво ВОСП усього на $(0,5 \dots 1,0) \%$. Це дає великий виграш за необхідності збільшення швидкості передавання у перспективі без додаткових витрат і переривання зв'язку [4].

1.5.2 Методика розрахунку та проєктування показників надійності ліній зв'язку ВОСП

У даному підрозділі розроблено методику розрахунку та проєктування показників надійності ВОЛЗ. В ній приведені основні вимоги та послідовність щодо розрахунку показників надійності ВОЛЗ. Особлива увага приділена практичним рекомендаціям з мінімізації ризику відмов ВОЛЗ та забезпечення норм її показників надійності.

1.5.2.1 Основні вимоги щодо розрахунку та проєктування показників надійності ліній зв'язку ВОСП

В процесі проєктування ліній зв'язку та ВОСП у цілому повинні бути [4]:

- задані вимоги щодо забезпечення надійності (коефіцієнт готовності, термін служби та середній час відновлення);
- згідно до [4, 8] проведена оцінка показників надійності на відповідність заданим вимогам, шляхом побудови структурної схеми надійності та розрахунків коефіцієнта готовності K_r^p (з урахуванням резервування) і середнього часу відновлення зв'язку $t_{счвз}^{п(б)}$ (з перервою та без перерви зв'язку) за вихідними даними про надійність складових частин обладнання постачальника;
- визначені вимоги до організації технічного обслуговування та ремонту за допомогою засобів відновлення ЗІП апаратури та обладнання ВОСП [4];
- у відповідності з [4, 28, 29] установлені і записані в угоді на постачання обладнання умови післягарантійного обслуговування та ремонту апаратури та

обладнання протягом терміну служби, установленого в угоді, ТУ або інших документах на обладнання;

– виконано техніко-економічне обґрунтування варіантів після гарантійного обслуговування та ремонту загальної кількості апаратури, передбачених угодою, та проведено вибір системи забезпечення відновлення апаратури за допомогою ЗІП, для чого: а) проводиться розрахунок кількості зон обслуговування ЗІП апаратури ВОСП для заданого $t_{\text{счвз}}^{п(б)}$ і місць розміщення ЗІП; б) у відповідності з [4] визначається склад ЗІП для апаратури та обладнання кожної зони обслуговування за такими вихідними даними, які надаються постачальником:

- склад обладнання, для якого повинен бути визначений ЗІП (різні типи кабелю, муфт, замірних стовпчиків та інше);
- нормативні (розрахункові) показники безвідмовності складових обладнання, для якого визначаються ЗІП;
- період поновлення запасних частин для розрахунку складу обладнання ЗІП;
- вартість складових обладнання при постачанні ЗІП (для оптимізації складу запчастин щодо вартості).

При проєктуванні ліній зв'язку ВОСП задача забезпечення необхідної якості функціонування може бути вирішена при досягненні норми комплексного показника надійності – коефіцієнта готовності за виразом [4]:

$$K_{\text{кг}L} = \frac{T_{0\text{p}L}}{T_{0\text{p}L} + t_{\text{счвз}}^{п(б)}}, \quad (1.11)$$

де $K_{\text{кг}L}$ – комплексний показник надійності ліній зв'язку ВОСП довжиною L ; $T_{0\text{p}L}$ – середній час напрацювання на відмову ЛЗ ВОСП довжиною L , год; $t_{\text{счвз}}^{п(б)}$ – середній час відновлення зв'язку та елементів лінійних споруд на довжині лінії, км, L , год.

Норми цього коефіцієнта досягається за рахунок різних способів резервування і (або) зменшення середнього часу відновлення (пошкоджень з перервою та без перерви зв'язку), оптимізацією організації технічної експлуатації.

Як показано в [4], розв'язання задачі з оптимізації щодо критерію надійності частіше використовується коефіцієнт простою лінії зв'язку ВОСП:

$$K_{\Pi} = \frac{\Lambda \cdot t_{\text{счвз}}^{\Pi}}{1 + \Lambda \cdot t_{\text{счвз}}^{\Pi}}, \quad (1.12)$$

де K_{Π} – коефіцієнт простою ЛЗ ВОСП; Λ – параметр потоку відмов для періоду нормальної експлуатації, 1/год; $t_{\text{счвз}}^{\Pi}$ – середній час відновлення (пошкоджень з перервою) зв'язку, год.

Згідно до [4] послідовно з'єднанні елементів лінії зв'язку ВОСП дають можливість визначити сумарні коефіцієнти готовності та простою за виразами:

$$K_{\Gamma\Sigma} \approx \prod_{i=1}^n K_{\Gamma i}; \quad K_{\Pi\Sigma} \approx \sum_{i=1}^n K_{\Pi i}, \quad (1.13)$$

де $K_{\Gamma\Sigma}$ – сумарний коефіцієнт готовності лінії зв'язку ВОСП; n, i – кількість та порядковий номер елементів лінії зв'язку ВОСП; $\prod_{i=1}^n$ – символ множення співмножників; $K_{\Gamma i}$ – коефіцієнт готовності окремого елемента лінії зв'язку ВОСП; $K_{\Pi\Sigma}$ – сумарний коефіцієнт простою елементів лінії зв'язку ВОСП; $\sum_{i=1}^n$ – символ складання складових; $K_{\Pi i}$ – коефіцієнт простою окремого елемента лінії зв'язку ВОСП.

У сучасних ВОСП крім загального резервування з метою підвищення надійності широко використовується структурне резервування щодо окремих блоків апаратури і ділянок лінії (мультиплексних секцій).

Згідно до [4] коефіцієнт простою елемента лінії зв'язку ВОСП визначається при схемі резервування 1:n без урахування інтенсивності відмов обладнання перемикавання на резерв за виразом:

$$K_{\Pi 0} \approx K_{\Pi}^n, \quad (1.14)$$

де $K_{\Pi 0}$ – коефіцієнт простою без урахування інтенсивності відмов обладнання перемикавання на резерв; K_{Π}^n – коефіцієнт простою складових елемента резервування лінії зв'язку ВОСП; n – кількість складових елемента резервування.

Оптимізація резервування за схемою роздільного резервування має перевагу над схемою загального резервування, тому, що величина надійності лінії зв'язку ВОСП зі зростанням кратності резервування більш стрімко зростає. Крім того, в цій схемі за необхідності можливо використовувати різну кратність резервування у кожного елемента лінії зв'язку ВОСП: окремий блок (типовий елемент заміни) в апаратурі, ділянка лінії або мережного тракту, мультиплексна секція, тракт віртуального контейнера, ділянка мережі електрозв'язку.

Згідно до [4] оптимізація структури полягає у визначенні оптимального складу резерву лінії зв'язку ВОСП, тобто визначенні вектора його складу:

$$X_{\text{опт}} \in X = (X_1, X_2, \dots, X_n), \quad (1.15)$$

де $X_{\text{опт}}$ – оптимальний склад резерву лінії зв'язку ВОСП; X_i – кількість резервних елементів в i -й підсистемі схеми роздільного резервування лінії зв'язку ВОСП; $i = 1, \dots, n$.

Взагалі можливі дві задачі оптимізації резерву лінії зв'язку ВОСП – пряма та зворотна. В прямій задачі резервування лінії зв'язку ВОСП знаходять оптимальний склад резервних елементів $x = x_{\text{опт}}$, за якого досягається значення надійності об'єкта, що вимагається $R(x_{\text{опт}}) \geq R_{\text{вим}}$ за мінімальної вартості резерву:

$$C(x_{\text{опт}}) = \min C(x), \quad x_{\text{опт}} \in x. \quad (1.16)$$

де $C(x_{\text{опт}})$ – вартість оптимального складу резерву лінії зв'язку ВОСП; $\min C(x)$ – мінімальна вартість резерву лінії зв'язку ВОСП.

У зворотній задачі знаходять $x_{\text{опт}}$, за якого досягається найбільша надійність [4]:

$$R(x_{\text{опт}}) = \max R(x), \quad x_{\text{опт}} \in x, \quad (1.17)$$

де $R(x_{\text{опт}})$ – оптимальна надійність лінії зв'язку ВОСП; $\max R(x)$ – максимальна надійність лінії зв'язку ВОСП.

При вирішенні зворотної задачі оптимізації складу резервних елементів ОТЕ $x_{\text{опт}}$ знаходиться при умові, що вартість резерву не перевищує його допустиму вартість, тобто значення $C(x_{\text{опт}}) \leq C_{\text{доп}}$. Як правило, структура резерву оптимізується досягненням значення надійності, що вимагається за мінімальної

вартості навантаженого резерву. Це і є пряма задача оптимізації.

Якщо лінія зв'язку ВОСП складається із високонадійних елементів, оптимальне число резервних елементів x_i в i -й підсистемі схеми роздільного резервування визначається як [4]:

$$x_i = \frac{\lg Q_{i_0}(x_i)}{\lg q_i} - 1 = \frac{\lg \frac{Q_{\text{доп}} C_i}{\sum_{i=1}^n C_i}}{\lg q_i} - 1, \quad (1.18)$$

де x_i – оптимальне число резервних елементів в i -й підсистемі схеми роздільного резервування; $Q_{i_0}(x_i)$ – величина ненадійності оптимального числа резервних елементів лінії зв'язку ВОСП в i -й підсистемі схеми роздільного резервування; q_i – ненадійність (ймовірність відмови або коефіцієнт простою) i -го елемента лінії зв'язку ВОСП; C_i – вартість i -го елемента лінії зв'язку ВОСП; $Q_{\text{доп}}$ – допустима величина ненадійності об'єкта.

Допустима величина ненадійності об'єкта визначається за виразом:

$$Q_{\text{доп}} = 1 - R_{\text{вим}}, \quad (1.19)$$

де $Q_{\text{доп}}$ – допустима величина ненадійності об'єкта; $R_{\text{вим}}$ – значення надійності, що вимагається (ймовірність безвідмовної роботи або коефіцієнт готовності) лінії зв'язку ВОСП.

Можливості останніх поколінь ВОСП на базі СЦІ здійснюють резервування підсистеми з'єднання, коли використовується резерв по пропускній здатності. В даному випадку це дозволяє програмно здійснювати введення графіка обходів та замін, при чому на кожній ділянці мережі можлива оцінка поточного стану навантаження і якості передавання в окремих інформаційних структурах. Особливо ефективний спосіб резервування підсистем з'єднанням у «кільцевих» структурах зв'язку. З метою реалізації цього способу у складі технічних засобів лінії зв'язку або мережі в цілому використовується обладнання з більш високою швидкістю передавання. Тому оптимізація структури резерву по мережі (або її ділянці) для схеми окремого резервування здійснюється за критерієм найбільшої надійності при існуючих затратах (зворотна задача

оптимізації).

Вимоги щодо розрахунку та проєктування показників параметрів надійності ВОСП. Однією із найважливіших особливостей при проєктуванні ВОЛЗ і мереж СЦІ є те, що серед критеріїв, за якими проводиться оптимізація схеми організації зв'язку (вибору варіанта проєкту), на перше місце виходить необхідна величина комплексного показника надійності – коефіцієнта її готовності (або допустима величина), тобто необхідна якість функціонування мережі в процесі експлуатації [4]. Це обумовлено: 1) більш жорсткими діючими нормами на параметри цифрових каналів і трактів, які організуються на сучасних засобах електрозв'язку; 2) потенційно більшою проєктною здатністю транспортної мережі, що організується на основі ВОСП СЦІ.

Показники надійності, що необхідні для транспортних електронних комунікаційних мереж зв'язку з максимальною протяжністю L_m , в будь-якій країні, повинні відповідати міжнародним нормованим показникам.

Згідно з МСЕ-Т G.602 [59] готовність каналу тональної частоти – основного цифрового каналу (ОЦК) нормується на еталонному гіпотетичному колі системи передачі довжиною $L_m = 2500$ км в одному напрямку (з урахуванням резервування). При цьому значення коефіцієнта готовності повинно бути не менше 0,996.

Згідно з [4] коефіцієнт готовності, що вимагається, на ВОЛЗ довжиною L може бути розрахованим за виразом:

$$K_{\text{гвим}} = \left(K_{\text{гнорм}} \right)^{\frac{L}{L_m}}, \quad (1.20)$$

де $K_{\text{гвим}}$ – коефіцієнт готовності, що вимагається на кабельній лінії довжиною L , км; $K_{\text{гнорм}}$ – норма коефіцієнта готовності на еталонному гіпотетичному колі довжиною L_m , км; L – довжина кабельної лінії зв'язку транспортної електронної комунікаційної мережі, км.

При високій надійності сучасної апаратури цифрової системи передавання (ЦСП) згідно з [4], можливо прийняти значення коефіцієнта готовності кабельної лінії 0,985, а апаратури 0,995. Тоді на ВОЛЗ повинні забезпечуватися такі

показники: середній час між відмовами – не менше 340,5 год; середній час відновлення (пошкоджень з перервою) зв'язку не більше за 5,2 год; щільність відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку – не більше за 0,1823, а час відновлення (год) обладнання лінійного тракту складається для: необслуговуваного регенераційного пункта (НРП) або необслуговуваного підсилювального пункта (НПП) $\leq 2,5$ (у тому числі час під'їзду 2 год); обслуговуваного регенераційного пункта (ОРП) або обслуговуваного підсилювального пункта (ОПП), $КП \leq 0,5$; $ОК \leq 10$ (у тому числі час під'їзду 3,5 год).

Основні розрахункові співвідношення визначення параметрів надійності ліній зв'язку ВОСП. За існуючої стратегії відновлення, що починається з моменту виявлення відмови (аварії), коефіцієнт готовності визначається за виразом [4]:

$$K_{rL} = \frac{T_{0pL}}{T_{0pL} + t_{счвз}^п}, \quad (1.21)$$

де K_{rL} – коефіцієнт готовності лінії довжиною L ; T_{0pL} – середній час між відмовами лінії зв'язку ВОСП, год; $t_{счвз}^п$ – середній час відновлення зв'язку, год.

В свою чергу, коефіцієнт простою визначається за формулою [4]:

$$K_{пL} = \frac{\Lambda \cdot t_{счвз}^п}{1 + \Lambda \cdot t_{счвз}^п}, \quad (1.22)$$

де $K_{пL}$ – коефіцієнт простою лінії довжиною L ; Λ – параметр потоку відмов для періоду нормальної експлуатації лінії зв'язку ВОСП, 1/год; $t_{счвз}^п$ – середній час відновлення зв'язку (пошкодження з перервою зв'язку), год.

За довжини каналу ВОСП, що не дорівнює довжині еталонного гіпотетичного кола, середній час між відмовами, що вимагається, визначається як [4]:

$$T_{0pL_{вим}}(L) = T_{0pн} \frac{L_{м}}{L}, \quad (1.23)$$

де $T_{0pL_{вим}}(L)$ – середній час між відмовами, що вимагається, на лінії довжиною L , год; $T_{0pн}$ – нормований середній час між відмовами, год; $L_{м}$ – довжина еталонного гіпотетичного кола ($L_{м} = 2500$ км), км; L – довжина кабельної лінії зв'язку ТЕКМ,

км.

Середній час між відмовами мережних трактів N -го порядку, що вимагається, по відношенню до середнього часу між відмовами ОЦК визначається як [4]:

$$T_{0p\text{вим}}(N) = \frac{T_{0pн(ОЦК)}}{0,95^N}, \quad (1.24)$$

де $T_{0p\text{вим}}(N)$ – середній час між відмовами, що вимагається, мережних трактів N -го порядку, год; $T_{0pн(ОЦК)}$ – середній час між відмовами ОЦК, год; N – номер порядку мережних трактів.

При резервуванні лінійних споруд ВОСП на мережах SDH з топологією «точка-точка» коефіцієнт простою системи передавання при паралельному з'єднанні по надійності її елементів з однаковими коефіцієнтами простою при резервуванні за схемою $n + m$ буде дорівнювати [4]:

$$K_{п}^p = \frac{n + m}{n!(m + 1)!} K_{п}^{m+1} + \frac{n}{n + m} \cdot \frac{\lambda_p}{(n + m) \cdot \lambda_0 + \lambda_p}, \quad (1.25)$$

де $K_{п}^p$ – коефіцієнт простою при резервуванні за схемою $n + m$; n – число робочих елементів; m – число резервних елементів; λ_0 – інтенсивність відмов одного елемента системи передавання; λ_p – інтенсивність відмов обладнання перемикачів на резерв; $K_{п}$ – коефіцієнт простою резервного елемента.

При резервуванні для «кільцевої» структури зв'язку, тобто коли $\lambda_p = 0$ і $n = m = 1$, коефіцієнт простою лінії зв'язку ВОСП буде дорівнювати:

$$K_{п}^p = K_{п}^2, \quad (1.26)$$

де $K_{п}^p$ – коефіцієнт простою лінії ВОСП при резервуванні «кільцевою» структурою зв'язку; $K_{п}$ – коефіцієнт простою елемента резервування лінії зв'язку ВОСП.

Для послідовного з'єднання по надійності елементів лінії зв'язку ВОСП (наприклад, ділянок кабельної лінії зв'язку або окремих видів обладнання) сумарні коефіцієнти простою та готовності визначаються за формулами [4]:

$$K_{\Sigma} \approx \sum_{i=1}^n K_{\Pi_i} ; \quad K_{\Gamma\Sigma} \approx \prod_{i=1}^n K_{\Gamma_i} , \quad (1.27)$$

де K_{Σ} – сумарний коефіцієнт простою лінії зв'язку ВОСП; K_{Π_i} – коефіцієнт простою окремих елементів лінії зв'язку ВОСП, що визначається з (1.13); $K_{\Gamma\Sigma}$ – сумарний коефіцієнт готовності лінії зв'язку ВОСП, що визначається з (1.13); K_{Γ_i} – коефіцієнт готовності окремих елементів лінії зв'язку ВОСП; $\sum_{i=1}^n$ – символ складання доданків; $\prod_{i=1}^n$ – символ множення співмножників.

У випадку експлуатації лінійних споруд ВОСП на основі оптимальної стратегії відновлення, що починається з визначення попередвідмовного стану її елементів, необхідно в інженерних розрахунках показників надійності K_{Π} використати замість виразу (1.13), вираз виду:

$$K_{\Pi} \approx \frac{\Lambda \cdot (t_{\text{счвз}}^{\Pi} - 0,7 \cdot t_1)}{1 + \Lambda \cdot t_{\text{счвз}}^{\Pi}} , \quad (1.28)$$

де Λ – параметр потоку відмов, 1/год; $t_{\text{счвз}}^{\Pi}$ – середній час відновлення зв'язку, год; t_1 – час під'їзду до місця пошкодження лінійних споруд ВОСП, год.

1.5.2.2 Порядок розрахунку показників надійності при проєктуванні ліній зв'язку ВОСП

На основі вихідних даних для розрахунку параметрів надійності лінійних споруд ВОСП порядок проєктування показників їх надійності можливо виразити у вигляді:

а) за даними характеристик надійності окремих компонентів ліній зв'язку або ВОСП у цілому обчислюються сумарні показники надійності. Для цього використовуються вирази (1.13), (1.20), (1.22), (1.23);

б) на основі норм надійності каналів і обладнання лінійного тракту ВОСП, що діють на еталонному гіпотетичному колі довжиною L_m , підраховуються значення параметрів надійності, що визначаються на довжині проєктованої

ВОЛЗ довжиною $L_{\text{проект}}$;

в) характеристики надійності: інтенсивності відмов (пошкоджень з перервою зв'язку) та середнього часу відновлення зв'язку, наприклад, компонентів кабельних ліній (ОК, муфт та кінцевих пристроїв), слід брати з їх ТУ. Характеристики їх надійності (λ та $t_{\text{счвз}}^{\text{п}}$) необхідно визначати на базі даних статистичних показників цих параметрів [4], одержаних з аналогічних діючих ліній ТЕКМ зв'язку країни, отриманих в 2001...2005 роках (табл. 1.5). Значення інтенсивності відмов на 1 км траси ($\lambda \cdot 10^{-7}$, 1/год) та середнього часу відновлення зв'язку ($t_{\text{счвз}}^{\text{п}}$, год) наведені в цій таблиці, є приблизними. Тому їх можна використовувати тільки в початковий період, поки не будуть одержані більш достовірні дані цих параметрів [4];

г) розраховуються сумарні показники надійності лінійних споруд або ВОСП у цілому;

д) обчислені значення сумарних показників надійності лінійних споруд або ВОСП у цілому або за необхідності розрахунків тільки для ВОЛЗ порівнюють зі значеннями параметрів надійності, що вимагаються. Якщо розраховані показники надійності проєктованих ВОСП не задовольняють вимогам мережі загального користування, то застосовують різні варіанти підвищення їх надійності: 1) замінюють їх найменш надійні компоненти на такі самі типи компонентів іншого виробника з кращими показниками надійності; 2) вносять зміни в структурну схему організації зв'язку, вводячи їх по елементам або по лінійному тракту на ділянках перемикавання; 3) організують експлуатацію лінійних споруд або ВОСП у цілому на основі оптимальної стратегії відновлення, що у більшості випадків, як правило, приводить до такого ж ефекту з точки зору підвищення показників надійності за суттєво меншими додатковими капітальними затратами;

е) після вибору варіанта підвищення надійності лінійних споруд або ВОСП у цілому повторюють розрахунки сумарних показників надійності та порівнюють їхні значення зі значеннями показників, що вимагаються;

Таблиця 1.5 – Значення інтенсивності відмов на 1 км траси та середнього часу відновлення зв'язку для підземних ОК кліматичних районів країни

Кліматичні райони	Середні значення інтенсивності відмов на 1 км траси ($\bar{\lambda}^{\text{п}} \cdot 10^{-7}$, 1/год) та середній час відновлення зв'язку ($t_{\text{счвз}}^{\text{п}}$, год) на базі							
	Броньованого ОК у ґрунті				неброньованого ОК у полімерній трубці (субканалі)			
	$\bar{\lambda}^{\text{п}}$	$\lambda_{\text{макс}}$	$\lambda_{\text{мін}}$	$t_{\text{счвз}}^{\text{п}}$	λ	$\lambda_{\text{макс}}$	$\lambda_{\text{мін}}$	$t_{\text{счвз}}^{\text{п}}$
Гірські Карпати	—	—	—	—	—	—	—	—
Рівнинна частина	18,90	32,30	5,49	3,52	15,30	26,80	3,68	3,71
Узбережжя Чорного та Азовського морів	9,22	13,90	4,54	3,85	7,45	11,40	3,52	4,93
Кліматичні райони	Середні значення інтенсивності відмов на 1 км траси ($\bar{\lambda}^{\text{п}} \cdot 10^{-7}$, 1/год) та середнього часу відновлення зв'язку ($t_{\text{счвз}}^{\text{п}}$, год) (без поділу на броньовані та неброньовані ОК)							
	$\bar{\lambda}^{\text{п}}$		$\lambda_{\text{макс}}$		$\lambda_{\text{мін}}$		$t_{\text{счвз}}^{\text{п}}$	
Гірські Карпати	23,80		30,40		17,10		4,025	
Рівнинна частина	17,40		29,40		5,33		6,645	
Узбережжя Чорного та Азовського морів	8,72		13,30		4,15		4,365	
Середнє по Україні	14,70		23,80		5,60		3,860	

з) цей порядок розрахунку може використовуватися як при проектуванні показників надійності усього комплексу ВОСП, так і лінії зв'язку.

Наприклад, частина обладнання, що застосовується у складі проекрованої ВОЛЗ уже чітко визначена, а частина обладнання може бути ще визначена із ряду пропозицій різних виробників. Тоді при використанні розрахункових виразів (1.20) – (1.22), (1.26), (1.28) визначають значення характеристик надійності на окремі компоненти ВОЛЗ. Якщо вони дорівнюють або перевищують значення показників надійності, що вимагаються для даної ВОЛЗ, то такі компоненти доцільно використати. Тому, ці значення показників за інших рівних умов можуть бути вирішальним критерієм при виборі обладнання того або іншого виробника.

1.5.2.3 Практичні рекомендації з мінімізації ризику пошкоджень лінійних споруд ВОЛЗ та забезпечення норм її показників надійності

Мінімізація ризику пошкоджень лінійних споруд ВОЛЗ та забезпечення їх надійності є комплексною задачею, що забезпечується ретельною перевіркою якості компонентів, високоякісним проектуванням.

Основні практичні рекомендації щодо мінімізації ризику пошкоджень при проектуванні лінійних споруд ВОЛЗ можуть бути зведеними до:

а) дотримання вимог усіх діючих ДСТУ, відомчих нормативних документів, ТУ, правил, норм та інструкцій з прийомки (кабелю та обладнання ВОЛЗ), проектування, будівництва і експлуатації, технічного нагляду та забезпечення їхнього збереження, а також керівництв, правил і норм захисту кабелю від струмів блискавки, впливів ліній електропередавання (ЛЕП) [4, 25, 26] і т.п.;

б) ретельного відпрацювання усіх рішень, що приймаються в проєкті (техніко-економічного порівняння усіх можливих варіантів, вибору типу кабелю та обладнання ВОЛЗ, дотримання усіх вимог нормативно-технічної документації, побудови мереж зв'язку на основі детальних розрахунків);

в) розробки при проектуванні ВОЛЗ заходів ослаблення факторів, негативно впливаючих на надійність її роботи. При цьому висока надійність може бути досягнута правильним вибором траси і глибини прокладання ОК, пристроїв, що застосовуються для захисту від механічних пошкоджень, гризунів, струмів блискавки, впливів ЛЕП та ін.

Основні практичні рекомендації при проектуванні лінійних споруд ВОЛЗ при невідповідності значень їх показників надійності значенням показників, що вимагаються, необхідно переглянути проєктні рішення у частині: виноски лінії за межі населених пунктів; обходу складних ділянок траси кабельної лінії – зсувних, обвальних, струсових та ін.; резервування переходів через водні перешкоди; заміни ОК з вибраною механічною міцністю та блискавкостійкістю на кабелі з кращими механічними параметрами та вищою блискавкостійкістю на ділянках з високою щільністю аварій від ударів блискавки; заміни неякісних частин елементів ліній ВОСП (заземлювачів, замірних стовпчиків, захисного обладнання від електромагнітного впливу, грозової електрики, ЛЕП та ін.) на елементи з вищою якістю; вибору ОК іншого виробника з вищою якістю; зміни типу структурного резервування ліній ВОСП.

1.5.3 Роль і значення експлуатаційної статистики для забезпечення якості та надійності роботи ВОЛЗ

Надійність ВОЛЗ різного типу, що знаходяться в різних умовах експлуатації, з достатньою ймовірністю може бути визначена на основі збору й обробки великої кількості статистичних даних про їх відмови (пошкодження з перервою та без перерви зв'язку).

Чим більша кількість кабельних ліній буде охоплена наглядом і чим більше буде термін, за який зібрані й оброблені статистичні дані, тим вірогідніше будуть отримані результати. При зборі статистичних відомостей повинні враховуватися особливості умов роботи лінії – кліматичні та ґрунтові умови, організація служби експлуатації, наявність різного роду додаткових пристроїв (заземлювачів,

замірних стовпчиків, захисного обладнання від електромагнітного впливу, грозової електрики, ЛЕП та ін.).

Добре організована система збору, аналізу та кінцевої обробки даних причини, кількості і характер пошкоджень елементів лінійних споруд ВОЛЗ є одним з основних джерел одержання відомостей про якість та надійність їх роботи. Отже, організації цієї системи повинна приділятися необхідна увага. Статистичні матеріали полегшують розробку заходів зі зменшення числа пошкоджень, наприклад, застосуванням нових матеріалів, поліпшенням конструкції елементів лінійних споруд ВОЛЗ або зміни застарілих інструкцій з будівництва ліній та їх експлуатації.

Форми обліку повинні бути простими і дозволяти отримувати більш повну інформацію про причини, кількість та характер пошкоджень лінійних споруд. Занадто малий обсяг або недостовірність інформації роблять її майже марною, в той же час надмірно розширений обсяг може призвести до невиправданих витрат часу на збір та обробку результатів спостережень, що може призвести до неможливості належного аналізу результатів внаслідок зайвого перевантаження отриманими відомостями.

При розробці форми обліку необхідно знати, якими методами повинен користуватися обслуговуючий персонал для забезпечення гарантії, точності та достовірності даних причин пошкоджень. Немає сенсу виділяти в формах обліку пошкоджень, причина виникнення яких не встановлена. Їх слід виділяти в окрему графу «за нез'ясованими обставинами». Форми не повинні бути складними, щоб особи, які їх заповнюють, могли правильно їх розтлумачити. У формах слід передбачити місце для приміток, так як не всі випадки, що зустрічаються в практиці можливо поділити на заздалегідь певні категорії.

На збір і обробку даних про кількість, характер і причини пошкоджень не повинна впливати система оплати праці та заохочення працівників, які мають відношення до збору та опрацювання статистичних відомостей. При цьому важливо мати достовірні відомості не тільки про ті пошкодження, які супроводжуються перервою зв'язку, але і про ті, які ліквідуються без перерви

зв'язку, так як вони теж мають важливе значення для судження про якість і надійність роботи кабелю та інших елементів лінійних споруд ВОЛЗ.

Отже, при зборі статистичних даних на ВОЛЗ слід вважати пошкодженням кабелю всі небажані зміни в самому кабелі, з'єднувальних муфтах і кінцевих пристроях, які порушують або можуть порушити нормальну роботу ВОЛЗ, а також погіршують якість передачі.

Управління кабельних магістралей висилають відомості про пошкодження в підрозділи, що керуються Міністерствами інфраструктури та цифрової трансформації України у вигляді звітів, що враховують пошкодження лише з простоями, які є відмовами (пошкодженнями з перервою) зв'язку. Несправності без перерви зв'язку на лінійних спорудах ВОЛЗ не враховуються. У звітах вказується загальна тривалість простою в канал-годинах без зазначення кількості задіяних систем зв'язку.

Причини пошкоджень ОК мають всього шість різновидів, кожен з яких охоплює досить велику кількість факторів, що впливають на роботу кабелю. З такої звітності не представляється можливим виявити необхідні відомості по окремим впливовим факторам: наприклад, з окремих видів механічних навантажень (вібрації, зсувів ґрунтів, розтягнення і т. і.), окремих видів корозії, пробою ізоляції напругою з боку установок сильного струму, і т. і.

У цій формі звітності відзначається, що внаслідок пошкодження якогось елемента (кабелю, муфти, кінцевого пристрою) сталася відмова (пошкодження з перервою) зв'язку. Ця звітність є простою і може бути виправдана тим, що, не перевантажуючи працівників служби експлуатації, дає загальне уявлення якості роботи тієї чи іншої лінії. Вона може бути використана для визначення загальних показників надійності кабельної магістралі. Але вона недостатня для виявлення окремих факторів, що викликають відмови, найбільш слабких елементів лінії.

Виявлення надійності окремих елементів лінії має велике практичне значення, так як всі елементи побудованої лінії повинні бути по можливості однаково надійними. Отже, виявлення менш надійних елементів дозволяє вжити заходів з поліпшення їх конструкції.

При порівняльній оцінці ліній по тривалості простою зв'язків в каналогодинах слід критично використовувати статистичні відомості, інакше можна прийти до хибних висновків. Наприклад, в рівнинному районі є кабельна магістраль В15с на базі кабелю ОКЛБг-18 з різною кількістю задіяних каналів. При цьому в одному році на магістралі кабель ущільнений 1330 каналами. В іншому році на магістралі організовано 4120 каналів. Припустимо, в першому році на магістралі були дві відмови (пошкодження з перервою зв'язку) тривалістю відмови по 2,5 годин кожна, а в другому році – 1 відмова з тривалістю 3,17 години. В офіційній статистиці буде вказано загальний простій зв'язків в першому випадку $1330 \cdot 2 \cdot 2,5 = 6650$ каналогодин, в іншому випадку – $4120 \cdot 1 \cdot 3,17 = 13060$ каналогодин. Якщо оцінювати цю магістраль просто по фіксованим простоям в каналогодинах без рахунку завантаження кабелю, то, очевидно, прийдемо до абсолютно неправильно висновку про те, що в першому випадку магістраль працювала краще, хоча в дійсності спостерігалось протилежне явище. Тому при оцінці надійності з каналогодинами слід виходити з цифр повного завантаження кабелю найбільш ефективною для нього апаратурою, тобто в прикладі і в другому випадку слід враховувати ущільнення кабелю усіма каналами, хоча в розглянутий період він і не є повністю ущільненим [4].

Для отримання відомостей про причини і характер відмов та несправностей (пошкоджень без перерви) зв'язку можна скористатися аналізом та обробкою первинних документів, якими є акти про пошкодження ОК. З правильно складених актів можливо отримати відомості, необхідні для більш повного аналізу роботи лінії, так як в них відзначені час початку пошкодження, характер і його причини, час і результати первинних вимірювань з визначення місця пошкодження, часи відновлення зв'язку, повної ліквідації пошкодження [4].

Оцінка надійності лінійних споруд ВОЛЗ та ВОСП у цілому за результатами експлуатації може досягнути своєї мети лише за умови своєчасного надходження достовірної інформації та її своєчасної якісної обробки, підготовленої для цієї мети, спеціальною групою.

Підготовленість особового складу, перш за все, визначається вмінням заповнювати розроблені форми обліку. Цьому передуює робота по складанню форм та інструктажу виділених працівників. Обробка та аналіз результатів проводиться систематично групою надійності.

Основними задачами обробки та аналізу експлуатаційних статистичних даних є визначення кількісних характеристик надійності, виявлення причин відмов та умов, при яких вони сталися, розробка рекомендацій по їх зменшенню. Вирішенню цих задач корисне використання додаткової інформації – пропозицій лінійного персоналу про можливе підвищення надійності даної лінії ВОСП або окремих її пристроїв.

1.6 Постановка задач для дослідження та розв’язання проблеми

За останні роки проблема розвитку теорії та методів оптимізації забезпечення надійності ВОЛЗ при проєктуванні, будівництві та експлуатації стала вельми актуальною та необхідною. Вона включає розв’язання цілої низки наукових задач, пов’язаних, в першу чергу, з теоріями оптичних хвилеводів (оптичних волокон), розробки та виробництва оптичних кабелів і систем передавання. Характерним для сучасних ВОСП є великий об’єм трафіка, що передається, тобто великий об’єм втрат у разі простою, і велика протяжність між сусідніми проміжними пунктами ВОЛЗ, тобто збільшення часу під’їзду для усунення пошкодження.

Таким чином, ця проблема вимагає для створення високонадійних ВОЛЗ розв’язання ряду наукових та практичних задач з метою підвищення вимог до надійності роботи ВОСП і, в першу чергу, ВОЛЗ та її елементів. Тому що лінія вносить у загальне число пошкоджень системи передачі до 95 % [4].

Вивчення літературних джерел показало, що низка цих задач зі створення, в першу чергу, високонадійних ВОЛЗ залишилися поза рамками відомих робіт. Сюди слід віднести задачі, пов’язані з: розвитком теорії проєктування та розробкою методів оптимізації моделей модульних конструкцій ОК нового

покоління на базі силових елементів із різних діелектричних матеріалів; розвитком теорії забезпечення надійності ВОЛЗ на етапах виробництва ОК та її будівництва; розвитком та обґрунтуванням підходів до визначення показників експлуатаційної надійності ВОЛЗ; контролем та прогнозуванням показників надійності ВОЛЗ; удосконалення теорії та розробки забезпечення показників надійності ВОЛЗ.

На сьогодні також відсутня в повному об'ємі нормативна документація з розрахунку оптимальних моделей багатомодульних конструкцій ОК та їх економічної ефективності. Відомі джерела з конструювання кабелів не дають відомостей та підходів до оптимізації та розрахунку конструкцій з певною кількістю оптичних волокон.

Наразі для забезпечення надійного високошвидкісного оптичного зв'язку необхідно розробити теорію та методи оптимізації забезпечення надійності ВОЛЗ та її компонентів на ТЕКМ зв'язку і мережах абонентського доступу. Це потребує повного комплексного підходу для вирішення даної проблеми й вимагає дослідження складових надійності на всіх основних етапах життєвого циклу – проєктуванні, будівництві та технічній експлуатації ВОЛЗ.

Досягнення поставленої мети та вирішення теоретичних та практичних розробок можливе в таких напрямках:

- дослідження сучасного стану проблем забезпечення надійності ліній зв'язку ВОСП;
- забезпечення технічної і економічної ефективності проєктування та експлуатації ВОЛЗ оптимальними модульними конструкціями ОК;
- розвитку теорії забезпечення надійності ВОЛЗ на етапах виробництва ОК та її будівництва;
- розвитку та обґрунтування підходів для визначення та уточнення показників експлуатаційної надійності ліній зв'язку ВОСП;
- забезпечення достовірного контролю технічного стану елементів лінійних споруд ВОЛЗ при експлуатації в різних кліматичних районах;
- забезпечення надійності ВОЛЗ при експлуатації запасними елементами ЗП.

1.7 Висновки до першого розділу

У даному розділі з дослідження сучасного стану проблеми забезпечення надійності лінійних споруд ВОСП, передумов їх дослідження було:

А. Виконано:

- аналіз літературних джерел, що дозволив визначити стан проблеми, обґрунтувати складові та підходи до забезпечення надійності лінійних споруд ВОЛЗ на етапах життєвого циклу, загальні рекомендації з забезпечення при проектуванні та методики розрахунку і проектування показників надійності;

- в рамках цього аналізу вказано на проблеми: 1) з конструювання сучасних конструкцій ОК для різних умов експлуатації; 2) відсутність в літературних джерелах методів структурної та параметричної оптимізації кабелю; 3) відсутності удосконаленого вибору матеріалів ОВ та оптимальної конструкції ОК для виробництва; 4) відсутності удосконалених підходів забезпечення надійності на етапі проектування ВОЛЗ та її компонентів, в рамках яких: а) розроблено загальні рекомендації з забезпечення надійності ВОЛЗ при проектуванні; б) розроблена методика розрахунку та проектування показників надійності лінійних споруд ВОЛЗ; в) приведено аналіз ролі і значення експлуатаційної статистики для забезпечення якості та надійності роботи ВОЛЗ при проектуванні та експлуатації лінійних споруд;

- сформована постановка задач для розв'язання проблеми забезпечення надійності ліній зв'язку ВОСП та передумов їх дослідження.

Б. Встановлено, що: – на підставі узагальнення даних дослідження нормативних документів, монографій та публікацій [1 – 59], які регламентують теоретичні основи конструювання ОК, виробництва складових компонентів, будівництво та експлуатацію лінійних споруд ВОЛЗ, методи забезпечення надійності, було встановлено: а) проблему забезпечення надійності лінійних споруд ВОЛЗ охоплює велике коло складових від розробки та виробництва її елементів, в першу чергу, ОК до проектування, будівництва та технічної експлуатації лінії; б) до складових забезпечення надійності ВОЛЗ входять ряд

етапів, перша частина потребує теоретичних та практичних розробок у цілому, а друга частина етапів – дослідження в теоретичних та практичних напрямках, приведених у п. 1.6; в) на сьогодні в країні та деяких країнах виробників ОК відсутня у відкритому доступі нормативно-технічна база з конструювання ОК; г) питанню дослідження надійності ВОЛЗ, її елементів в натурних умовах експлуатації присвячена обмежена кількість робіт. Аналіз яких показує, що їх результати є мало порівнювані, оскільки дослідження велись в різних кліматичних зонах, на різних за конструкцією зразках елементів.

В. Рекомендовано: у зв'язку із представленим виникла настійна потреба у створенні методів забезпечення надійності ВОЛЗ, у яких необхідно:

а) розвинути теоретичні основи розробки і структурної й параметричної оптимізації конструкцій ОК на етапі проєктування;

б) створити теоретичні основи забезпечення параметрів передавання й механічної цілісності ОВ при термомеханічних впливах на елементи конструкції ОК, що супроводжуються появою сил розтягування/стискання на етапі виробництва кабелю, а також будівництва та експлуатації ВОЛЗ;

в) розвинути та обґрунтувати підходи для визначення кількісних показників надійності лінійних споруд ВОЛЗ на основі дослідження реальних експлуатаційних показників якості роботи ВОЛЗ в різних кліматичних районах;

г) створити теоретичні основи та розробити метод контролю механічного стану волокна в ОК, в першу чергу, підвісному, що перебуває під динамічним впливом навантажень умов експлуатації;

д) розробити практичні заходи підвищення надійності ВОЛЗ при проєктуванні, будівництві та експлуатації. Особливу увагу приділити ремонтним, профілактичним роботам та забезпеченню надійності ВОЛЗ з використанням комплектів ЗІП.

РОЗДІЛ 2

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕХНІЧНОЇ І ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЄКТУВАННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВОЛЗ ОПТИМАЛЬНИМИ МОДУЛЬНИМИ КОНСТРУКЦІЯМИ ОК

2.1 Розвиток теорії конструювання та оптимізації модульних моделей ОК для удосконалення проєктування і експлуатації ЕКМ

Оптичний кабель є одним із компонентів ВОСП, який підлягає дії значної кількості зовнішніх впливових факторів (температури, підвищеної вологості та атмосферного тиску середовища експлуатації, озону підвищеної концентрації, мінеральних масел, бензину, різних механічних навантажень та ін.). Він при дії цих факторів повинен надійно працювати, забезпечуючи при цьому мінімальні теплове розсіювання енергії та спотворення рівня і форми сигналу. Мале допустиме відносне видовження ОВ, чутливість до найменших деформацій приводить до того, що конструювання ОК має низку особливостей, невластивих принципам конструювання провідних кабелів. Нижче буде розглянуто декілька теоретичних розробок та рекомендацій, що дозволяють методологічно обґрунтувати підхід до конструювання ОК, виходячи з вимог до його оптичних і механічних характеристик.

Загальна схема конструювання ОК може бути сформульована згідно з [3, 4, 21, 34]. Таким чином: визначення характеристик кабелю за загальними вимогами до ВОЛЗ; розрахунок його механічної міцності і вибір конструкції; розрахунок рівня загасання ОВ кабелю. При цьому, значення передавальних характеристик ОК під дією механічних навантажень не повинні виходити за встановлені межі на протязі всього терміну його служби та повинні відповідати стандартам ІЕС, рекомендаціям ІТУ-Т і нормативній документації на конкретний ОК.

В залежності від типу та марки ОК значення величини допустимого розтягувального зусилля задаються в діапазоні від (1,5 до 85,0) кН. Для

прокладання ОК в ґрунті, кабельній каналізації, будівлях використовуються кабелі з допустимим розтягувальним зусиллям від (1,5 до 4,0) кН. Для підвішування на опорах ЛЕП використовуються ОК з допустимим розтягувальним зусиллям більше 80 кН [39].

За кліматичними умовами ОК повинні бути стійкими до впливу: температури навколишнього середовища від мінус 40 °С до +70 °С; циклічної зміни температури від мінус 40 °С до +60 °С; підвищеної вологості навколишнього середовища до 98 % при температурі +40 °С; пониженого атмосферного тиску до $5,3 \cdot 10^{-4}$ Па (400 мм рт. ст.) [39].

Підвісні ОК повинні бути стійкими до впливу пліснявих грибів, роси, дощу, інею, соляного туману, сонячного та радіаційного випромінювання, хімічних речовин, озону підвищеної концентрації, мінеральних масел, бензину і соляного туману (у відповідності з ТУ на кабель).

Кабелі з металевими елементами (жили дистанційного живлення, сталеві або алюмінієві оболонки, силові елементи, бронепокриви), повинні відповідати вимогам [39]: витримувати випробувальну напругу у 8 кВ; мати опір ізоляції зовнішнього захисного шлангу не менш 2000 МОм·км та пробивну напругу 20 кВ постійного струму або напругу 10 кВ змінного струму з частотою 50 Гц на протязі 5с; бути стійкими до дії імпульсного струму, тобто повинні витримувати імпульсний струм розтікання тривалістю 60 мкс з величиною 105 кА. У ОК, що вбудовані у грозозахисний канат, зовнішні металеві покриття повинні мати: низький питомий опір від 0,11 Ом/км до 0,80 Ом/км; високу щільність струму короткого замикання (КЗ) до 25 кА²·с на протязі 1 с (величина залежить від марки кабелю); термічну стійкість до струму КЗ від 18 кА до 332 кА на протязі 1 с (в залежності від марки кабелю); стійкість до грозового розряду (до 85 Кл).

Таким чином, виходячи із основних вимог, до конструкцій оптичних кабелів, приведених у даному підрозділі слід відмітити, що вони при таких технічних характеристиках зможуть забезпечити для удосконалення проектування та експлуатації лінійних споруд ВОЛЗ необхідну якість та надійність роботи ВОСП.

2.2 Обґрунтування послідовності проєктування та розробки оптимальних конструкцій оптичних кабелів

Конструювання сучасних ОК – найскладніша проблема, що вимагає врахування практично усіх останніх досягнень в галузі ОВ, надлегких на надміцних ниток, армуючих елементів із склопластиків, нових полімерних матеріалів, надтонких металевих тросів та інше.

Конструювання ОК забезпечуються проєктуванням та розробкою його конструкції. Вони включають вирішення ряду задач.

Проєктування конструкції ОК забезпечує його стійкість до впливових факторів, таких як різноманітні кліматичні, природні, техногенні дії, до яких можливо віднести: температурні коливання, кислотність навколишнього середовища, дію дрібних шкідників та інше.

Проєктуванням конструкцій кабелів займаються, як правило, спеціальні підрозділи (відділи або сектори) науково-дослідних установ, проєктних організацій та наукових підрозділів відомих фірм-виробників ОК.

До основних задач проєктування ОК входять: визначення зовнішніх механічних факторів, що діють на кабель; визначення механічної міцності кабелю; визначення термостабільності конструкції кабелю; вибір елементів конструкції моделі кабелю та їх матеріалів; визначення поздовжньої та поперечної герметизації кабелю; визначення надійності кабелю; розгляд стійкості ОВ і ОК до дії іонізуючого променевипромінювання.

При її розгляді приймається, що: ОВ нейтральне по відношенню до матеріалів інших елементів кабелю; ОВ при проєктуванні конструкції ОК розглядається, як об'єкт, що забезпечує стійкість конструкції до зовнішніх діючих факторів, нормовані передавальні характеристики (загасання, дисперсія сигналу) по визначеним і відомим законам; володіє терміном служби не менше терміну служби кабелю.

Розрахунком конструкції (іноді за заявою замовника) займаються, як правило, спеціальні підрозділи фірм-виробників оптичного кабелю.

До основних задач розробки оптимальної конструкції ОК входять: визначення складу елементів багатомодульної моделі кабелю, матеріалів елементів кабелю, геометричних розмірів елементів та розміру кабелю в цілому та його механічної міцності; обґрунтування та оптимізація процесу вибору структури осердя кабелю; вибір елементів захисних покриттів кабелю; визначення повної собівартості кабелю.

2.2.1 Загальні положення з проєктування та розробки ОК

Необхідність організації сучасного виробництва ОК зумовила проєктування та розробку спеціальних конструкцій кабелів з власними силовими елементами і без них. При цьому під час розробки таких конструкцій кабелів необхідно враховувати, як відмічалось раніше, різноманітність дії зовнішніх впливових факторів на ВОЛЗ, що скорочують термін служби ОК.

Всі наведені вище фактори, які діють на ВОЛЗ, можуть призвести до появи надмірних навантажень в кабелі, та, як наслідок, скоротити термін його служби або спричинити передчасний вихід з ладу. Наслідками цього стане перерва зв'язку, втрата великого об'єму інформації, що передається [4].

Вимоги до ОК визначаються умовами їх експлуатації: природними впливами, впливом потужних електромагнітних полів від ЛЕП, контактних мереж електротранспорту, метрополітену та інше. Це змушує використовувати ОК з діелектричною конструкцією. Конструкції таких самоутримних кабелів повинні забезпечувати стійкість до механічних, температурних та інших впливів при виконанні будівельних робіт та подальшої їх експлуатації [60 – 62]. Значення передавальних характеристик ОВ під дією навантажень на кабелі не повинні виходити за установлені межі впродовж усього терміну служби ОК, а також повинні задовольняти вимогам стандартів МЕК, рекомендацій ITU та нормативній документації на конкретну їх марку [3, 4].

В першому розділі даної роботи розрахунок моделі конструкції ОК, як правило, проводиться за значенням максимально допустимого розтягувального

навантаження кабелю, $F_{\text{МК}}$. Перевищення значення цього механічного параметра при експлуатаційних навантаженнях може призвести до небажаних деформацій оптичних волокон, тобто, до погіршення їх параметрів передавання [3, 4, 21].

Розробка конструкцій ОК повинна базуватися на властивості кабелів постійно підтримувати передавальні характеристики ОВ у межах норм при забезпеченні його цілісності та виключення можливих надмірних механічних впливів. Останнє досягається розробкою оптимальних конструкцій ОК, що відповідають екстремальним навантаженням зони експлуатації [4, 63 – 68].

Невірні розрахунок механічної міцності, вибір матеріалу, геометричних розмірів окремих елементів кабелю, є причиною пошкоджень ОВ, та, як наслідок, погіршенням якості сигналу, зменшенням швидкості та дальності передавання і навіть перерви зв'язку [4, 69].

Організація проєктування та будівництва ВОЛЗ вимагають врахування технічних характеристик ОК, що забезпечать його довгострокову експлуатацію та очікуваність параметрів передавання. При цьому значення $F_{\text{МК}}$ не повинне бути більшим за норму навіть при максимальних навантаженнях кліматичних умов експлуатації [40, 70 – 75].

2.2.2 Обґрунтування основних вимог до конструкцій ОК

Досвід проєктування та розробки конструкцій ОК для експлуатації в різних умовах (грунті, повітрі, воді та будівлях) відтворено у низці міжнародних Рекомендацій [34, 76 – 85]. В них надані вимоги до конструкцій кабелів.

Таким чином, особливості конструкції, а також характеристики (оптичні, механічні та стійкості до впливів довкілля) для ОК зв'язку, що визначаються згідно низки Рекомендацій ITU-T, регламентують роботу з проєктування та розробки кабелів [34]. Зупинимось лише на деяких із них. Так, наприклад, ОК для: прокладання в кабельній каналізації та тунелях (Рекомендація ITU-T L.10) [78]; підвішування на опорах або повітряного застосування (Рекомендація ITU-T L.26) [79]; прокладання в ґрунт (Рекомендація ITU-T L.43) [80]; внутрішнього

прокладання (Рекомендація ITU-T L.59) [81]; маловолоконні для внутрішнього прокладання (Рекомендація ITU-T L.67) [82]; прокладання в трубах водостічної каналізації (Рекомендація ITU-T L.78) [83]; абонентської проводки (Рекомендація ITU-T L.87) [84].

Усі Рекомендації ITU-T гармонізовані з чинними стандартами ІЕС [85].

Система стандартів ІЕС по вимогам до конструкцій ОК [34] показана на рис. 2.1.

Оптичні та передавальні характеристики ОК визначаються, в першу чергу, характеристиками ОВ, які в них застосовуються.

Механічні характеристики ОК залежать від їх призначення та умов експлуатації. Вони мають бути стійкими до: згинів, розтягувальних зусиль, роздавлювань, ударів та осьових закручувань [3, 4, 34].

Згини – це наслідки динамічних режимів, що виникають в процесі прокладання, в результаті чого ОВ можуть піддаватись деформації через згинання кабелю. Силкові елементи та радіус вигину кабелю під час прокладання мають вибиратись такими, щоб обмежувати ці динамічні деформації. Після прокладання кабелю осі усіх ОВ повинні мати радіуси вигину значно більші за мінімальний, що забезпечує дозволений рівень втрат на макровигинах або гарантований термін служби, обмежений механічною втомою [4, 34].

Короткострокові розтягувальні зусилля виникають в процесі виробництва, прокладання ОК і протягом всього терміну експлуатації, і можуть викликати постійні та/або періодичні навантаження на ОВ (наприклад, через зміни температури). Зміна розтягувального зусилля кабелю через зміну впливу чинників довкілля протягом терміну експлуатації може викликати різноманітні переміщення кабельних елементів. Надмірне розтягувальне зусилля призводить до зростання оптичних втрат та може спричинити залишкове розтягувальне зусилля ОВ. Запобігати цьому слід ще на етапі проектування, шляхом вибору ОК з певним дозволеним розтягувальним зусиллям та контролем розтягувального зусилля в процесі прокладання.

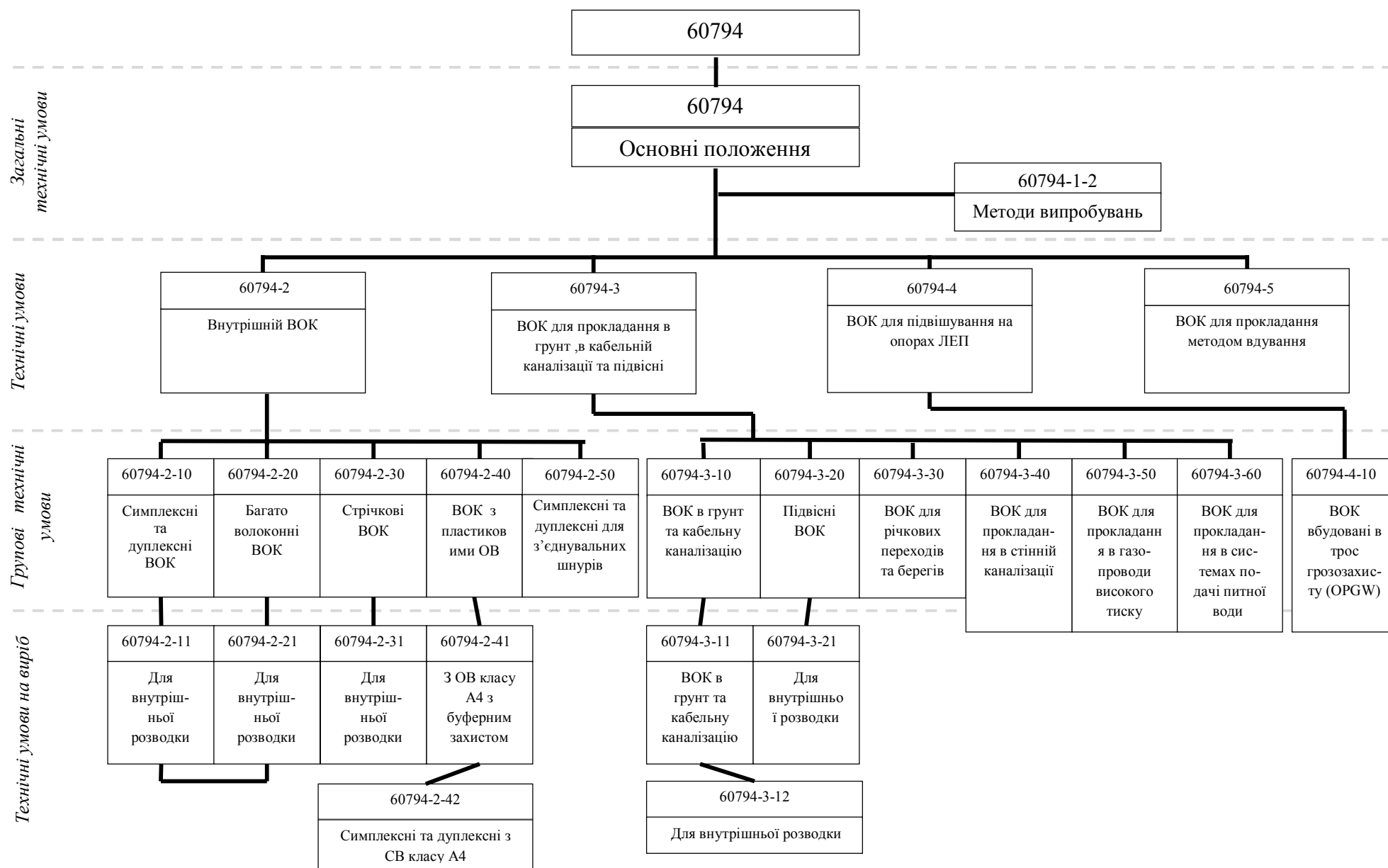


Рисунок 2.1 – Система стандартів ІЕС по вимогам до конструкцій ОК

Розтягувальні зусилля на ОВ можуть бути викликані розтягуванням, осьовим закручуванням, згином та наявним провисанням між затискачами під власною вагою кабелю, способом прокладання та/або методом підвішування та/або умовами довкілля, такими як вітер, ожеледь, температура. Тому при проєктуванні повітряних ВОЛЗ слід враховувати максимальне дозволене розтягувальне зусилля, номінальну межу міцності та запас навантаження на ОК. Якщо кабель піддається тривалому розтягувальному зусиллю протягом усього терміну служби бажано, щоб ОВ не зазнавало додаткових видовжень [3, 4, 21, 37]. Постійні розтягувальні зусилля можуть існувати протягом усього терміну експлуатації кабелю. Це характерно для ОК, що підвішуються на опорах.

Роздавлювання та удари можуть виникати як в процесі прокладання, так і в процесі експлуатації ОК. Вони можуть викликати постійне або тимчасове зростання оптичних втрат та/або втрату оптичної цілісності ОВ. Кабелі для підвішування на опорах мають протидіяти роздавлюванню без додаткових оптичних втрат [3]. Закручування виникає внаслідок динамічних навантажень в процесах прокладання і експлуатації ОК. В результаті цього можуть виникнути залишкові навантаження на ОВ та/або пошкодження захисних покривів ОК. Якщо такі випадки мають місце, конструкція кабелю має витримувати певну кількість осьових закручувань на одиницю довжини без зростання втрат в ОВ та/або пошкодження оболонки. Максимальне залишкове навантаження ОВ через осьове закручування, розтягування та згин кабелю певною мірою визначають термін його служби [3].

Кабель для прокладання в ґрунті у процесі транспортування, будівництва та експлуатації ВОЛЗ може піддаватись механічному впливу [3].

Слід пам'ятати, що кабель, прокладений в ґрунті менш захищений ніж кабель, що лежить в захисних трубах. Перш за все слід дотримуватись вимог щодо ударів, згинів, осьових закручувань, роздавлювання та дозволених радіусів вигинів ОК. Певні критерії або визначені умови експлуатації ОК мають бути узгоджені між користувачем та постачальником [3].

Щодо стійкості до впливу чинників довкілля, ОК зв'язку мають бути

стійкими до: утворення водню, проникнення та розповсюдження вологи, вібрації, зміни температури тощо. Утворення водню виникає як результат впливу вологи на металеві елементи кабелю. Водень може проникати до ОВ і спричинювати зростання оптичних втрат. Тому слід забезпечувати достатньо низьку концентрацію водню в кабелі, щоб гарантувати відсутність зростання оптичних втрат протягом всього терміну служби. Низький рівень водню в ОК досягається шляхом застосування в його конструкції водневопоглинаючих матеріалів та гідрофобних наповнювачів [3, 34].

Проникнення вологи призводить до зменшення межі міцності та середнього часу статичного старіння матеріалів ОВ. Для захисту від проникнення вологи застосовуються різноманітні матеріали, такі як бар'єри (наприклад, накладення алюмінієвої фольги з перекриттям). Безперервні металеві бар'єри добре захищають від радіального проникнення вологи. Для запобігання поздовжньому розповсюдженню вологи в ОК застосовуються різні гідрофобні компаунди або водоблокуючі матеріали (стрічки, обмотки тощо). Вода в кабелі може замерзнути, а в деяких випадках може викликати роздавлювання ОВ і, як наслідок, спричинити погіршення передавальних характеристик та втрату оптичної цілісності. У випадку застосування підвісних кабелів вологість не становить істотних проблем [3, 34].

Найбільш вразливими до ударів блискавки є ОК, що містять у своєму складі металеві елементи, такі як мідні дроти або металеві оболонки.

Механічний удар та енергія, що розсіюється при ударі блискавки, може призвести до руйнації захисного покриття ОК та ОВ в ньому. Проблеми захисту ОК від ударів блискавки слід вирішувати на етапі проектування ВОЛЗ, виходячи з положень Рекомендації ITU-T K.47 [34]. Класифікація кабелів по стійкості до ударів блискавки подана у табл. Б.1 Додатку Б [3].

Кабелі, армовані сталлю та (або) діелектриком типу скловолокна дають захист лише до тих пір, доки армування не пошкоджене. Неоднорідності броні призводять до пошкодження від жуків та личинок. Розкриття сталеві броні можуть виникнути через дефекти з'єднань та недбалий ремонт, утворення

зморшків, механічних пошкоджень або через корозію [3, 34].

Вібрація виникає у випадках прокладання ОК по мостах. Вона може мати різноманітні низькочастотні коливання з відносно високою амплітудою. Кабелі повинні протидіяти цим коливанням без деградації передавальних характеристик. Вібрації можуть піддаватись й ОК, прокладені в ґрунт та в кабельній каналізації, якщо траса лінії проходить поблизу залізниць, кар'єрів та виробничих приміщень. У випадках підвісних ОК вібрація може виникнути під впливом будь якого ламінарного вітрового потоку, через завихрення з підвітряної сторони (еолова вібрація) або зміни напрямку вітру відносно кабельної осі (галоупування) [3, 34].

Основний метод захисту ОК від пошкоджень блискавкою має вибиратись ще при проєктуванні лінії за вибором її траси та методу його прокладання.

На ОК всередині приміщень вібрація діє із-за наявності в будинках різних коливань, які викликані конструкціями, електрогенераторами, ліфтами тощо. Елементи кабелів зв'язані між собою тертям. Коливання можуть викликати зменшення цього тертя і, як наслідок, елементи кабелю можуть переміщатись, спричиняючи при цьому погіршення передавальних або його механічних характеристик. Це особливо небезпечно при вертикальному розміщенні ОК. Тому вони мають витримувати ці коливання без погіршення передавальних характеристик. Захист ОК від вібрації також має здійснюватись шляхом вибору місця та методу прокладання [3].

Зміни температури середовища експлуатації виникають протягом усього терміну служби ОК під дією сезонних температурних циклів. Зміна температури дає різноманітні зміни розмірів кожного його елементу. Оскільки вони мають різні ТКЛР, їх розкид може сягати 100 разів між самим низьким та самим високим значеннями. Ці відмінності можуть викликати зростання оптичних втрат через утворення мікро- та макровигинів ОВ. Тому, при проєктуванні ВОЛЗ кабелю вибирається з урахуванням кліматичних умов місцевості траси лінії. Підвісні кабелі сильніше піддаються температурним змінам порівняно з підземними. Лінійне розширення/стискання ОК через зміну температури може

істотно змінити висоту допустимого зазору (габариту лінії в прольоті) між кабелем і землею. Зміна довжини кабелю через коливання температури повітря може викликати перевищення дозволених розтягувальних зусиль. Для заданих умов експлуатації ВОЛЗ зміна передавальних характеристик ОК не повинна перевищувати норму [4]. При застосуванні повністю діелектричних ОК слід прийняти заходи по їх захисту від гризунів. Заходом для зниження ризику пошкодження ОК блискавкою та гризунами є прокладання повністю діелектричних ОК в пластмасових трубах.

Біологічні пошкодження виникають внаслідок малих розмірів ОК, що робить їх вразливими до нападів гризунів. Види таких нападів та заходи захисту від них кабелів описані в Рекомендації L.46 [34]. Кабелі можуть зазнати пошкодження через біологічні чинники, з яких деякі можуть бути обмеженими специфікою довкілля. Винесення ОК з цих районів вже є захистом від певного біологічного нападу.

2.2.3 Теоретичні підходи забезпечення механічної міцності та параметрів передавання ОК на основі загальних вимог до ВОЛЗ

2.2.3.1 Розробка теоретичних підходів забезпечення механічної міцності оптичних кабелів

Як відмічалось в розділі 1, питання розробки конструкцій ОК в ряді країн досліджені не в повній мірі. Одним із недоліків їх конструювання є відсутність керівних нормативних документів, що регламентують розробку конструкцій кабелю та, в першу чергу, його механічної міцності. Тому удосконалення теоретичних підходів забезпечення механічної міцності ОК є необхідним.

Теоретичні підходи розрахунку механічної міцності ОК передбачає, в першу чергу, визначення його допустимого розтягувального зусилля [3, 4, 40, 71, 73, 86, 87]. Як відомо, в розрахунок механічної міцності ОК від впливу зовнішніх механічних навантажень необхідно включати результати визначення

розтягувальних (змінних статичних та динамічних), згинальних, роздавлювальних і стискальних зусиль.

Зупинимось лише на деяких із них, наприклад, при різних видах прокладання ОК.

Спрощений інженерний розрахунок зовнішньої розтягувальної сили, що діє на ОК за змінного статичного навантаження, виконується за наступними виразами [3, 4, 34]:

– для повітряного підвішування ОК (без урахування вітрових навантажень, зледеніння і температури) [3]:

$$F = \left(\frac{l_{\pi}^2 P_0}{8f} + P_0 f \right) g, \quad (2.1)$$

де F – розтягувальне зусилля ОК на опорах повітряної ВОЛЗ, Н; l_{π} – довжина прольоту, м; P_0 – погонна вага одиниці кабелю, кг/м; f – стріла провису кабелю в прольоті, м; g – коефіцієнт прискорення вільного падіння, Н/кг;

– для прокладання кабелю в ґрунті (сила натягування кабелю на виході з касети кабелеукладального ножа) [3]:

$$F = \frac{P_0 l_k e^k T^{\xi} g}{2\eta_p}, \quad (2.2)$$

де F – розтягувальне зусилля ОК при прокладанні кабелеукладачем в ґрунті, Н; P_0 – погонна вага одиниці довжини кабелю, кг/м; l_k – відстань між віссю кабельного барабана і віссю напрямного ролика кабелеукладача, м; T – коефіцієнт тертя між матеріалами оболонки ОК і касети кабелеукладального ножа; ξ – кут вигину ОК в кабелеукладальному ножі, рад; $\eta_p = (0,95 \dots 0,98)$ – коефіцієнт корисної дії напрямного ролика;

– для прокладання ОК на прямолінійній ділянці та на ділянці з кутом підйому чи спуску (α) кабельної каналізації [3]:

$$F_{\pi} = P_0 l K_{\tau} g; \quad F_{\alpha} = P_0 l (K_{\tau} \cos \alpha \pm \sin \alpha) g, \quad (2.3)$$

де F_{π}, F_{α} – розтягувальне навантаження на прямолінійній та ділянці з підйомом або спуском на кут α кабельної каналізації, Н; P_0 – погонна вага одиниці

довжини кабелю, кг/м; l – довжина ділянки прокладання кабелю в каналізації, м; K_T – коефіцієнт тертя ОК щодо напрямної системи; g – коефіцієнт прискорення вільного падіння, Н/кг;

– для вигинів траси кабельної каналізації на кут α_1 [3]:

$$F_{\text{виг}} = T_{\text{п}} \exp(\alpha_1 K_T) , \quad (2.4)$$

де F – навантаження, що розтягує ОК, Н; K_T – коефіцієнт тертя між матеріалами оболонки ОК і каналом кабельної каналізації.

Згинальні навантаження. Цей вид навантажень виникає при проходженні кабелю через напрямні ролики при його розмотуванні або прокладанні через ролик блока-балансу. Величина цих навантажень залежить від величини натягу кабелю і радіуса ролика та може бути знайдена з виразу [3]

$$F_{\text{зн}} = k_{\text{ж}} \cdot F_{\text{нат}} , \quad (2.5)$$

де $F_{\text{зн}}$ – згинаюче навантаження, Н; $k_{\text{ж}}$ – коефіцієнт жорсткості ОК; $F_{\text{нат}}$ – натяжне зусилля кабелю, Н.

Роздавлювальні навантаження. Визначення величини навантаження, що роздавлює (тиск) q , яке припадає на одиницю довжини кабелю, визначається за виразом [3, 34]:

$$q = \frac{F}{R} , \quad (2.6)$$

де q – роздавлювальне навантаження, Н/мм²; F – сила натягу ОК, Н; R – радіус ролика, мм.

Затягування ОК в трубку пов'язано з його вигинами. При цьому на вигинах має місце поперечне стискання ОК. Цей бічний тиск на ОК складає [3]:

$$P = \frac{T_{\text{кв}}}{R_{\text{в}}} , \quad (2.7)$$

де P – бічний тиск на кабель, Н/м; $T_{\text{кв}}$ – розтягувальне зусилля на кінці вигину траси, Н; $R_{\text{в}}$ – радіус вигину кабелю, 10 см.

Вертикальний тиск шару землі над кабелем при прокладанні визначається за виразом [3]:

$$P_{\text{в}} = \eta_{\text{п}} \cdot K_{\text{вт}} \cdot \gamma \cdot h \cdot D , \quad (2.8)$$

де P_v – вертикальний тиск ґрунту на ОК, кг/м; η_p – коефіцієнт перевантаження, ($\eta_p = 1,2$); γ – питома маса ґрунту, кг/м; h – глибина прокладання кабелю, м; D – зовнішній діаметр кабелю, м.

Метою дослідження є розробка теоретичних підходів забезпечення стійкості ОК до розтягувальних навантажень, що унеможливило б зміни характеристик ОВ при будівництві ВОЛЗ та усього терміну експлуатації кабелю. Тому величина допустимого розтягувального навантаження ОК, F_{dk} , яке забезпечено конструкцією ОК, що складається із n елементів, на практиці визначається за спрощеним виразом (1.1). Різні конструкції ОК можуть забезпечувати F_{dk} завдяки ЦСЕ, ПСЕ або їх комбінації [86].

В якості матеріалів силових елементів ОК, як правило, використовуються стальна проволочка, склопластикові прутки та арамідні нитки.

Розтягувальні навантаження, що забезпечують решта елементів ОК є незначними. Тому їх сумарне значення враховується, як правило, в якості технологічного запасу конструкції ОК за розтягувальним навантаженням [86].

Розглянемо забезпечення модульною конструкцією ОК розтягувального навантаження СЕ із різних матеріалів, виходячи з досягнення кабелем граничного видовження, яке може виникнути під час його прокладки та експлуатації.

В якості прикладів використаємо ОК з різними силовими елементами (рис. 2.2) та значенням максимального видовження кабелю – ϵ_{mk} . Для цього при розрахунках F_{dk} його складові з виразу (1.2) визначаються в залежності від їх матеріалу, площі поперечного перерізу СЕ та ϵ_{mk} .

В зв'язку з вищевикладеним розглянемо метод розрахунку розтягувальних навантажень, які сприймають на себе СЕ ОК із різних матеріалів.

Як правило, критерієм розрахунку розтягувального навантаження ОК вважається досягнення його конструкцією максимального допустимого відносного видовження (деформації) ϵ_{mk} , при якому ОВ втрачають свободу переміщення в трубці ОМ або пазі профільованого осердя та видовжується до певної допустимої величини ϵ_{dov} . Згідно до (1.3) ϵ_{mk} складається з суми

допустимих відносних видовжень ОК, при якому ОВ не підлягає механічному навантаженню – $\varepsilon_{\text{дк}}$, та $\varepsilon_{\text{дОВ}}$.

В конструкціях ОК величина $\varepsilon_{\text{мк}}$ складає від 0,25 до 1 % [4, 86].

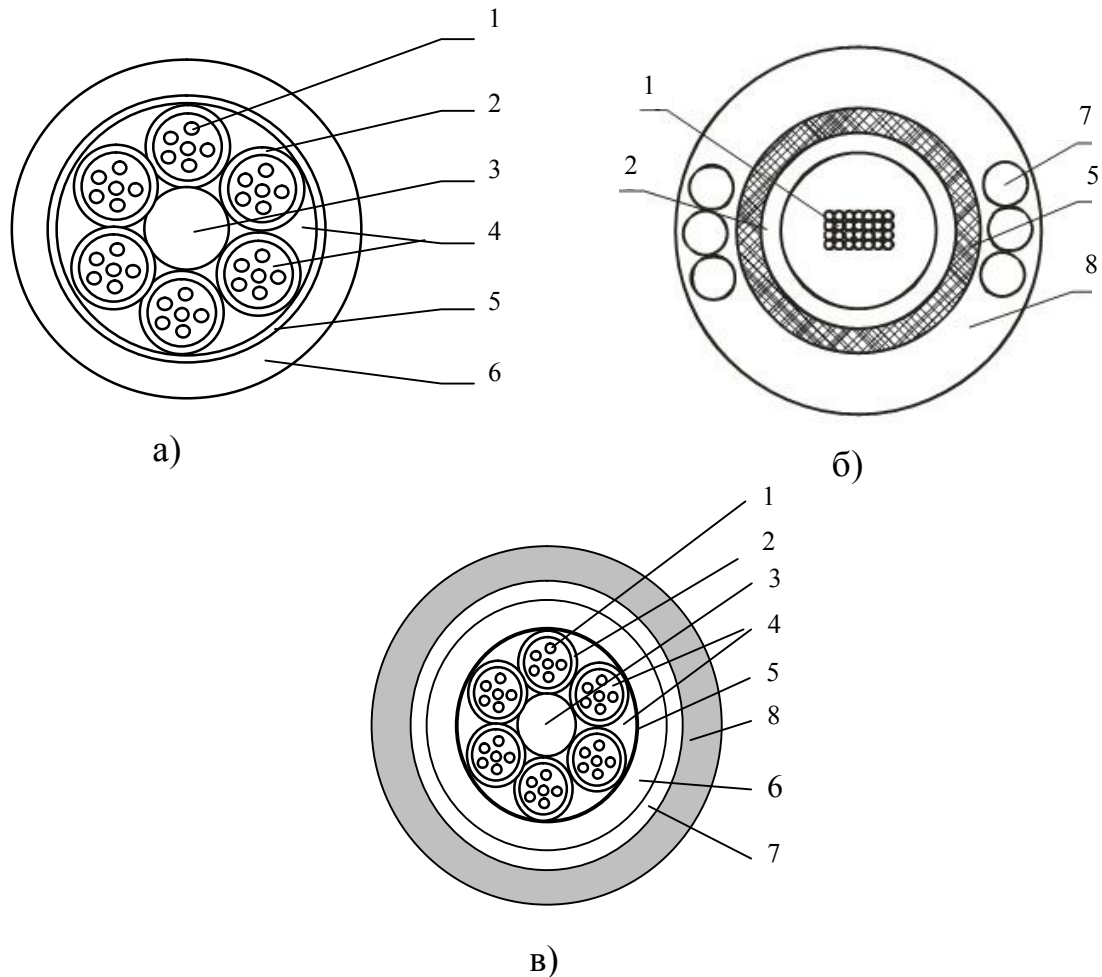


Рисунок 2.2 – Модульні конструкції ОК з: а) центральним, б) периферійним, в) центральним та периферійним силовими елементами:
 1 – ОВ; 2 – трубка ОМ; 3 – ЦСЕ; 4 – гідрофобні компаунди; 5 – скріплювальна плівка; 6 – ПЕ оболонка; 7 – ПСЕ; 8 – захисний шланг

При цьому в роботі прийняті наступні припущення: сталева проволочка працює в межах пружної деформації матеріалу, які не перевищують границю найбільшого напруження металу, при якому справедливий закон Гука; склопластикові стержні працюють у межах пружної деформації; відносне видовження повзучості арамідних ниток в розрахунку розтягувального навантаження ПСЕ не враховується; додаткові напруги розтягу сталеві

проволоки та склопластикового стержня і стискування арамідних ниток незначні.

Останнє припущення справедливе так, як дослідження ведуться для підземних ОК, що експлуатуються в умовах незначної зміни річної температури від $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+18\text{ }^{\circ}\text{C}$ [86, 88] в землі, в кабельній каналізації, лотках колекторів.

Розтягувальне навантаження, яке забезпечує сталеву проволока. Для розрахунку механічної міцності до розтягу СЕ із сталевго дроту необхідно знати границю пропорційності напруження сталі $\sigma_{\text{ст}}^{\text{п}}$ при розтягненні дроту. Цей параметр знаходиться за виразом [4, 40, 86]:

$$\sigma_{\text{ст}}^{\text{п}} = 0,5 \cdot \sigma_{\text{ст}}^{\text{р}}, \quad (2.9)$$

де $\sigma_{\text{ст}}^{\text{п}}$ – напруження матеріалу на границі пропорційності сталі при розтягненні дроту, $\text{кгс}/\text{мм}^2$; $\sigma_{\text{ст}}^{\text{р}}$ – розривна міцність дроту, $\text{кгс}/\text{мм}^2$.

Як відомо, дріт крім цієї границі має границю текучості $\sigma_{\text{ст}}^{\text{т}}$, після якої його властивості змінюються, він стає пластичним і має залишкову деформацію, при якій захищати конструкцію ОК від розтягувальних зусиль стає неможливим.

Для забезпечення стійкості ОК до розтягування необхідно переглядати роботу його елементів при зберіганні закону Гука, в області пружної деформації [86]. Напруження матеріалу дроту при розтязі на границі пропорційності сталі визначається по закону Гука із виразу [86]:

$$\sigma_{\text{ст}}^{\text{п}} = E \cdot \epsilon_{\text{ст}}^{\text{п}}, \quad (2.10)$$

де $\sigma_{\text{ст}}^{\text{п}}$ – напруження матеріалу на границі пропорційності сталі при розтягуванні, $\text{кгс}/\text{мм}^2$; $E = 200\text{ ГПа}$ – модуль Юнга дроту при розтягуванні (1 роду); $\epsilon_{\text{ст}}^{\text{п}}$ – видовження дроту на границі пропорційності, % [40].

Розтягувальне навантаження, яке забезпечується одним дротом при видовженні ОК, визначається [40, 86]:

$$F_{\text{др}} = \sigma_{\text{ст}}^{\text{п}} \cdot S_{\text{др}}, \quad (2.11)$$

де $F_{\text{др}}$ – розтягувальне навантаження, яке забезпечується дротом при видовженні ОК, Н; $\sigma_{\text{ст}}^{\text{п}}$ – напруження матеріалу на границі пропорційності сталі при розтягуванні дроту, $\text{кгс}/\text{мм}^2$; $S_{\text{др}}$ – площа поперечного перерізу одного сталевго

дроту, мм^2 .

Площа поперечного перерізу сталевго дроту визначається за виразом [40, 86]:

$$S_{\text{др}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{др}}^2}{4}, \quad (2.12)$$

де $S_{\text{др}}$ – площа поперечного перерізу сталевго дроту, мм^2 ; $d_{\text{др}}$ – діаметр дроту, мм .

Розтягувальне навантаження, яке забезпечує склопластиковий стержень. Розрахунок розтягувального навантаження СЕ з склопластикового стержня проводиться, виходячи також з заданого досягнення ОК граничного видовження.

Це навантаження може визначатися за формулою [86]:

$$F_{\text{сп}} = \frac{\varepsilon_{\text{МК}}}{\varepsilon_{\text{сп}}^{\text{р}}} \cdot F_{\text{сп}}^{\text{р}}, \quad (2.13)$$

де $F_{\text{сп}}$ – розтягувальне навантаження, яке забезпечується склопластиковим стержнем, Н; $\varepsilon_{\text{МК}}$ – максимально допустиме (граничне) відносне видовження кабелю, %; $\varepsilon_{\text{сп}}^{\text{р}}$ – відносне видовження склопластикового стержня при розриві, %; $F_{\text{сп}}^{\text{р}}$ – розтягувальне навантаження при розриві склопластикового стержня, Н.

Згідно [40, 86] $F_{\text{сп}}^{\text{р}}$ визначається за виразом:

$$F_{\text{сп}}^{\text{р}} = S_{\text{сп}} \cdot \sigma_{\text{сп}}^{\text{р}}, \quad (2.14)$$

де $F_{\text{сп}}^{\text{р}}$ – розтягувальне навантаження при розриві склопластикового стержня, Н; $S_{\text{сп}}$ – площа поперечного перерізу склопластикового стержня, мм^2 ; $\sigma_{\text{сп}}^{\text{р}}$ – границя міцності при розтягуванні склопластикового стержня до розриву (розривна міцність), МПа.

В нормативній документації на склопластикові стержні різних фірм $\varepsilon_{\text{сп}}^{\text{р}}$ складає від (2,5 до 3) %, а величина $\sigma_{\text{сп}}^{\text{р}}$ – від 0,9 до 1,5 ГПа [31, 32, 40, 88].

Розтягувальне навантаження, яке забезпечують n сталевих проволоч або склопластикових стержнів. Конструкції ПСЕ реалізуються на основі певної кількості сталевих проволоч або склопластикових стержнів.

При наявності в конструкції ОК ПСЕ із n елементів, розташованих

концентрично, розрахунок $F_{\text{ПСЕ}}$ виконується за виразом [86]:

$$F_{\text{ПСЕ}\left(\begin{smallmatrix}\text{сп} \\ \text{ст}\end{smallmatrix}\right)} = \frac{n \cdot F_{\left(\begin{smallmatrix}\text{сп} \\ \text{ст}\end{smallmatrix}\right)}}{\sin \beta_1}, \quad (2.15)$$

де $F_{\text{ПСЕ}\left(\begin{smallmatrix}\text{сп} \\ \text{ст}\end{smallmatrix}\right)}$ – розтягувальне навантаження одноповивного ПСЕ із сталевих проволоч або склопластикових стержнів, Н; n – число елементів ПСЕ, шт; $F_{\left(\begin{smallmatrix}\text{сп} \\ \text{ст}\end{smallmatrix}\right)}$ – розтягувальне навантаження, яке забезпечується сталевією проволокою або склопластиковим стержнем, Н; β_1 – кут скручування елементів ПСЕ, град.

Цей кут скрутки визначається за виразом [4, 86]:

$$\beta_1 = \arctg \frac{h_1}{2\pi R_1}, \quad (2.16)$$

де β_1 – кут скручування елементів ПСЕ, град; h_1 – крок скручування елементів одноповивної конструкції ПСЕ кабелю, мм; R_1 – радіус скручування елементів ПСЕ, мм.

При наявності в конструкції із елементів багатоповивного ПСЕ їх сумарне розтягувальне навантаження $F_{\Sigma\text{ПСЕ}\left(\begin{smallmatrix}\text{сп} \\ \text{ст}\end{smallmatrix}\right)}$ визначається за виразом [4, 86]:

$$F_{\Sigma\text{ПСЕ}\left(\begin{smallmatrix}\text{сп} \\ \text{ст}\end{smallmatrix}\right)} = \sum_{i=1}^m \frac{n_i \cdot F_{\left(\begin{smallmatrix}\text{сп} \\ \text{ст}\end{smallmatrix}\right)}^i}{\sin \beta_i}, \quad (2.17)$$

де $F_{\Sigma\text{ПСЕ}\left(\begin{smallmatrix}\text{сп} \\ \text{ст}\end{smallmatrix}\right)}$ – сумарне розтягувальне навантаження із елементів багатоповивного ПСЕ, Н; i – номер повиву в ПСЕ, шт; m – загальне число повивів в ПСЕ, шт; $F_{\left(\begin{smallmatrix}\text{сп} \\ \text{ст}\end{smallmatrix}\right)}^i$ – розтягувальне навантаження елементів i -го повиву, Н; n_i – кількість проволоч або стержнів в i -му повиві; β_i – кут скручування склопластикових стержнів i -го повиву, град.

Розтягувальне навантаження, яке забезпечують синтетичні волокна в силовому елементі. Розглянемо розтягувальне навантаження, яке забезпечують арамідні нитки в силовому елементі.

Для розрахунку розтягувального навантаження ПСЕ, яке забезпечується за

допомогою арамідних ниток, необхідно знати площу арамідних ниток повиву, які використовуються в кабелі, значення їх модуля Юнга і максимальне допустиме видовження кабелю. Тоді $F_{\text{ПСЕ(ан)}}$ буде дорівнювати [86]:

$$F_{\text{ПСЕ(ан)}} = E_{\text{ан}} \cdot S_{\text{ан}} \cdot \epsilon_{\text{МК}}, \quad (2.18)$$

де $F_{\text{ПСЕ(ан)}}$ – розтягувальне зусилля, яке забезпечують арамідні нитки повиву, Н; $E_{\text{ан}}$ – модуль Юнга арамідних ниток, МПа; $S_{\text{ан}}$ – площа арамідних ниток, мм²; $\epsilon_{\text{МК}}$ – максимальне видовження (деформація).

Площа ниток визначається за формулою [4, 53, 86]:

$$S_{\text{ан}} = \frac{LD}{\rho} \cdot n \cdot 10^{-4}, \quad (2.19)$$

де $S_{\text{ан}}$ – площа арамідних ниток, мм²; LD – лінійна густина однієї нитки, дтекс; ρ – густина арамідних ниток, г/см³; n – кількість арамідних ниток у повиві, шт.

Розтягувальне навантаження, яке забезпечують n ниток повиву накладені на осердя ОК під кутом β_1 визначаються виразом [86]:

$$F_{\text{ПСЕ(ан)}\beta_1} = \frac{F_{\text{ПСЕ(ан)}}}{\beta_1}, \quad (2.20)$$

де $F_{\text{ПСЕ(ан)}}$ – розтягувальне навантаження, яке забезпечують n ниток повиву, накладені на осердя ОК під кутом β_1 , Н; β_1 – кут скручування ниток повиву, град.

При наявності в ПСЕ декількох повивів арамідних ниток сумарне розтягувальне навантаження $F_{\Sigma\text{ПСЕ(ан)}}$ визначається за виразом [86]:

$$F_{\Sigma\text{ПСЕ(ан)}} = \sum_{i=1}^m \frac{F_{\text{ПСЕ(ан)}i}}{\sin \beta_i}, \quad (2.21)$$

де $F_{\text{ПСЕ(ан)}i}$ – сумарне розтягувальне навантаження арамідних ниток i -го повиву ПСЕ, Н; β_i – кут скрутки арамідних ниток i -го повиву, град; i – номер повиву в ПСЕ, шт; m – загальне число повивів в ПСЕ, шт.

В даному підрозділі в якості прикладів були визначені розтягувальні навантаження конструкції ОК, приведений на рис. 2.2,в. При цьому, були визначені два варіанта розтягувальних зусиль ОК.

В якості прикладів були визначені розтягувальні навантаження, які

забезпечуються центральним та периферійним силовими елементами в конструкції ОК.

В першому варіанті конструкції кабелю взято ЦСЕ зі сталевих дроту, діаметр якого рівний 2 мм і однопопівного ПСЕ з 6 арамідних ниток типу «Twaron» D2200-8050. Для обчислення $F_{\text{дк}}$, $F_{\text{ЦСЕ}}$, $F_{\text{ПСЕ}}$, були використані вирази, відповідно: $F_{\text{дк}} - (1.2)$, $F_{\text{ЦСЕ}} - (2.9) \dots (2.12)$; $F_{\text{ПСЕ}} - (2.18) \dots (2.21)$.

Розрахунки $F_{\text{дк}}$, $F_{\text{ЦСЕ}}$, $F_{\text{ПСЕ}}$, виконані при $\epsilon_{\text{МК}}$: 0,1 %, 0,2 %, 0,3 %, 0,4 %, 0,5 %. Результати розрахунків $F_{\text{ЦСЕ}}$, $F_{\text{ПСЕ}}$, $F_{\text{дк}}$ зведені в табл. 2.1.

В другому варіанті конструкції кабелю взято ЦСЕ із склопластикового стержня типу «Neptco» діаметром 2 мм. В якості ПСЕ розглянемо 6 арамідних ниток типу «Twaron» D2200-2420. Для обчислення розтягувальних зусиль $F_{\text{дк}}$, $F_{\text{ЦСЕ}}$, $F_{\text{ПСЕ}}$, які спроможна витримувати така конструкція кабелю, використані вирази, відповідно: $F_{\text{дк}} - (1.2)$, $F_{\text{ЦСЕ}} - (2.13) \dots (2.14)$; $F_{\text{ПСЕ}} - (2.18) \dots (2.21)$.

В другому варіанті конструкції кабелю розрахунки розтягувальних навантажень виконані при тих же значеннях $\epsilon_{\text{МК}}$ від 0,1 до 0,5 %.

Розрахунки $F_{\text{дк}}$, $F_{\text{ЦСЕ}}$, $F_{\text{ПСЕ}}$ виконані при $\epsilon_{\text{МК}}$: 0,1 %, 0,2 %, 0,3 % та 0,5 %. Результати розрахунків $F_{\text{ЦСЕ}}$, $F_{\text{ПСЕ}}$, $F_{\text{дк}}$ зведені в табл. 2.2.

Проведені розрахунки показали, що в умовах незначного видовження кабелю (до 0,5 %) для отримання більшого значення $F_{\text{дк}}$ доцільно використовувати в якості ЦСЕ сталевий дріт, а в якості ПСЕ – арамідні нитки типу «Twaron» D-2200-2420 з більшою лінійною густиною. Так як такий ЦСЕ в комбінації з ПСЕ дає можливість досягти значення розтягувального зусилля 5140 Н, що значно більше, ніж використання в якості ЦСЕ склопластикових стержнів та арамідних ниток з меншою лінійною густиною в ПСЕ.

Оскільки застосування сталевих дроту має певні обмеження, то при подовженні кабелю більше 0,5 % потрібно застосовувати в якості ЦСЕ склопластикові стержні. Таким чином:

1. В даному підрозділі розроблено теоретичні підходи до забезпечення конструктивної стійкості підземних оптичних кабелів до розтягувальних навантажень, яке сприймають на себе ЦСЕ із сталеної проволочки або

Таблиця 2.1 – Результати розрахунків розтягувальних навантажень $F_{\text{ЦСЕ}}$, $F_{\text{ПСЕ}}$, $F_{\text{дк}}$ (Н) першого варіанту конструкції ОК в залежності від видовження кабелю (%)

Силовий елемент ОК	Розтягувальне навантаження (Н) при видовженні кабелю, %				
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Центральний (із сталі)	628	1256	1884	2512	3140
Периферійний (із арамідних ниток типу «Twaron» D2200-8050)	375	751	1126	1501	2000
Комбінований	1003	2007	3010	4013	5140

Таблиця 2.2 – Результати розрахунків розтягувальних навантажень $F_{\text{ЦСЕ}}$, $F_{\text{ПСЕ}}$, $F_{\text{дк}}$ (Н) другого варіанту конструкції ОК на ЦСЕ в залежності від видовження кабелю (%)

Силовий елемент ОК	Розтягувальне навантаження (Н) при видовженні кабелю, %				
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Центральний (зі склопластика)	157	314	471	628	800
Периферійний (із арамідних ниток типу «Twaron» D2200-2420)	234	468	702	936	1200
Комбінований	391	782	1173	1564	2000

склопластикового стержня та периферійний одношаровий або багатшаровий силовий елемент із сталеві проволочи або склопластикового стержня чи арамідних ниток «Twaron».

2. Представлені теоретичні підходи щодо забезпечення конструктивної стійкості підземних ОК до розтягувальних навантажень може бути використана при розробці нормативного документу з конструювання механічної міцності кабелів.

2.2.3.2 Визначення передавальних параметрів ОК на основі загальних вимог до ВОЛЗ

Як відмічалось, у пункті 2.2.1 «Загальні положення з проєктування та розробки ОК» конструкції ОК повинні забезпечувати їх стійкість до механічних, температурних та інших впливів при будівництві та експлуатації ВОЛЗ. При цьому, значення передавальних параметрів ОК під дією впливових факторів на кабель повинні бути стабільними та не повинні виходити за встановлені норми впродовж терміну його служби [86, 89].

При конструюванні ОК необхідно враховувати загальні вимоги, що пред'являються до ВОЛЗ в цілому з точки зору забезпечення заданої якості зв'язку [89]. При виборі передавальних параметрів ОК необхідно, щоб кабель даного типу, призначений для використання на лініях до певної довжини, в першу чергу, мав коефіцієнт загасання, що забезпечує задану довжину регенераційної або підсилювальної ділянки [90, 91]. Крім того, дисперсія сигналу у вибраному ОК забезпечувала б передачу сигналу з мінімально допустимим розширенням імпульсів [92 – 97].

Максимально допустимі втрати в кабельній лінії ($\alpha_{\text{ОК}} l_{\text{р(п)}}$) розраховуються [34], виходячи зі швидкості передачі, ймовірності помилки, характеру сигналу, числа периферійних пристроїв та відстані між ними, типів джерела світла та фотоприймача, втрат на введенні випромінювання при стикуванні, числа з'єднань у лінії та їх характеру (рознімні або нерознімні), допусків на температурні зміни

та на погіршення характеристик компонентів системи у часі:

$$\alpha_{OK} l_{p(n)} = \alpha_{OB} k_{OB} l_{p(n)} \leq (P_{пер} - P_{пр} - \alpha_{введ} - \alpha_{вив} - n_n \alpha_n - n_p \alpha_p - \alpha_k - \Delta\alpha_t - \Delta\alpha_l - \alpha_z) / l_{p(n)}, \quad (2.22)$$

де α_{OK} – коефіцієнт загасання в кабелі, дБ/км; $l_{p(n)}$ – довжина регенераційної (підсилювальної) ділянки; α_{OB} – коефіцієнт загасання ОВ, дБ/км; k_{OB} – коефіцієнт спірального укладання ОВ в трубі оптичного модуля; $P_{пер}$ – повна ефективна потужність випромінювання, дБм; $P_{пр}$ – мінімальна потужність випромінювання на прийомі, дБм; $\alpha_{введ}$ і $\alpha_{вив}$ – втрати на введення випромінювання в ОВ та виведення із нього, відповідно, дБ; n_n і n_p – кількість нерознімних і рознімних з'єднань ОВ, шт; α_n і α_p – загасання, що вноситься в нерознімному та рознімному з'єднаннях, дБ; α_k – загасання в інших компонентах оптичної лінії зв'язку (розгалужувачі, відгалужувачі, перемикачі та ін.), дБ; $\Delta\alpha_t$ – допуск на температурні зміни коефіцієнта загасання кабелю, дБ; $\Delta\alpha_l$ – допуск на погіршення якості компонентів з часом, дБ; α_z – запас за потужністю випромінювання на непередбачувані обставини, дБ.

З перерахованих вище параметрів майже всі відомі і задаються в процесі проектування лінії: $P_{пер}$ та $P_{пр}$ – задані паспортними характеристиками обладнання; $\alpha_{введ}$, $\alpha_{вив}$, n_n , n_p , α_n , α_p , α_k , $\Delta\alpha_t$, $\Delta\alpha_l$, α_z – задані технічним завданням згідно ДСТУ.

Довжина регенераційної ділянки ВОСП у багатьох випадках може відрізнятись (у більшу сторону) через способи прокладання ОК. Якщо прокладання фіксоване, тобто прокладання ОК в будівлі, кабельних каналах невеликого діаметру, кабельній каналізації, то довжину траси і довжину ОК можна вважати рівними, і коефіцієнт загасання залежатиме від температури навколишнього середовища:

$$\alpha_{OK}(t) = \alpha_{OB} \cdot k_{OB} (1 + \alpha_0), \quad (2.23)$$

де $\alpha_{OK}(t)$ – коефіцієнт загасання при температурі навколишнього середовища, дБ/км; α_{OB} – коефіцієнт загасання ОВ, дБ/км; k_{OB} – коефіцієнт спірального укладання ОВ в трубі оптичного модуля; α_0 – еквівалентний температурний коефіцієнт лінійного розширення кабелю, 1/К.

Довжина ділянки регенерації ВОСП з організацією зв'язку на одній несучій (λ_p) обмежується двома чинниками: загасанням і розширенням імпульсу в обладнанні та ВОЛЗ. При проєктуванні необхідно виконати два розрахунки та в якості довжини ділянки регенерації l_p вибрати найменше значення. Таким чином, передача інформації з потрібною якістю на регенераційній ділянці ВОЛЗ без оптичних підсилювачів, враховуючи втрати і дисперсійні спотворення, забезпечується за рахунок запасу потужності (чистого бюджету потужності, що нормуються на елементарну кабельну ділянку (ЕКД)), рівної різниці між енергетичним потенціалом ВОСП (загасання, що перекидає) і затратами оптичної потужності на втрати і придушення завад й спотворень оптичних імпульсів в лінії.

Відповідно до вимог НТД [3] при проєктуванні ВОЛЗ визначають значення номінальної, мінімальної й максимальної довжини елементарної кабельної ділянки. Ці довжини ЕКД визначаються бюджетом потужності ВОСП, втратами й дисперсією обладнання та ВОЛЗ. Вони розраховуються за наступними виразами [3, 39]:

$$L_{\text{нома}} = \frac{W - A_{\text{езо}} - \alpha_p - \alpha_d + \alpha_{\text{нзмакс}} - A_{\text{езк}} - \Delta\alpha}{\alpha_{\text{макс}} + \alpha_{\text{нзмакс}} / \bar{l}}, \quad (2.24)$$

$$L_{\text{міна}} = \frac{W - \Delta A - \alpha_p + \bar{A}_{\text{нз}}}{\bar{\alpha}_{\text{ОВ}} + \bar{A}_{\text{нз}} / \bar{l}}, \quad (2.25)$$

$$L_{\text{макса}} = \frac{W - A_{\text{езо}} - \alpha_p - \alpha_d - \bar{B}\sqrt{L_{\text{ном}}} + \bar{A}_{\text{нз}} - A_{\text{езк}} - \Delta\alpha}{\bar{\alpha}_{\text{ОВ}} + \bar{A}_{\text{нз}} / \bar{l}}, \quad (2.26)$$

де $L_{\text{нома}}, L_{\text{міна}}, L_{\text{макса}}$ – номінальна, мінімальна і максимальна довжини ЕКД, км; W – енергетичний потенціал системи передавання, дБ; $A_{\text{езо}}$ – експлуатаційний запас втрат обладнання, дБ; α_p – втрати в (n_p) рознімних з'єднаннях, дБ; $\alpha_{\text{нзмакс}}$ – максимальне значення втрат в нерознімному з'єднанні, дБ; $A_{\text{езк}}$ – експлуатаційний запас втрат кабелю, дБ; $\Delta\alpha$ – похибка вимірювання загасання, дБ; $\alpha_{\text{макс}}$ – максимальне значення коефіцієнта загасання ОВ, дБ/км; $\bar{l}$ – середня будівельна довжина ОК, км; ΔA – границя регулювання АРП, дБ; $\bar{\alpha}_{\text{ОВ}}$ – середнє значення коефіцієнта загасання ОВ, дБ/км; $\bar{\alpha}_p$ – середнє значення втрат

рознімного з'єднання, дБ; α_d – експлуатаційний запас енергетичного потенціалу на дисперсію, який враховується на регенераційних ділянках граничної довжини з оптичними підсилювачами, дБ; $\alpha_{\max}$ – максимальне значення коефіцієнта загасання ОВ, дБ/км; $\bar{B}$ – проміжний параметр, що розраховується згідно [3, 39].

Чистий бюджет потужності ЕКД визначається за виразом:

$$A_{\text{чбп}} = W - A_{\text{ЕКД}} - \sum \alpha_{\text{доп}_i}, \quad (2.27)$$

де $A_{\text{чбп}}$ – чистий бюджет потужності на ЕКД, дБ; W – енергетичний потенціал системи передавання, дБ; $A_{\text{ЕКД}}$ – загасання сигналу на ЕКД спільно зі станційними кабелями (патчкордами), дБ; $\sum \alpha_{\text{доп}_i}$ – сумарне значення додаткових втрат, дБ.

Допустимий – сумарний експлуатаційний запас на ВОЛЗ складається із:

$$A_{\text{ездоп}} = (A_{\text{езо}} + A_{\text{езк}}), \quad (2.28)$$

де $A_{\text{ездоп}}$ – сумарний експлуатаційний запас, дБ; $A_{\text{езо}}$ – експлуатаційний запас втрат обладнання, дБ; $A_{\text{езк}}$ – експлуатаційний запас втрат кабелю, дБ.

Для нормальної роботи ВОЛЗ необхідно, щоб експлуатаційний запас із чистого бюджету потужності на ЕКД $A_{\text{ез}}$ перевищував сумарний експлуатаційний запас. Тобто, виконувалась умова $A_{\text{ез}} > A_{\text{ездоп}}$. Це умова балансу бюджету потужності на ЕКД.

Разом із вказаними вище умовами довжина ЕКД повинна задовольняти вимогам за дисперсією [3]:

$$L_{\sigma} \leq \frac{0,25}{\bar{\sigma} \cdot B}, \quad (2.29)$$

де L_{σ} – довжина ЕКД за дисперсією, км; B – швидкість передачі на оптичному стику, біт/с; $\bar{\sigma}$ – середньоквадратичне значення погонної дисперсії ОВ, с/км.

Значення довжини регенераційної ділянки (ЕКД) вибирається як найменше з $L_{\max\sigma}$ та L_{σ} , розрахованих за формулами (2.26) і (2.29).

З урахуванням бюджету потужності між регенераторами ВОЛЗ $L_{\text{ЕКД}}$ повинна лежати в межах $L_{\min\alpha} \leq L_{\text{ЕКД}} \leq l_{p(n)}$.

Таким чином, розрахунок бюджету потужності ВОСП $A_{\text{бп}}$ і максимальної

дисперсії для ЕКД необхідно визначати за наближеними формулами [3, 4]:

$$A_{\text{бп}} = W - \alpha_{\text{н}} \cdot n_{\text{н}} - \alpha_{\text{р}} \cdot n_{\text{р}} - \alpha_{\text{ОК}} \cdot l_{\text{ЕКД}}; \quad (2.30)$$

$$\sigma_{\text{ЕКД}} = \sigma \cdot l_{\text{ЕКД}}; \quad (2.31)$$

$$\sigma_{\text{макс}} = \sigma_{\text{к}} \cdot \Delta\lambda, \quad (2.32)$$

де $A_{\text{бп}}$ – бюджет потужності ВОСП, дБ; W – енергетичний потенціал системи передавання, дБ; $\alpha_{\text{н}}$ і $\alpha_{\text{р}}$ – загасання в нерознімному і рознімному з'єднаннях, відповідно, дБ; $n_{\text{н}}$ і $n_{\text{р}}$ – кількість нерознімних і рознімних з'єднань ОВ, шт; $\alpha_{\text{ОК}}$ – коефіцієнта загасання ОК, дБ/км; $l_{\text{ЕКД}}$ – довжина елементарної кабельної ділянки, км; $\sigma_{\text{ЕКД}}$ – дисперсія на елементарній кабельній ділянці, пс; σ – погонна дисперсія, пс/км; $\sigma_{\text{макс}}$ – максимальне значення дисперсії, пс/км; $\sigma_{\text{к}}$ – коефіцієнт дисперсії, пс/(км·нм); $\Delta\lambda$ – ширина спектра випромінювання лазера, нм.

Отримане значення чистого бюджету потужності на ЕКД порівнюється з нормовано-мінімальним допустимим значенням потужності для виконання умови (2.22), а $\sigma_{\text{ЕКД}}$ – зі значенням $\sigma_{\text{макс}}$ [3, 4, 34, 39]. При цьому необхідно, щоб $\sigma_{\text{макс}} > \sigma_{\text{ЕКД}}$.

2.2.4 Обґрунтування шляхів створення високонадійних конструкцій оптичних кабелів

Технічний стан ОК як у момент постачання замовнику, так і на будь-якому етапі експлуатації визначається одним із основних показників його якості – експлуатаційною надійністю. Тому проблема створення високонадійних оптимальних конструкцій оптичних кабелів зв'язку включає в себе комплекс задач, з'єднаних ідеєю систематичного та цілісного підходу до вдосконалення теоретичних основ їх конструювання, а також технології та обладнання для їх виготовлення, контролю якості та експлуатації.

Найважливішими шляхами створення високонадійних конструкцій ОК є забезпечення: заданих параметрів якості, в першу чергу, параметрів надійності; стабільності характеристик передавання ОВ при впливі на кабель зовнішніх

впливових факторів середовища експлуатації (кліматичних та механічних); у сучасних конструкціях ОК ці шляхи, насамперед, реалізуються забезпеченням запасу (збиткової довжини) волокна у кабелі, підбору необхідних матеріалів елементів і розрахунку їх оптимальних геометричних розмірів за необхідною економічною доцільністю;

Задача забезпечення конструкцією ОК його стійкості до ЗВФ полягає, як відмічено в першому розділі роботи, у визначенні жорсткої деформації її елементів, яка враховує його поздовжні деформації за рахунок радіального переміщення спірально розташованих елементів осердя у радіальному напрямі.

Отже при проєктуванні ВОЛЗ вибір типу ОК залежить від його конструкції та надійності. Таким чином, створена високонадійна конструкція ОК забезпечить при доцільному проєктуванні та належній експлуатації термін служби ВОЛЗ.

2.3 Розробка методів багатокритеріальної оптимізації конструкцій оптичних кабелів

2.3.1 Розробка методу оптимізації осердя багатомодульної моделі конструкції ОК

Обґрунтування необхідності методу. Як відомо, для передачі сигналів зв'язку в певних напрямках та на задані відстані необхідно використовувати оптичні кабелі із заданим числом оптичних волокон, що забезпечить велику пропускну інформаційну здатність для більшого числа працюючих ВОСП.

На сьогодні для вирішення проблеми забезпечення пропускну здатності ВОЛЗ, як правило, виробляються ОК модульного типу (повивного скручування), що містять невелике число (до 12) одномодових волокон з малим коефіцієнтом загасання для транспортних електронних комунікаційних мереж, а кабелі для розподільних мереж – до 144 волокон як одномодових, так і багатомодових залежно від відстаней між сегментами мережі. Волокна в маловолоконних ОК поміщаються в оптичні модулі різного діаметра, що заповнені гідрофобним

заповнювачем. У такому ОК осердя містить, зазвичай, від 2 до 18 ОМ або ОМ та певну кількість заповнювальних елементів, які спіралью укладаються навколо ЦСЕ, що виготовляється зі склопластикового стержня або сталевго троса в поліетиленовій оболонці. Діаметр ЦСЕ залежить від кількості елементів першого повиву осердя.

Особливе місце в кабельній техніці займають ОК багатомодульної конструкції та конструкції з профільованим осердям, які містять достатньо велике число ОВ (до 1000 і більше) [98 – 101]. Такі ОК можуть застосовуватися для побудови оптичних мереж абонентського доступу та забезпечення інтеграції технологій «волокно в дім» та «волокно в квартиру» [102 – 107].

Як відмічалось у розділі 1 роботи, в даний час в ряді країн відсутні керівні нормативно-технічні документи та наукові публікації для розробки конструкцій ОК, а існуючі матеріали є «know how» фірм-виробників. Тому методи, методики та методичні аспекти розрахунку та оптимізації параметрів конструкцій ОК, вибору матеріалів їх елементів є надто актуальними і необхідними.

Метою розробки даного методу є оптимізація вибору та розрахунку конструктивних елементів осердя кабелів для абонентських ліній при зменшенні їх матеріаломісткості.

Теоретична складова методу. Розробка конструкції ОК проводиться, в першу чергу, шляхом вибору моделі кабелю, його складових елементів та розрахунку максимально допустимого розтягувального навантаження, $F_{\text{мд}}$, і відповідності його очікуваним значенням [4, 37, 40, 108 – 114].

Допустиме розтягувальне навантаження кабелю $F_{\text{дк}}$, яке забезпечуються лише силовими елементами (центральною та периферійною елементами у вигляді відповідно склопластикового стержня та арамідних ниток) можна визначити за виразом [4, 86, 112]:

$$F_{\text{дк}} = \varepsilon_{\text{дк}} E_{\text{сп}} S_{\text{ЦСЕ}} + \frac{\varepsilon_{\text{дк}}}{\sin \beta_1} E_{\text{ан}} S_{\text{ПСЕ}}, \quad (2.33)$$

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.

Вирази розрахунку $S_{\text{ЦСЕ}}$ та $S_{\text{ПСЕ}}$, що представлені у вигляді склопластикового стержня та повиву арамідних ниток, надано у формулах (2.12) та (2.19).

Розрахунок максимального допустимого розтягувального навантаження кабелю, $F_{\text{мд}}$, яке забезпечується силовими елементами та іншими елементами кабелю, проводиться за виразом (1.1).

Як відомо, ОВ в трубках ОМ та пазах профільованого осердя розташовуються по гелікоїді внаслідок усадки їх матеріалів при виготовленні кабелю.

Розрахунок допустимого відносного видовження одноповивного ОК, $\epsilon_{\text{дк}}$, тільки з урахуванням подовження уздовж його осі до початку прикладання механічних напруг до ОВ проводиться за виразом [4, 21, 86, 112]:

$$\epsilon_{\text{дк}} = -1 + \sqrt{1 + \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot R^2}{h^2} \cdot \left(\frac{2\Delta R}{R} - \frac{\Delta R^2}{R^2} \right)}, \quad (2.34)$$

де $\epsilon_{\text{дк}}$ – допустимого відносного видовження одноповивного ОК; R – радіус спірального укладання ОМ навколо ЦСЕ, мм; ΔR – відстань між ОВ (або пучком ОВ) і внутрішньою поверхнею стінки ОМ, мм; h – крок спірального укладання елементів (ОМ або ОМ та ЗЕ) осердя навколо ЦСЕ, мм.

Величини R та ΔR можна визначити за формулами (1.6) та (1.7).

Як відмічалось раніше, за такого $\epsilon_{\text{дк}}$ механічне навантаження до ОВ не прикладається і забезпечується стабільність його передавальних характеристик, а також механічна стійкість всього кабелю. Як правило, значення $\epsilon_{\text{дк}}$ знаходиться в межах (0,25...0,7) % [3, 4, 21, 86].

Як відмічалось у пункті 1.4.2, при подальшому розтягуванні ОК вздовж осі оптичне волокно починає витягуватися (випрямлятися) із гелікоїди в трубці ОМ до прямої лінії та прямувати до внутрішньої поверхні його стінки, оберненої до ЦСЕ. Подальше видовження ОВ понад $\epsilon_{\text{дк}}$ є припустимим до значення $\epsilon_{\text{дОВ}} = 0,25 \%$ [3, 4, 86, 112, 113].

Розрахунок максимального допустимого відносного видовження кабелю $\epsilon_{\text{МК}}$ з урахуванням допустимого відносного видовження ОВ $\epsilon_{\text{ДОВ}}$ проводиться за виразом (1.3).

Діаметр трубки ОМ, $d_{\text{ОМ}}$, потрібно вибирати виходячи з вимог до величини $F_{\text{ДК}}$, оскільки останнє залежить від величини відстані між оптичним волокном (або пучком ОВ) та внутрішньою поверхнею стінки трубки ОМ. Так, використовуючи (1.6), (1.7) та (2.34), після перетворень отримаємо квадратне рівняння [112]:

$$d_{\text{ОМ}}^2 (2p - 1) ((2p - 1) + 2k) - 2d_{\text{ОМ}} d_{\Sigma\text{ОВ}} (1 - k - 2p) + \frac{((\epsilon_{\text{ДК}} + 1)^2 - 1)h^2}{\pi^2} + d_{\Sigma\text{ОВ}}^2 = 0, \quad (2.35)$$

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 ЗЕ) в повиві кабелю; $\epsilon_{\text{ДК}}$ – допустиме відносне видовження кабелю; h – крок спірального укладання елементів осердя кабелю навколо ЦСЕ, мм; $d_{\Sigma\text{ОВ}}$ – діаметр пучка ОВ, що розміщується в трубці ОМ.

Коефіцієнт k можливо визначити для різної кількості елементів у повиві ОК виходячи із прямопропорційної залежності $d_{\text{ЦСЕ}}$ від $d_{\text{ОМ}}$. Значення коефіцієнта k при кількості елементів в повиві ОК від 3 до 12 наведені в табл. 1.2.

На практиці часто [3, 20, 31, 32, 88] застосовують в одноповивних моделях кабелів, як правило, п'яти- або шестиелементні конструкції ОК з діаметрами модулів 2,5; 2,7 і 3,0 мм та інколи з діаметрами 1,8; 2,0 мм. Згідно з [88, 112], рекомендована кількість волокон, які розміщені в ОМ з діаметром модульної трубки, наприклад, 3,0 мм, дорівнює 12. Проте, можливо розміщати й більшу кількість ОВ в ОМ, але при цьому буде зменшуватися величина допустимого відносного видовження кабелю. При цьому для забезпечення очікуваного значення $F_{\text{ДК}}$ необхідно буде в конструкції кабелю застосовувати більшу кількість, наприклад, арамідних ниток. Зменшення значення допустимого відносного видовження кабелю при збільшенні кількості ОВ в ОМ обумовлене

обмеженням у пересуванні ОВ усередині оптичного модуля.

Внутрішній діаметр трубки ОМ можна визначити за виразом [112]:

$$d_{\text{внОМ}} = d_{\text{ОМ}} - 2\Delta t_{\text{ОМ}}, \quad (2.36)$$

де $d_{\text{внОМ}}$ – внутрішній діаметр трубки оптичного модуля, мм; $d_{\text{ОМ}}$ – зовнішній діаметр трубки ОМ, мм; $\Delta t_{\text{ОМ}}$ – радіальна товщина стінки трубки ОМ, мм.

Розрахуємо значення діаметрів пучків ОВ в залежності від внутрішнього діаметр трубки ОМ $d_{\text{внОМ}}$ при діаметрі волокна в захисному покритті – 255 мкм. Результати розрахунків геометричних параметрів трубки ОМ з діаметрами від (1,8 до 3,0) мм та пучків з різною кількістю ОВ приведені в табл. 2.3.

З наведених у табл. 2.3 даних чітко видно, яку максимальну кількість ОВ можна розмістити в трубці ОМ певного діаметру.

Таким чином, використання конструкції ОК з діаметром $d_{\text{ОМ}} = 3,0$ мм є економічним. Проте, при цьому діаметр ЦСЕ повинен складати 5,8 мм (на відміну від значення $d_{\text{ЦСЕ}} = 2,7$ мм, які зазвичай використовуються при виробництві [31, 32, 88]), що є, очевидно, економічно не вигідним через значні витрати матеріалу на нього, збільшення діаметра ОК і, отже, значної витрати матеріалів на решту їх елементів. Крім того, гнучкість кабелю за такої конструкції викликатиме певні труднощі при його інсталяції.

Задачу розробки багатомодульних конструкцій ОК зі значною кількістю ОВ можна розв'язати застосовуючи багатоповивну структуру осердя кабелів, тобто розташовувати ОМ (або ОМ та заповнювальних елементів (ЗЕ) або ОМ та жили дистанційного живлення (ЖДЖ)) послідовно концентричними шарами (повивами) навколо ЦСЕ. Суміжні повиви з їх елементів повинні спіралью укладатися в протилежні сторони з метою надання кабелю осердю більшої механічної стійкості, а також для полегшення монтажу кабелів. При повивному спіральному укладанні кількість ОМ в кожному подальшому повиві збільшується на шість порівняно з попереднім згідно з «правилом шестірки» [4, 112].

Структуру осердя багатомодульних ОК на прикладі трьохповивного осердя кабелю показано на рис. 2.3.

Таблиця 2.3 – Результати розрахунків геометричних параметрів трубки ОМ та пучків ОВ

Геометричні параметри ОМ						
Діаметр трубки ОМ, d_{OM} , мм	1,8	2,0	2,5	2,7	3,0	
Радіальна товщина стінки ОМ, Δt_{OM} , мм	0,30	0,30	0,35	0,35	0,40	
Внутрішній діаметр ОМ, $d_{внОМ}$, мм	1,2	1,4	1,8	2,0	2,2	
Геометричні параметри пучків ОВ						
Кількість ОВ в пучку, шт	2	4	6	8	12	16
Діаметр пучка ОВ, $d_{\Sigma OV}$, мм (для $d_{ОВ} = 255$ мкм)	0,510	0,615	0,765	1,059	1,059	1,199

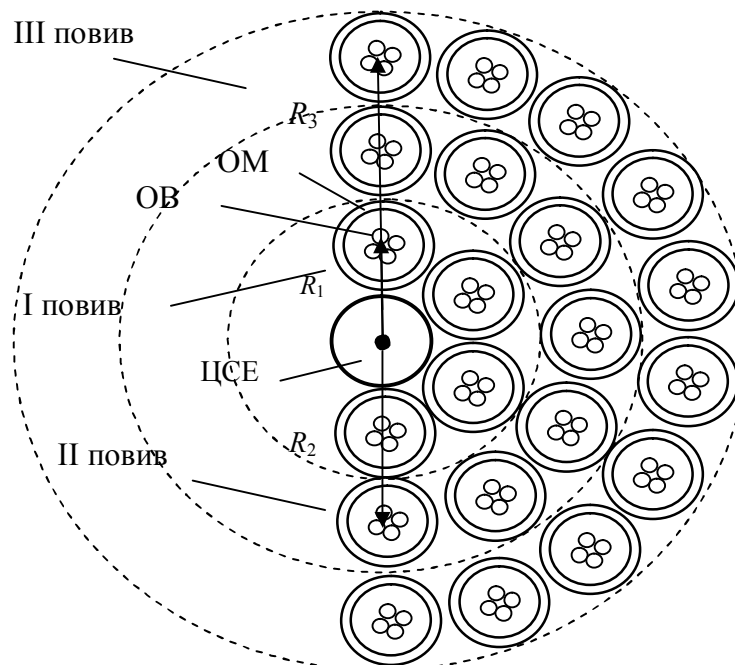


Рисунок 2.3 – Спіральне укладання ОМ навколо ЦСЕ в осерді багатоповивних ОК

Як показано вище, осердя багатомодульного кабелю має ОМ, кількість яких в кожному повиві залежатиме від геометричних розмірів ЦСЕ [3, 4, 21, 112].

Кількість ОМ повинна вибиратися з умови повного допустимого заповнення всіх трубок модулів ОВ та виходячи з його розміру (згідно виразу (2.35)) шляхом поділу необхідної кількості всіх ОВ, що поміщаються в ОК, на максимально допустиму кількість волокон в модулі.

Слід зазначити, що в класичній повивній конструкції кабелю можливі кілька варіантів розміщення елементів (ОМ та ЗЕ чи жил дистанційного живлення) в повивах. Так, кількість елементів в першому повиві визначається діаметром ЦСЕ.

При цьому, кожен повив елементів осердя ОК має свій радіус спірального укладання навколо ЦСЕ, що визначає величину допустимого відносного видовження цього повиву [53].

Згідно до [53] задля зменшення витрат матеріалів елементів кабелю у наступних після першого повивах пропонується збільшувати крок спірального укладання елементів h_i (при $i > 1$) цих повивів навколо попереднього. При виборі h_i слід прийняти значення відносного видовження повиву, рівного ε_1 першого повиву. При цьому зменшуються довжини ОВ та ОМ цих повивів, що вказує на зменшення витрат на їх матеріали.

Розрахунок кроку спірального укладання елементів i -го повиву при відомому значенні відносного видовження ОК за першим повивом ε_1 проводиться за формулою, отриманою аналітично з виразу (2.34) [112]:

$$h_{\text{пов}} = \sqrt{\frac{4\pi^2}{(\varepsilon_1 + 1)^2 - 1} (2 \cdot R_i \cdot \Delta R - \Delta R^2)}, \quad (2.37)$$

де $h_{\text{пов}}$ – крок спірального укладання елементів i -го повиву, мм; ε_1 – відносне видовження кабелю за першим повивом; R_i – радіус спірального укладання елементів i -го повиву, мм; ΔR – відстань між пучком ОВ та внутрішньою поверхнею стінки ОМ, мм.

Експериментальна складова методу. В якості прикладу, згідно до [112]

проведено результати розробки кількох моделей багатоповивних оптичних кабелів на 144, 216 та 288 ОВ. Запропоновані чотири моделі осердя цих ОК конструктивно відрізняються кількістю ОВ, повивів та діаметрами трубок ОМ (табл. 2.4) і створюють можливість оптимізації багатомодульної конструкції осердя моделей.

Для оцінки величини механічної міцності кабелів, що розроблюються, за виразами (1.1), (2.33), (2.34) були розраховані значення $\epsilon_{\text{дк}}$ за його повивами та $F_{\text{мд}}$. За даними розрахунками було прийнято: крок спірального укладання елементів першого повиву $h_1 = 90$ мм, модуль Юнга склопластикових стержнів $E_{\text{сп}} = 50\,000$ Н/мм², модуль Юнга арамідних ниток $E_{\text{ан}} = 104\,000$ Н/мм², кількість арамідних ниток типу «Тwaron» D1052-8050 в повиві ПСЕ – 18, щільність та лінійна щільність арамідних ниток відповідно 1,45 г/см³ та 8750 дтекс.

Як видно з результатів розрахунку, наведених у табл. 2.4, допустимі відносні видовження ОК за першими повивами усіх розроблених моделей менші, ніж відносні видовження наступних повивів. Більше значення максимального видовження наступних після першого повивів обумовлене більшим радіусом вигину оптичного модуля, що створює більшу надлишкову довжину ОВ в ОМ та одночасно потребує більших витрат їх матеріалів.

Як приклад, за формулою (2.37) були розраховані h_i другого та третього повивів моделей осердя багатоповивного ОК при значеннях R (від 1,8 до 3,0) мм, результати яких наведені в табл. 2.5.

Аналіз результатів досліджень. Результати розрахунків моделей розроблених багатомодульних ОК показав, що забезпечення максимального відносного видовження 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, в першу чергу, на СЕ кабелю. Тому розрахунок $F_{\text{дк}}$ необхідно проводити за параметрами першого повиву ОК.

Як видно з проведених розрахунків кроків спірального укладання повивів, наведених в табл. 2.5, для отримання необхідного $\epsilon_{\text{дк}}$ необхідно збільшувати крок спірального укладання його елементів у наступних після першого повивах.

Таблиця 2.4 – Дані конструктивних параметрів осердя багатомодульних моделей ОК на 144, 216 та 288 ОВ

Параметри елементів осердя ОК		№ моделі			
		1	2	3	4
Кількість ОВ в ОК, шт		144	216	288	288
Діаметр ЦСЕ, $d_{\text{ЦСЕ}}$, мм		1,8	2,0	2,5	3,0
Діаметр трубки ОМ, $d_{\text{ОМ}}$, мм		1,8	2,0	2,5	3,0
Максимальна кількість ОВ в ОМ, $n_{\text{ОВ}}$, шт		4	6	8	16
Діаметр осердя моделі ОК, мм		17,1	18,5	22	19,5
Кількість елементів в повиві, шт	в І повиві	6 ОМ	6 ОМ	6 ОМ	6 ОМ
	в II повиві	12 ОМ	12 ОМ	12 ОМ	12 ОМ
	в III повиві	18 ОМ	18 ОМ	18 ОМ	–
Кількість ОВ в повиві, шт	в І повиві	$6 \times 4 = 24$	$6 \times 6 = 36$	$6 \times 8 = 48$	$6 \times 16 = 96$
	в II повиві	$12 \times 4 = 48$	$12 \times 6 = 72$	$12 \times 8 = 96$	$12 \times 16 = 192$
	в III повиві	$18 \times 4 = 72$	$18 \times 6 = 108$	$18 \times 8 = 144$	–
Допустиме відносне видовження кабелю, $\epsilon_{\text{дк}}$, %	за І повивом	0,23	0,28	0,41	0,67
	за II повивом	0,48	0,59	0,86	1,40
	за III повивом	0,74	0,89	1,30	–
Максимально допустиме розтягувальне навантаження кабелю, $F_{\text{мд}}$, Н		2915	3062	3628	4989

Таблиця 2.5 – Результати розрахунку кроку спірального укладання елементів другого та третього повивів багатоповивного ОК

Параметри моделей ОК		№ моделі			
		1	2	3	4
Допустиме відносне видовження кабелю, $\epsilon_{\text{дк}}, \%$	за I повивом	0,23	0,28	0,41	0,67
	за II повивом	0,48	0,59	0,86	1,40
	за III повивом	0,74	0,89	1,30	–
Крок спірального укладання повивів, $h_{\text{пов}}, \text{мм}$	за I повивом	90			
	за II повивом	131	131	131	130
	за III повивом	162	161	161	–

Порівняно з h_1 за першим повивом крок спірального укладання елементів наступних повивів h_i може збільшуватися понад 45 %.

Крім того, для визначення оптимальної за механічними та геометричними характеристиками моделі осердя ОК, необхідно враховувати технічні характеристики навивного обладнання підприємства-виробника кабелю, в першу чергу, за кроком спірального укладання елементів.

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 [112].

Рекомендації з використання результатів досліджень. Таким чином, для розробки оптимальної моделі модульної конструкції багатоповивних ОК за допустимими поздовжніми навантаженнями і кроками спірального укладання i -их повивів необхідно проводити вибір конструктивних елементів осердя кабелів у послідовності [112]: 1) вибрати кількість ОВ, що буде розміщуватися в кабелі, $n_{\text{ОВ}}$; 2) виходячи з загальної кількості ОВ, $n_{\text{ОВ}}$, та максимальної заповнюваності ОМ, розробити передбачувані моделі кабелю; 3) задатися конструктивними параметрами чергової моделі ОК (типом та розмірами силових елементів, діаметром та радіусом спірального укладання ОМ, кількістю

оптичних модулів та ЗЕ і ЖДЖ, кількістю повивів); 4) розрахувати кількість ОВ, що поміщаються в трубі ОМ; 5) розрахувати величину допустимого відносного видовження моделей кабелів, $\epsilon_{\text{дк}}$, за укладанням першого повиву за формулою (2.34); 6) виходячи зі значення $\epsilon_{\text{дк1}}$ за укладанням ОМ першого повиву розрахувати крок спірального укладання елементів інших повивів за формулою (2.37); 7) розрахувати величину $F_{\text{дк}}$ моделі кабелю та перевірити її відповідність очікуваним значенням; 8) у разі невідповідності максимально допустимого розтягувального навантаження кабелю очікуваним значенням необхідно повернутися до п. 3.

Висновки. Результати розробки методу оптимізації осердя багатомодульної моделі конструкції ОК дозволили дійти таких висновків:

1. У виконаних дослідженнях наведено розроблений метод оптимізації багатомодульної конструкції осердя моделей ОК, що можуть застосовуватися на оптичних мережах абонентського доступу. Як приклад, проведено розробку моделей багатомодульних конструкцій осердя ОК на 144, 216 та 288 ОВ.

2. В ході оптимізації багатомодульних конструкцій осердя ОК установлено, що розрахунок їх механічної міцності потрібно проводити за геометричними параметрами першого повиву з подальшим перерахунком (збільшенням) кроку спірального укладання елементів інших повивів задля зменшення матеріаломісткості кабелів.

3. Наведений метод оптимізації осердя моделі багатоповивного ОК модульної конструкції може бути використаний в кабельній промисловості для оптимального вибору та розрахунку його конструктивних елементів мереж абонентських ліній і зменшення їх матеріаломісткості, й, як наслідок, зниження собівартості.

2.3.2 Обґрунтування та оптимізація процесу прискореного вибору структури трьохповивного осердя ОК

Для забезпечення заданої пропускної здатності магістральних ліній

абонентських мереж зв'язку застосовуються ОК, що містять від 24 до 13000 і більше одномодових ОВ. Модульні конструкції осердя ОК мають різну структуру [31, 32, 112 – 114], тобто різну кількість та розміри елементів повивного скручування. Це забезпечує відмінність геометричних розмірів ЦСЕ та осердя кабелю в цілому.

В умовах ринкових відносин підприємства-виробники ОК зацікавлені в отриманні максимально можливого економічного ефекту від впровадження оптимальних конструкцій кабелів. Це викликає необхідність постійно удосконалювати оптимальних за конструкцією складових кабелю для мереж абонентського доступу, організації технологічних процесів при їх виготовленні, а також проведення необхідних наукових досліджень на етапі їх розробки з розв'язанням задачі мінімізації економічних витрат на його виробництво. Крім того, оптимальні конструкції ОК за масо-габаритними та економічними показниками при проектуванні та експлуатації ВОЛЗ будуть забезпечувати її ефективність, особливо, в умовах браку місця в міській кабельній каналізації зв'язку.

У відомих роботах [3, 4, 112, 113] показано послідовність розробки та метод розрахунку параметрів конструкції модульних багатоповивних ОК на основі лише шестиелементного осердя за критерієм мінімальної собівартості. Проте, досвід світових фірм-виробників кабелів [108 – 111] показує, що для проектування та виробництва сучасних економічно вигідних конструкцій ОК необхідно встановити зв'язок між структурою його осердя (кількістю та розмірами елементів скручування), кількістю ОВ в них та повною собівартістю кабелю. Це дозволить на етапі його проектування в залежності від області застосування та призначення кабелю вибирати структуру його осердя, виходячи з заданої кількості ОВ, та економити на матеріалах конструктивних елементів, забезпечуючи зменшення їх собівартості.

Тому, метою даного підрозділу є дослідження процесу вибору структури осердя модульного одно- та багатоповивного кабелю з одночасним забезпеченням необхідної ємності оптичними волокнами та мінімізації його

собівартості у цілому.

В загальному виді структура осердя ОК одноповивної модульної конструкції представлено на рис. 2.4.

Згідно [3, 21] діаметр центрального силового елементу в ОК одноповивного скручування з числом n елементів повиву (трубок ОМ або ЗЕ чи ЖДЖ), всі з яких мають діаметр $d_{\text{ОМ}}$ (рис. 2.4), може бути визначений як [4, 21]:

$$d_{\text{ЦСЕ}} = d_{\text{ОМ,ЗЕ}} \left(\sqrt{1 + \frac{1}{\sin^2 \theta} \left[\frac{1}{\sin^2 \frac{\pi}{n}} - 1 \right]} - 1 \right), \quad (2.38)$$

де $d_{\text{ЦСЕ}}$ – діаметр ЦСЕ, мм; $d_{\text{ОМ,ЗЕ}}$ – діаметр елементу повиву, мм; θ – кут спірального укладання n елементів повиву осердя ОК, рад; n – кількість елементів повиву, шт.

Діаметр осердя ОК визначається за виразом [4, 21]:

$$D = d_{\text{ОМ,ЗЕ}} \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{1}{\sin^2 \theta} \left[\frac{1}{\sin^2 \frac{\pi}{n}} - 1 \right]} + 1 \right), \quad (2.39)$$

де D – діаметр осердя ОК, мм; $d_{\text{ОМ,ЗЕ,ЖДЖ}}$ – діаметр елементу повиву (ОМ або ОМ та ЗЕ і ЖДЖ), мм; θ – кут спірального укладання n елементів повиву осердя ОК, рад; n – кількість елементів повиву, шт.

Використовуючи вирази (2.38) та (2.39) в [3, 21] отримані коефіцієнти, що показують зв'язок між кількістю елементів повиву в осерді ОК, та геометричними розмірами ЦСЕ $d_{\text{ЦСЕ}}$ та діаметром $d_{\text{ОМ,ЗЕ,ЖДЖ}}$.

Згідно [108 – 111], такі найбільш відомі світові фірми-виробники ОК як OFS, Fujikura, Sumitomo Electric LTD, Corning розміщують в конструкціях ОК кількість елементів, в основному, 4, 5, 6, 9 або 12 (табл. 2.6).

Як відмічалось раніше, згідно до закону «правильної скрутки» при повивному спіральному укладанні елементів осердя ОК їх кількість в кожному подальшому повиві збільшується на шість порівняно з попереднім. Винятком є те, коли в центрі розташовано один елемент, тоді в наступному повиві елементів більше на 5.

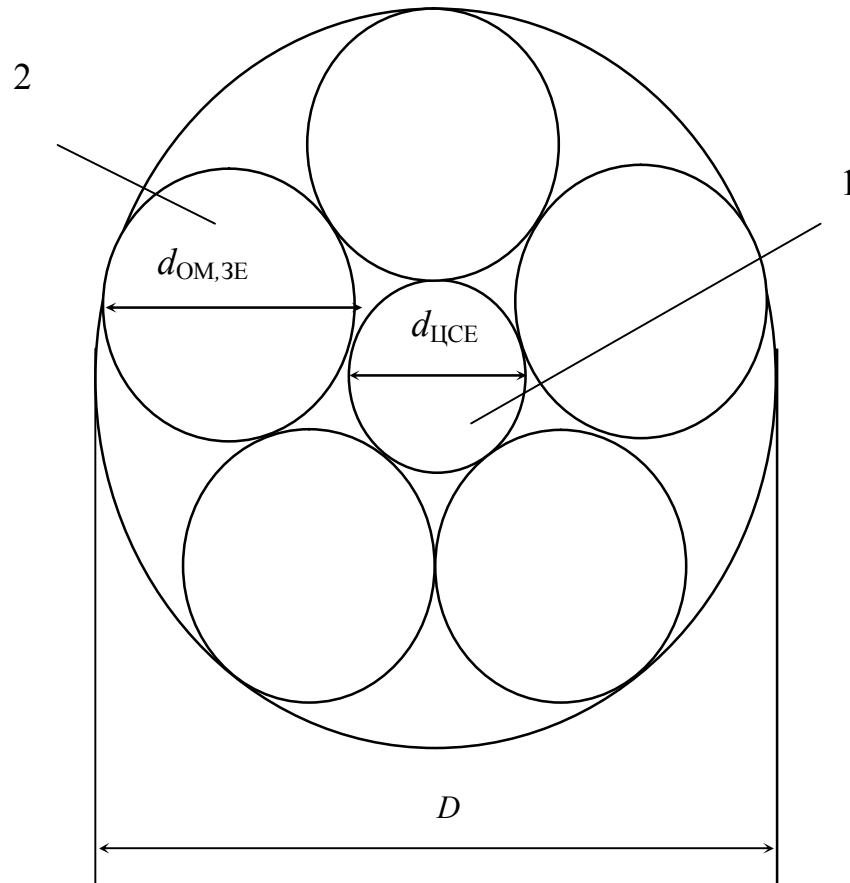


Рисунок 2.4 – Схема конструкції осердя ОК одноповивної структури:

1 – ЦСЕ; 2 – елемент повиву осердя ОК (ОМ або ЗЕ)

Таблиця 2.6 – Результати огляду конструкцій модульних осердь ОК найбільш відомих світових фірм-виробників

Фірма-виробник оптичних кабелів	Кількість елементів першого повиву ОК, шт.	Загальна кількість оптичних волокон в ОК з одно- та багатоповивною структурою, шт.
OFS	5, 6, 12	2...288
Fujikura	4, 5, 6, 12	6...576
Sumitomo Electric LTD	5, 6, 9, 12	2...288
Corning	6, 12	2...432

Це обумовлює різноманітність конструкцій осердя таких ОК не лише за кількістю та діаметром елементів повиву, а й за діаметром ЦСЕ (тобто можливістю ОК витримувати певні поздовжні механічні навантаження), діаметром всього повиву та кількістю елементів в подальших повивах. Загальна кількість та діаметр ОМ в осерді ОК обумовлює загальну ємність ОВ в кабелі, що, в свою чергу, визначає область його застосування.

Придатність конструкції ОК до застосування в різних умовах експлуатації (в ґрунті, в кабельній каналізації, на опорах повітряних ліній, в приміщеннях), що потребують забезпечення певних механічних навантажень визначаються згідно, наприклад [3, 4, 21, 40, 87, 89, 112 – 114], за величиною $F_{\text{дк}}$. Ці навантаження приймають за критерій $-\varepsilon_{\text{мк}}$ кабелю.

В роботі [112] доведено, що при розробці багатоповивної конструкції осердя кабелю за величиною $F_{\text{дк}}$ повинні визначатися геометричні параметри елементів першого повиву. Тобто, структура осердя ОК за першим повивом впливає на загальну ємність ОВ в кабелі, механічну міцність ЦСЕ, об'єм витратних матеріалів на елементи кабелю, що впливає на його собівартість.

Розрахунок собівартості ОК базується, в першу чергу, на визначенні маси його елементів та ціни їх матеріалів [113]. Основні конструктивні елементи ОК мають циліндричну форму та є суцільними стержнями (ОВ, ЦСЕ, ЗЕ, ЖДЖ) або трубчатими (трубка ОМ, захисний шланг).

Формули для розрахунку мас суцільних циліндричних та трубчатих конструктивних елементів ОК подані у пункті 2.3.3. У даному пункті, використовуючи вирази (2.38), (2.39), розроблено тридцять моделей структури осердя ОК з різною кількістю ОВ та ОМ чи іншими ЗЕ в першому повиві. Крім цього, передбачувані моделі можуть мати декілька повивів ОМ з певною кількістю ОВ в них та забезпечувати задану ємність кабелю.

В якості прикладу виконані розрахунки повної собівартості розроблених моделей ОК. В них було прийнято: діаметр ОМ $d_{\text{ОМ}} = 2,3$ мм з кількістю ОВ в кожному модулі $n_{\text{ОВ}} = 12$, діаметр ОВ в захисному покритті $d_{\text{ОВ}} = 0,255$ мм, крок спірального укладання елементів повивів $h_i = 90$ мм [112]. Щільності матеріалів

та напівфабрикатів, використаних при розрахунках, для конструктивних елементів ОК подані в табл. Б.2 Додатку Б та їх вартість відповідає цінам, використаним згідно до [22, 34, 114].

В моделях ОК прийнято припущення, що всі трубки ОМ мають повне заповнення, тобто містять по 12 ОВ.

В табл. 2.7 подані дані загальної кількості ОВ в ОК і повної собівартості від 1 до 3 повивних кабелів з різною структурою осердя [112 – 114].

На рис. 2.5 та рис. 2.6 показані отримані залежності повної собівартості ОК, C_{OK} , від кількості ОВ в ньому при різній структурі його осердя (кількості ОМ в першому повиві, кількості повивів в ОК) [114].

З рис. 2.5 видно, що зі збільшенням кількості ОМ від 4 до 12 в цих структурах осердя ОК його собівартість збільшується. Одержані залежності повної собівартості ОК від кількості ОВ в ньому є лінійними.

На рис. 2.6 показано залежність собівартості ОК від загальної кількості ОВ в ньому з різною кількістю повивів та елементів. Встановлено, що збільшення собівартості ОК за рахунок збільшення кількості трубок ОМ (а отже й загальної ємності ОВ в кабелі) від 3 до 12 в першому повиві в одноповивному осерді кабелю становить 66,8 %, в двухповивному – 86,6 %, в трьохповивному – 87 %.

Результати розрахунку собівартості ОК у відсотках означають, що зі збільшенням кількості повивів в кабелі зміни в структурі його осердя будуть приводити до більших матеріальних затрат на його виробництво.

Як видно з табл. 2.7 розроблені моделі ОК мають різну ємність ОВ та собівартість. Тому для кількісного порівняння ефективності застосування цих моделей пропонується ввести параметр-критерій економічної ефективності ОК за кількістю оптичних волокон, який буде характеризувати частину собівартості кабелю віднесеної до одного ОВ, тобто $\frac{C_{OK}}{n_{ОВ}}$ (табл. 2.8, рис. 2.7).

З табл. 2.8 та рис. 2.7 видно, що параметр-критерій економічної ефективності ОК зменшується при збільшенні кількості ОВ та ОМ в осерді кабелю. Таким чином, при збільшенні ємності ОВ в кабелі за рахунок створення

Таблиця 2.7 – Результати розрахунку повної собівартості одно- та багатоповивних конструкцій ОК з різною структурою осердя

Кількості ОМ в першому повиві	Кількість повивів в ОК					
	I		II		III	
	Загальна кількість ОВ $n_{ОВ}$, шт	Повна собівартість ОК $C_{ОК}$, грн	Загальна кількість ОВ $n_{ОВ}$, шт	Повна собівартість ОК $C_{ОК}$, грн	Загальна кількість ОВ $n_{ОВ}$, шт	Повна собівартість ОК $C_{ОК}$, грн
3	36	3550,4	144	5005,3	324	7460,3
4	48	3765,6	168	5422,8	360	8095,2
5	60	3990,9	192	5856,1	396	8752,1
6	72	4229,2	216	6304,9	432	9429,7
7	84	4479,5	240	6769,4	468	10128,4
8	96	4742,0	264	7249,7	504	10848,2
9	108	5017,3	288	7746,7	540	11590,4
10	120	5305,4	312	8260,3	576	12354,9
11	132	5606,7	336	8791,2	612	13142,6
12	144	5922,1	360	9340,3	648	13950,0

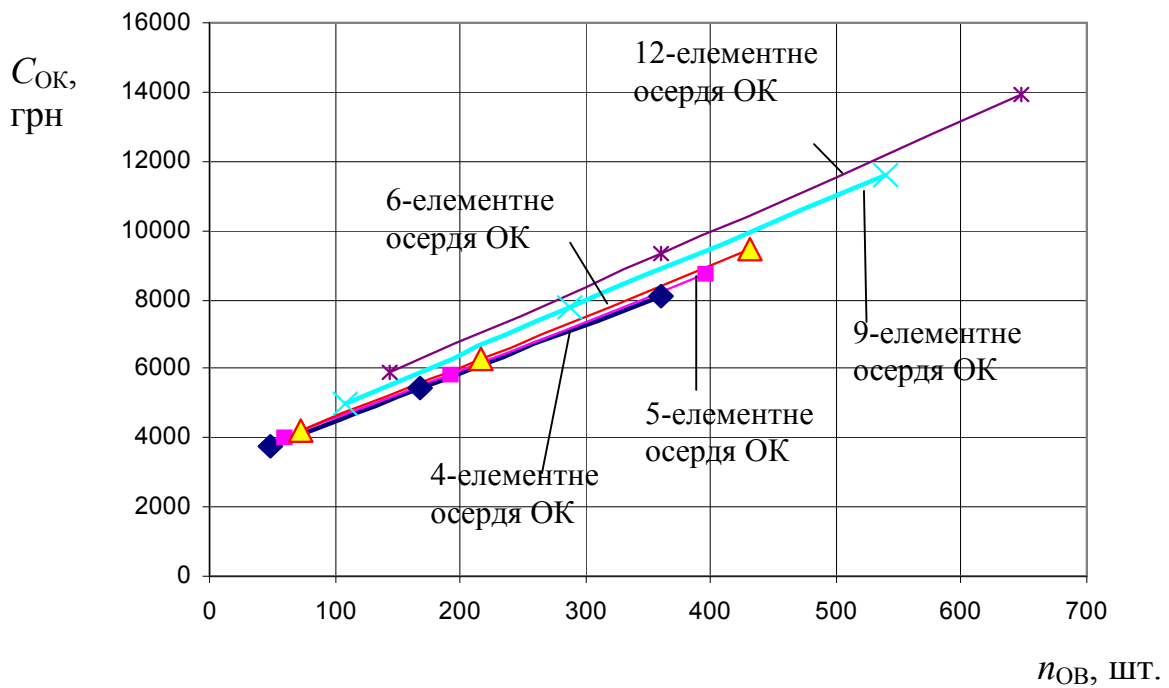


Рисунок 2.5 – Залежність повної собівартості ОК C_{OK} від кількості ОВ $n_{ОВ}$ для 4, 5, 6, 9 та 12-елементної структури осердя кабелю

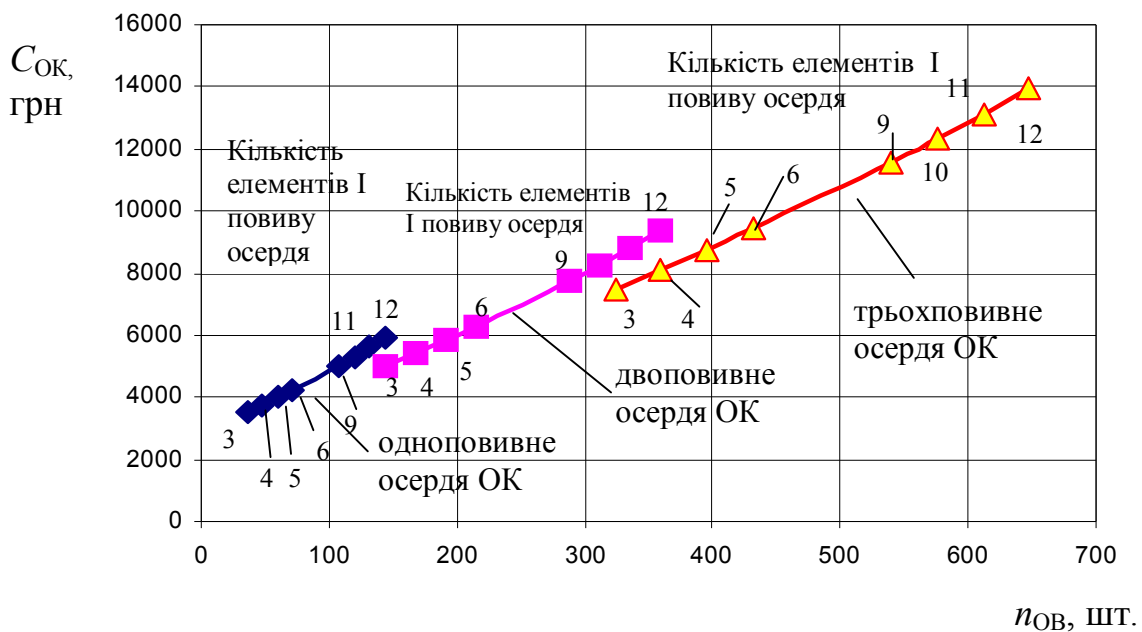


Рисунок 2.6 – Залежність повної собівартості ОК C_{OK} від кількості ОВ $n_{ОВ}$ для одно-, двух- та трьохповивної конструкції осердя кабелю

Таблиця 2.8 – Результати розрахунку параметра-критерія економічної ефективності конструкції ОК за кількістю оптичних волокон

Кількість повивів в осерді ОК, шт	Параметр-критерій економічної ефективності конструкції ОК за кількістю оптичних волокон $\frac{C_{OK}}{n_{OB}}$, грн/шт, при кількості ОМ					
	3	4	5	6	9	12
I	98,62	78,45	66,52	58,74	46,45	41,12
II	34,76	32,27	30,50	29,19	26,89	25,94
III	23,03	22,48	22,10	21,82	21,56	21,52

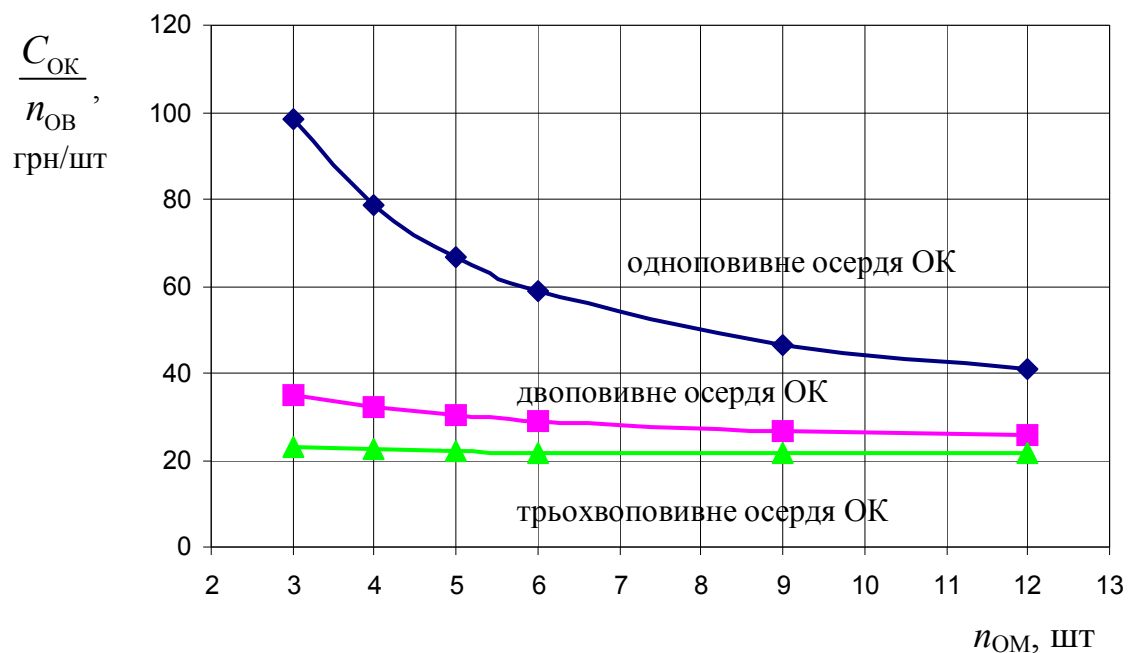


Рисунок 2.7 – Залежність параметра-критерія економічної ефективності конструкції ОК від кількості елементів першого повиву

додаткових трубок ОМ або повивів з оптичними модулями є можливість одержати багатоволоконну конструкцію ОК зі зменшеними витратами на одне оптичне волокно, тобто отримати більш економнішу структуру кабелю. Так, з рис. 2.7 видно, наприклад, що при застосуванні трьохповивного ОК параметр-критерій економічної ефективності стабілізується та перестає залежати від структури ОК та кількості ОВ в ньому.

Зміна параметра-критерія економічної ефективності кабелю за кількістю ОВ при зміні кількості ОМ в повиві від 3 до 12 становить для одноповивного осердя кабелю 58,3 %, для двохповивного – 25,4 %, для трьохповивного – 6,6 %.

Результати проведених в даному підрозділі досліджень процесу вибору модульної структури осердя ОК за економічною ефективністю в залежності від параметрів його конструктивних елементів дозволили зробити висновки:

1. В роботі згідно до [113, 114] одержано низку залежностей повної собівартості ОК з різною структурою від параметрів його конструкції (кількості ОВ, ОМ, повивів, тощо), що дозволяють на етапі проєктування кабелю прискорити обґрунтований вибір структури його осердя (кількість трубок ОМ в першому повиві, кількість ОВ в ОК, кількість повивів) з одночасним забезпеченням необхідної ємності ОВ та мінімізувати собівартість ОК.

2. В ході досліджень було встановлено, що:

- збільшення кількості трубок ОМ до максимального значення в першому повиві одно- та двоповивному осерді ОК є недоцільним, оскільки перехід до більшої кількості повивів з меншою кількістю ОМ в першому дозволить отримати більш економічну конструкцію кабелю при одночасному забезпеченні загального числа ОВ. Тому, використання в першому повиві одноповивного ОК 10, 11 та 12 елементів є економічно недоцільним, а в двоповивному ОК – 9, 10, 11 та 12 елементів. Це твердження справедливе при рівності d_{OM} ;

- збільшення кількості повивів та трубок ОМ в осерді ОК призводить до зменшення витрат на матеріали конструктивних елементів кабелю віднесеного на одне ОВ. А саме, в роботі встановлено, що для трьохповивної конструкції осердя ОК збільшення кількості волокон перестає спричиняти зміну параметра-

критерія економічної ефективності за кількістю ОВ, тобто мало впливає на збільшення собівартості кабелю.

3. Одержані результати, встановлені факти та твердження можна рекомендувати для застосування в процесі прискореного вибору структури осердя кабелю на етапі його проєктування з одночасним забезпеченням заданої ємності ОК оптичними волокнами і мінімізації повної собівартості.

2.3.3 Розробка методу оптимізації багатомодульної моделі конструкції ОК за критерієм мінімальної собівартості

Обґрунтування необхідності методу. Економічний розвиток країни повинен супроводжуватися стабільним підвищенням конкурентоспроможності політики в галузі виробництва новітньої якісної промислової продукції. Це вимагає постійного удосконалення організації технологічних процесів, а також проведення необхідних наукових досліджень на етапі розробки виробу з одночасною мінімізацією економічних витрат на його виробництво.

Як відмічалось в першому розділі, для забезпечення необхідної пропускної здатності ТЕКМ зв'язку в ряді країн, як правило, виробляються ОК модульного типу, що містять невелике число до 32 [31, 32] одномодових волокон. Вони в маловолоконних ОК поміщаються в ОМ різного діаметра, що заповнені гідрофобним заповнювачем. У такому ОК осердя містить зазвичай 5 – 6 ОМ або ОМ та ЗЕ [31, 32], які спіралью укладаються навколо ЦСЕ, що виготовляється зі склопластикового стержня або сталевго троса в поліетиленовій оболонці. Діаметр ЦСЕ залежить від кількості елементів першого повиву осердя [3].

Крім цього, фірми-виробники ОК у прайсах своєї продукції вказують на можливість виготовлення різних моделей їх багатомодульних конструкцій з набагато більшою кількістю ОВ, наприклад, ОК на 144 і на 216 волокон [31, 32]. Такі ОК призначені для побудови мережі абонентських ліній та забезпечення технології Fiber To The Build (волокно в будинок) та Fiber To The Home (волокно в квартиру) [112 – 114].

Методика розробки та розрахунку параметрів елементів таких багатоволоконних ОК наведена, наприклад, в [112 – 114, 116 – 119]. Проте з недоліків, що заважають впровадженню оптоволокна у дім та квартиру, є ще недостатньо низька повна собівартість ОК. Це вимагає розв'язання низки задач щодо, в першу чергу, оптимізації конструкцій ОК мереж абонентських ліній за критерієм мінімальної собівартості, що приводить до зменшення цін на матеріали елементів кабелю, собівартості робіт на виготовлення елементів, кількості відходів виробництва та інше.

Тому, метою розробки даного методу є оптимізація багатомодульної моделі конструкції ОК на основі теоретичних розробок, проведених в пунктах 2.3.1 та 2.3.2 за критерієм мінімальної собівартості.

Теоретична складова методу. Як предмет дослідження обрано двоповивну багатомодульну модель конструкції ОК, яка була розроблена в роботі [112] (рис. 2.8). Елементами такого ОК вибрані: ЦСЕ зі склопластикового стержня, оптичне волокно, його полімерне покриття ОВ, трубка ОМ, гідрофобний заповнювач ОМ, водоблокувальна стрічка, ПСЕ із арамідних ниток, захисний шланг.

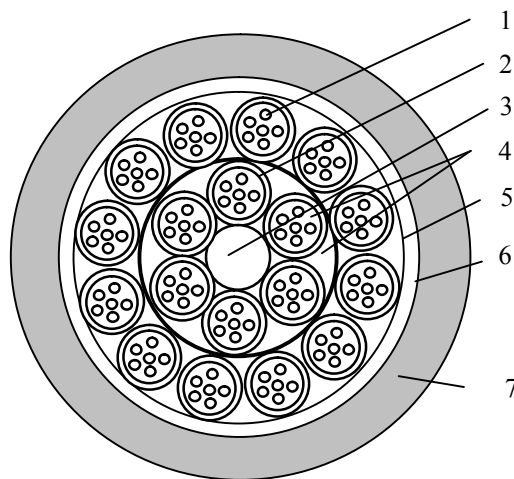


Рисунок 2.8 – Конструкція осердя двоповивного багатомодульного ОК: 1 – ОВ;
2 – трубка ОМ; 3 – ЦСЕ; 4 – заповнювальні компаунди; 5 – скріплювальний
елемент; 6 – ПСЕ (арамідні нитки); 7 – захисний шланг

Розрахунок собівартості ОК базується, в першу чергу, на визначенні маси

його конструктивних елементів та ціни матеріалу на їх виготовлення. Основні конструктивні елементи ОК мають циліндричну форму та є суцільними (ОВ, ЦСЕ, ЗЕ) або трубчатими (трубка ОМ, захисний шланг).

Вирази для розрахунку мас конструктивних елементів у загальному виді мають відповідно вигляд [113 – 115]:

$$M_{\text{стер}} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \gamma \cdot l \cdot K ; \quad M_{\text{тр}} = \pi \cdot D_{\text{сд}} \cdot \delta \cdot \gamma \cdot l \cdot K , \quad (2.40)$$

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

У формулу (2.40) для розрахунків $M_{\text{стер}}$ та $M_{\text{тр}}$ підставляються номінальні розміри елементів (без урахування допусків) та розраховується номінальні маси (без урахування відходів) [115].

Маса гідрофобного заповнювача ОМ кабелю довжиною в 1 км визначається за виразом [113 – 115]:

$$M_{\text{гз}} = \frac{\pi}{4} \left(D_{\text{внОМ}}^2 - d_{\text{ОВ}}^2 K_{\text{г}} n_{\text{ОВ}} \right) \gamma_{\text{гз}} l K_{\text{ОМ}} n_{\text{ОМ}} , \quad (2.41)$$

де $M_{\text{гз}}$ – маса гідрофобного заповнювача в усіх ОМ, кг; $D_{\text{внОМ}}$ – внутрішній діаметр ОМ, мм; $d_{\text{ОВ}}$ – діаметр ОВ, мм; $K_{\text{г}}$ – коефіцієнт гелікоїдального укладання ОВ; $n_{\text{ОВ}}$ – кількість ОВ в трубці ОМ, шт; $\gamma_{\text{гз}}$ – щільність матеріалу гідрофобного заповнювача, кг/мм³; l – довжина кабелю, приймається $l = 1$ км; $K_{\text{ОМ}}$ – конструктивно-технологічні коефіцієнти, що враховують спіральне укладання ОМ навколо ЦСЕ; $n_{\text{ОМ}}$ – загальна кількість ОМ в осерді ОК.

Масу арамідних ниток $M_{\text{ан}}$, кг, можна розрахувати за виразом [113]:

$$M_{\text{ан}} = LD \cdot n_{\text{н}} 10^{-4} , \quad (2.42)$$

де $M_{\text{ан}}$ – маса арамідних ниток, кг; LD – лінійна щільність арамідних ниток, дтекс; $n_{\text{н}}$ – кількість ниток в повиві ПСЕ, шт.

Далі за визначеними масами елементів кабелю, цінами на їх матеріали розраховуються вартості матеріалів, що йдуть на виготовлення окремих елементів і загальна вартість матеріалів усіх елементів кабелю. При цьому, значення цін на матеріали взяті орієнтовними, бо вони залежать від виробника та інших факторів.

Вартість елемента кабелю розраховується за виразом [113]:

$$C_{\text{ел}} = C_1 M \left(\frac{100 + K_{\text{в}}}{100} \right), \quad (2.43)$$

де $C_{\text{ел}}$ – вартість елемента ОК, грн/км; C_1 – вартість одного кілометра або одиниці матеріалу елемента кабелю, грн/кг; M – маса елемента, кг/км; $K_{\text{в}}$ – норма відходів на виготовлення елементів ОК, %.

Загальна вартість матеріалів та напівфабрикатів усіх елементів ОК визначається за виразом [113]:

$$C = \sum_{i=1}^n C_{\text{ел}i}, \quad (2.44)$$

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

З наведених вище виразів (2.43) та (2.44) видно, що зменшення загальної ціни кабелю можливо, в першу чергу, за рахунок зменшення маси його конструктивних елементів та покращення технології їх виготовлення при зменшенні норм відходів на елемент ОК.

Як відмічалось у пункті 2.3.1, розробка багатоповивної моделі конструкції осердя кабелю за величиною $F_{\text{дк}}$ повинна враховувати геометричні параметри елементів першого повиву. Виходячи з цього, в даному методі, в якості прикладу, проводиться оптимізація конструкції двоповивного ОК, що приведено на рис. 2.8, за рахунок зміни параметрів елементів другого повиву, а саме: збільшення кроку спірального укладання елементів, як це запропоновано в [113], та зменшення $d_{\text{ОМ}}$ та $n_{\text{ОВ}}$ в них.

Зменшення витрат матеріалів елементів ОК у другому повиві крок

спірального укладання його елементів h_2 можна збільшувати, поки відносне видовження кабелю за другим повивом буде більше, ніж за першим, тобто $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$.

Розрахунок h_2 при відомому значенні відносного видовження кабелю за першим повивом ε_1 проводиться за формулою [113]:

$$h_2 = \sqrt{\frac{4\pi^2}{(\varepsilon_1 + 1)^2 - 1} (2 \cdot R_2 \cdot \Delta R_2 - \Delta R_2^2)}, \quad (2.45)$$

де h_2 – крок спірального укладання елементів другого повиву, мм; ε_1 – відносне видовження кабелю за першим повивом; R_2 – радіус спірального укладання елементів другого повиву, мм; ΔR_2 – відстань між ОВ або пучком ОВ та внутрішньою поверхнею стінки ОМ другого повиву, мм.

Зменшення максимального діаметра ОМ другого повиву осердя ОК приводить до зменшення ε_2 за другим повивом, а також до збільшення кількості елементів у цьому повиві. Визначивши діаметр осердя ОК за першим повивом D_1 та, задавшись кількістю елементів у другому повиві, можливо розрахувати діаметр ОМ цього повиву [113]:

$$d_{OM2} = \frac{D_1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\sin^2 \theta_2} \left[\frac{1}{\sin^2 \pi/n_2} - 1 \right]} - 1}, \quad (2.46)$$

де d_{OM2} – діаметр ОМ в другому повиві ОК, мм; D_1 – діаметр осердя ОК за першим повивом, мм, $D_1 = d_{ЦСЕ} + 2d_{OM1}$; $d_{ЦСЕ}$ – діаметр ЦСЕ, мм; d_{OM1} – діаметр ОМ (або ОМ та ЗЕ) першого повиву, мм; θ_2 – кут спірального укладання елементів другого повиву, рад; n_2 – кількість елементів другого повиву ОК, шт.

Виходячи з отриманого значення d_{OM2} відносне видовження ОК за другим повивом ε_{k2} визначається за виразом [113]:

$$\varepsilon_{k2} = -1 + \sqrt{1 + \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot R_2^2}{h_2^2} \cdot \left(\frac{2 \cdot \Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_2^2}{R_2^2} \right)}, \quad (2.47)$$

де ε_{k2} – відносне видовження ОК за другим повивом; R_2 – радіус спірального

укладання елементів другого повиву, мм; h_2 – крок спірального укладання елементів другого повиву, мм; ΔR_2 – відстань між ОВ або пучком ОВ в трубці ОМ другого повиву та внутрішньою поверхнею його стінки, мм.

Вираз розрахунку величини ΔR наданий в літературі, наприклад [21, 112].

Радіус спірального укладання елементів другого повиву визначається за виразами [113]:

$$R_2 = \frac{d_{\text{ЦСЕ}} + 2d_{\text{ОМ1}} + d_{\text{ОМ2}}}{2} \quad \text{або} \quad R_2 = \frac{d_{\text{ОМ2}}(k+1)}{2}, \quad (2.48)$$

де R_2 – радіус спірального укладання елементів другого повиву, мм; $d_{\text{ЦСЕ}}$ – діаметр ЦСЕ, мм; $d_{\text{ОМ1}}, d_{\text{ОМ2}}$ – діаметри ОМ (або ОМ та ЗЕ) першого та другого повивів, відповідно, мм; k – коефіцієнт, який враховує кількість елементів в повиві.

Коефіцієнт k можливо визначити для різної кількості елементів у повиві виходячи із прямопропорційної залежності $d_{\text{ЦСЕ}}$ від $d_{\text{ОМ}}$. Значення коефіцієнта при кількості елементів першого повиву від 3 до 12 наведені в табл. 1.2.

Проте двоповивна конструкція осердя ОК потребує значення параметра k при більшій кількості елементів другого повиву. В табл. 2.9 подано значення параметра k при кількості елементів повиву, наприклад, від 13 до 22.

Таблиця 2.9 – Значення коефіцієнта k , який враховує кількість елементів в повиві осердя ОК

Кількість елементів у повиві, шт	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Значення коефіцієнта k	3,179	3,494	3,810	4,126	4,442	4,759	5,076	5,392	5,710	6,027

Експериментальна складова методу. У даному методі, використовуючи вищесказане та вирази (2.45)...(2.48), розроблено дві оптимізовані моделі двоповивного ОК на 144 ОВ – модель № II (зі збільшеним значенням h_2) та

модель № III (зі зменшеним діаметром ОМ другого повиву осердя) (рис. 2.9).

В якості прикладу, згідно теоретичної складової, проведено дослідження з оптимізації двох багатомодульних двоповивних моделей ОК. Дані конструктивних параметрів елементів моделі № I, що взята за основу розробок з [113] та двох розроблених моделей ОК, подані в табл. Б.3 Додатку Б. В цих моделях конструкцій двоповивного ОК прийнято: ОМ першого повиву містять 8 ОВ; а ОМ першого повиву моделі № III містять 6 ОВ; діаметр пучка з 8 ОВ $d_{\Sigma ОВ8} = 0,843$ мм [53]; діаметр пучка з 6 ОВ $d_{\Sigma ОВ6} = 0,765$ мм [53]; радіальна товщина стінки ОМ $\Delta t_{ОМ} = (0,15...0,2)d_{ОМ}$; кількість арамідних ниток типу «Тварон» D 1052-8050 – 12 шт [119]; радіальна товщина захисного шланга $\Delta t_{зш} = 1,6$ мм [113]. Щільність матеріалів усіх елементів ОК взяті з табл. Б.2 додатку Б; конструктивно-технологічні коефіцієнти та коефіцієнти обліку технологічних відходів взяті з [113]. Ціни на матеріали конструктивних елементів взяті з [113].

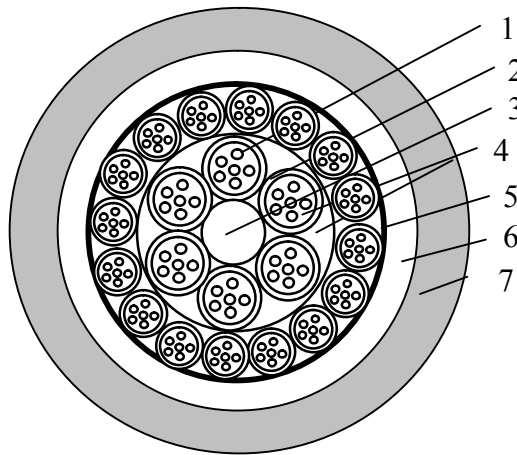


Рисунок 2.9 – Конструкція осердя оптимізованої моделі № III багатоповивного двоповивного ОК: 1 – ОВ; 2 – ОМ; 3 – ЦСЕ; 4 – заповнювальні компаунди; 5 – скріплювальний елемент; 6 – ПСЕ із арамідних ниток; 7 – захисний шланг

В табл. 2.10 наводяться дані розрахунку вартості матеріалів та напівфабрикатів конструктивних елементів розглянутих моделей ОК з урахуванням конструктивно-технологічних коефіцієнтів та коефіцієнтів технологічних відходів.

Таблиця 2.10 – Результати розрахунку вартості матеріалів та напівфабрикатів для конструктивних елементів трьох моделей ОК

№ з/п	Назва елемента ОК/ його сировина	Конструктивно- технологічний коефіцієнт / коефіцієнт обліку технологічних відходів		Од. вим	Ціна, грн.	Маси матеріалів елементів конструкції кабелю, кг			Вартість матеріалів та напівфабрикатів, в конструкції кабелю, грн.		
		назва	значе ння			Модель I	Модель II	Модель III	Модель I	Модель II	Модель III
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	ОВ/кварц- кварц	Коефіцієнт гелікоїдального укладання ОВ в ОМ (K_{Γ}) / норма відходів для ОВ при виготовленні ОК ($K_{\text{ОВ}}$)	1,029/ 0,055	кг	54,39	16,83	16,83	16,83	916,04	916,04	916,04
2	ОМ/ полібутилен- терефталат	-/норма відходів для ОМ ($K_{\text{ВЦМТ}}$)	- /0,061	кг	16,72	74,89	73,37	59,37	1253	1227	993,35

Продовження табл. 2.10

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
3	Гідрофобний заповнювач ОМ/ тиксотропни й гель	Коефіцієнт геліко-їдального укладання ОВ (K_r) / норма відходів	1,029/ 0,061	кг	44,99	31,09	30,46	26,40	1400	1371	1189
4	ЦСЕ/ склопластик овий стержень	-	-	кг	5,85	11,45	11,45	11,45	67,03	67,03	67,03
5	Водоблокую ча стрічка/ водо- блокуючий матеріал	Коефіцієнт укладання стрічок внаклад (K_c)/Норма відходів	- /0,061	кг	91,46	3,64	3,64	3,44	243,88	243,88	231,14

Закінчення табл. 2.10

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
6	ПСЕ/арамід-ні нитки	–/Норма відходів для кевларових ниток	- /0,015	кг	163,8	10,5	10,5	10,5	1720	2581	1720
7	Захисний шланг / поліетилен середнього тиску	–/норма відходів для захисного шланга ($K_{зш}$)	- /0,061	кг	7,27	70,87	70,87	63,79	515,57	515,57	464,02
8	Всього	—	—	—	—	219,27	217,20	191,78	6115,50	6061,40	5580,60

Аналіз результатів дослідження. На основі дослідження неоптимізованої моделі і проведеної оптимізації II та III моделей конструкції ОК з двухповивним осердям було визначено, що:

1. Багатомодульна неоптимізована модель двухповивної конструкції ОК у порівнянні з оптимізованими моделями має більші: діаметр кабелю, масу та вартість матеріалів та напівфабрикатів.

2. За конструктивними параметрами і вартістю матеріалів та напівфабрикатів оптимізовані моделі мають: діаметр кабелю моделі № III менший за діаметр моделі № II на 8,61 %; моделі кабелів мають $F_{\text{МК}}$ в 5469 Н; масу моделі № III кабелю (кг/км) меншу маси моделі № II на 13,25 % та вартість її матеріалів та напівфабрикатів (грн) меншу на 8,62 %.

Рекомендації з використання методу. За результатами проведених досліджень з оптимізації багатомодульних двухповивних моделей конструкцій ОК на етапі їх розробки для отримання ефективних результатів за масо-габаритними показниками і вартістю матеріалів та напівфабрикатів слід: зменшувати діаметр трубки ОМ у другому повиві кабелю та збільшувати крок спірального укладання елементів в ньому у порівнянні з кроком першого повиву.

Висновки. Результати розробки методу оптимізації багатомодульної двухповивної моделі конструкції ОК за критерієм мінімальної вартості дозволили: 1. Встановити, що оптимізація конструкції осердя двоповивного ОК за рахунок збільшення кроку спірального укладання елементів другого повиву (модель II) на 45 % (від 90 мм до 131 мм) дала можливість зменшити собівартість кабелю, порівняно з неоптимізованою конструкцією на 0,88 %, а за рахунок зменшення діаметра трубок ОМ в другому повиві (модель III) на 26 % (від 2,5 мм до 1,85 мм) – на 8,75 %. Це стверджує, що оптимізація конструкції осердя двоповивного ОК (модель № III) є рентабельною.

2. Рекомендувати виробникам кабельної продукції удосконалювати конструкції осердя двухповивного ОК з метою мінімізації їх собівартості.

3. Одержати 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) волоконно-оптичних систем передавання.

2.4 Розробка методу удосконалення вибору силових елементів при проєктуванні оптимальної конструкції оптичного кабелю

Обґрунтування необхідності методу. В дійсний час у відомих роботах з конструювання ОК, наприклад [3, 21, 34, 37, 64, 65, 86, 113], дослідження за даним напрямом з вибору СЕ кабелю висвітлені лише частково. Насамперед, повністю не досліджено як змінюються механічні параметри кабелю при виборі геометричного розміру ЦСЕ і конструкції ПСЕ із різних матеріалів [3, 21, 34, 40, 64]. Оптимізація конструкції, наприклад ДСОК, впливає на геометричні розміри та механічні параметри інших елементів кабелю [112]. Адже, відомо, що необхідне максимальне заповнення площі осердя кабелю його елементами – ЦСЕ, ОМ або ОМ та ЗЕ. Повивні складові осердя розміщені за принципом гексагональної укладки рівних за діаметром циліндричних елементів ОК, які торкаються один одного, але не мають спільних точок [65, 86, 112 – 114]. Спрощена конструкція ДСОК, наприклад, на базі рівних за діаметром елементів приведена на рис. 2.10. Вона використовується при виробництві ОК, наприклад, фірмами: OFS, Corning Inc, Fujikura Global, Sumitomo Electric, ПАТ «Одескабель» та інші [31, 32, 108 – 111].

Як показано в ряді підрозділів даної дисертації одним із шляхів оптимізації модульних конструкцій ОК являється вибір їх силових елементів. Останнє характеризується тим, що у задачу конструювання та вибору структури моделі кабелю входить забезпечення заданої механічної напруги в його елементах при забезпеченні граничнодопустимого розтягувального навантаження на ОВ. В результаті розробки моделі кабелю визначається найбільш оптимальні конструктивні рішення, за яких необхідні оптичні параметри і механічна міцність ОК забезпечуються найменшою матеріаломісткістю його елементів.

Одним із важливих механічних параметрів ОК, який визначає його придатність до експлуатації в певних умовах, є його $F_{\text{МК}}$. Воно визначається геометричними параметрами осердя моделі кабелю та фізичними властивостями СЕ. Для забезпечення значення $F_{\text{МК}}$ кабелю модульного типу використовуються, наприклад, в моделях самоутримного ОК, діелектричний ЦСЕ зі склопластикового стержня, ПСЕ із повиву арамідних ниток (рис. 2.10) [86, 122].

Науковий інтерес представляє дослідження оптимізації вибору силових елементів ОК з тим, щоб забезпечити значення його МДРН за найменших витрат на матеріали цих елементів.

У відомих роботах з конструювання ОК [3, 21, 34, 40] дослідження за даним напрямом з оптимізації вибору силових елементів ОК висвітлені лише частково. Насамперед не досліджено зв'язок між розтягувальними навантаженнями силових елементів ОК та їх параметрами ($d_{\text{ЦСЕ}}$, $n_{\text{ан}}$ ПСЕ) для різних варіантів структури кабелю.

В роботі [123] автора дисертації розроблено метод удосконалення вибору діелектричних СЕ осердя моделі конструкції оптичного кабелю.

Метою розробки даного методу є удосконалення вибору нових типів матеріалів для силових елементів ОК.

Теоретична складова методу. Метод реалізовано на одноповивній шести-елементній моделі конструкції ДСОК (рис. 2.10).

Максимально допустиме та допустиме розтягувальні навантаження ОК згідно до [86, 112] забезпечуються лише СЕ конструкції, визначаються за виразами (2.49) табл. 2.11. В цій таблиці приведені вирази для визначення довідкової бази з конструктивних та геометричних параметрів елементів осердя кабелю.

Із аналізу виразів (2.49) – (2.58) видно, що їх складові та геометричні параметри моделі осердя ДСОК, які впливають на величини $F_{\text{МК}}$, $F'_{\text{ДК}}$, є, в першу чергу, значення $\epsilon_{\text{МК}}$, $\epsilon_{\text{ДК}}$, модулів Юнга їх матеріалів та площі поперечного перетину СЕ. Крім того, на $F'_{\text{ПСЕ}}$ впливає кут спірального укладання арамідних ниток ПСЕ, залежним від радіусу спірного укладання навитих елементів, відстані

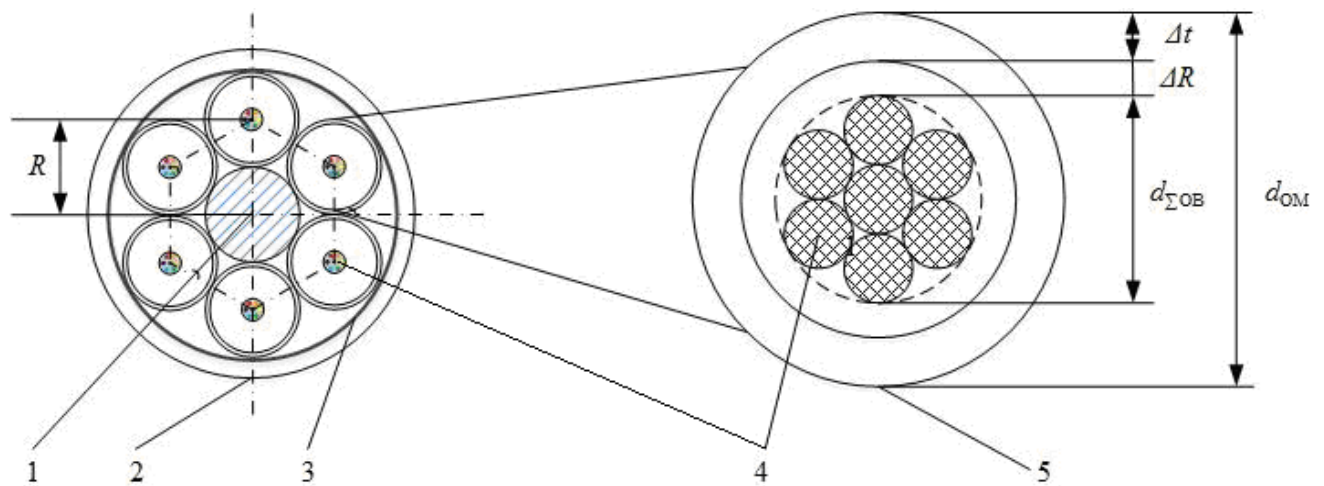


Рисунок 2.10 – Спрощена модель конструкції ДСОК: 1 – центральний силовий елемент; 2 – захисна оболонка; 3 – периферійний силовий елемент; 4 – оптичне волокно (пучок ОВ); 5 – трубка ОМ

Таблиця 2.11 – Розрахункові вирази для визначення конструктивних та геометричних параметрів елементів осердя кабелю

Число елементів у повиві, шт	Розрахункові вирази для визначення діаметра ЦСЕ, $d_{\text{ЦСЕ}}$, мм	Назва параметру	Вирази розрахунку конструктивних та геометричних параметрів осердя кабелю
1	2	3	4
3	$0,155 d_{\text{ел}}$	Максимально допустиме та допустиме розтягувальні навантаження, $F_{\text{МК}}$ та $F'_{\text{ДК}}$, кабелю за рахунок силових елементів ЦСЕ та ПСЕ, Н	$F_{\text{МК}} = F_{\text{ЦСЕ}} + F_{\text{ПСЕ}},$ $F'_{\text{ДК}} = F'_{\text{ЦСЕ}} + F'_{\text{ПСЕ}}$ (2.49)
4	$0,414 d_{\text{ел}}$	Максимально допустиме розтягувальне навантаження, що забезпечується ЦСЕ, $F_{\text{ЦСЕ}}$, Н Допустиме розтягувальне навантаження, $F'_{\text{ЦСЕ}}$, за рахунок ЦСЕ, Н	$F_{\text{ЦСЕ}} = \epsilon_{\text{МК}} E_{\text{сп}} S_{\text{ЦСЕ}}$ $F'_{\text{ЦСЕ}} = \epsilon_{\text{ДК}} E_{\text{сп}} S_{\text{ЦСЕ}}$ (2.50)

Закінчення табл. 2.11

1	2	3	4
5	0,701 $d_{\text{ел}}$	Максимально допустиме розтягувальне навантаження, що забезпечується ПСЕ, $F_{\text{ПСЕ}}$, Н Допустиме розтягувальне навантаження, $F'_{\text{ПСЕ}}$, за рахунок ПСЕ, Н	$F_{\text{ПСЕ}} = \frac{\varepsilon_{\text{МК}}}{\sin \beta} E_{\text{ПСЕ}} S_{\text{ПСЕ}} \quad (2.51)$ $F'_{\text{ПСЕ}} = \frac{\varepsilon_{\text{ДК}}}{\sin \beta} E_{\text{ПСЕ}} S_{\text{ПСЕ}}$
6	1,000 $d_{\text{ел}}$	Максимальне допустиме видовження кабелю, $\varepsilon_{\text{МК}}$, при заданому значенні допустимого видовження ОВ, $\varepsilon_{\text{ДОВ}}$	$\varepsilon_{\text{МК}} = \varepsilon_{\text{ДК}} + \varepsilon_{\text{ДОВ}} \quad (2.52)$
7	1,305 $d_{\text{ел}}$	Допустиме відносне видовження кабелю, $\varepsilon_{\text{ДК}}$	$\varepsilon_{\text{ДК}} = -1 + \sqrt{1 + \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot R^2}{h^2} \cdot \left(\frac{2 \cdot \Delta R}{R} - \frac{\Delta R^2}{R^2} \right)} \quad (2.53)$
8	1,613 $d_{\text{ел}}$	Радіус укладання елементів повиву осердя кабелю, R , мм	$R = \frac{d_{\text{ПСЕ}} + d_{\text{ОМ}}}{2} \quad (2.54)$
9	1,924 $d_{\text{ел}}$	Відстань між внутрішньою поверхнею стінки трубки ОМ та ОВ або пучком ОВ, ΔR , мм	$\Delta R = \frac{d_{\text{ОМ}} - 2\Delta t_{\text{ОМ}} - d_{\text{ЗОВ}}}{2} \quad (2.55)$
10	2,236 $d_{\text{ел}}$	Площа ЦСЕ зі склопластикового стержня, $S_{\text{ЦСЕ}}$, мм ²	$S_{\text{ЦСЕ}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{ЦСЕ}}^2}{4} \quad (2.56)$
11	2,549 $d_{\text{ел}}$	Площа ПСЕ з повиву арамідних ниток, $S_{\text{ПСЕ}}$, мм ²	$S_{\text{ПСЕ}} = \frac{LD}{\rho} \cdot n_{\text{ан}} \cdot 10^{-4}, \quad (2.57)$
12	2,864 $d_{\text{ел}}$	Максимально допустиме розтягувальне навантаження, $F_{\text{МК}}$, Н	$F_{\text{МК}} = k_p \cdot F_{\text{ДК}}, \quad (2.58)$ $k_p = \frac{\varepsilon_{\text{МК}}}{\varepsilon_{\text{ДК}}}.$

між ОВ або пучком волокон і внутрішньою поверхнею стінки трубки ОМ, кроку спірального укладання елементів повиву осердя. Значення R та ΔR визначаються за виразами (2.54) та (2.55), відповідно. Значення h залежить від обладнання виробника кабелю і, як правило, приймається (від 80 до 150) мм.

Крім того, діаметр ЦСЕ, за яким визначається його площа, впливає на всю структуру осердя ДСОК: кількість та діаметр елементів повиву, ємність оптичних волокон у кожному ОМ та в усьому кабелі. Ці залежності між параметрами елементів конструкції ОК вдало демонструє рис. 2.11.

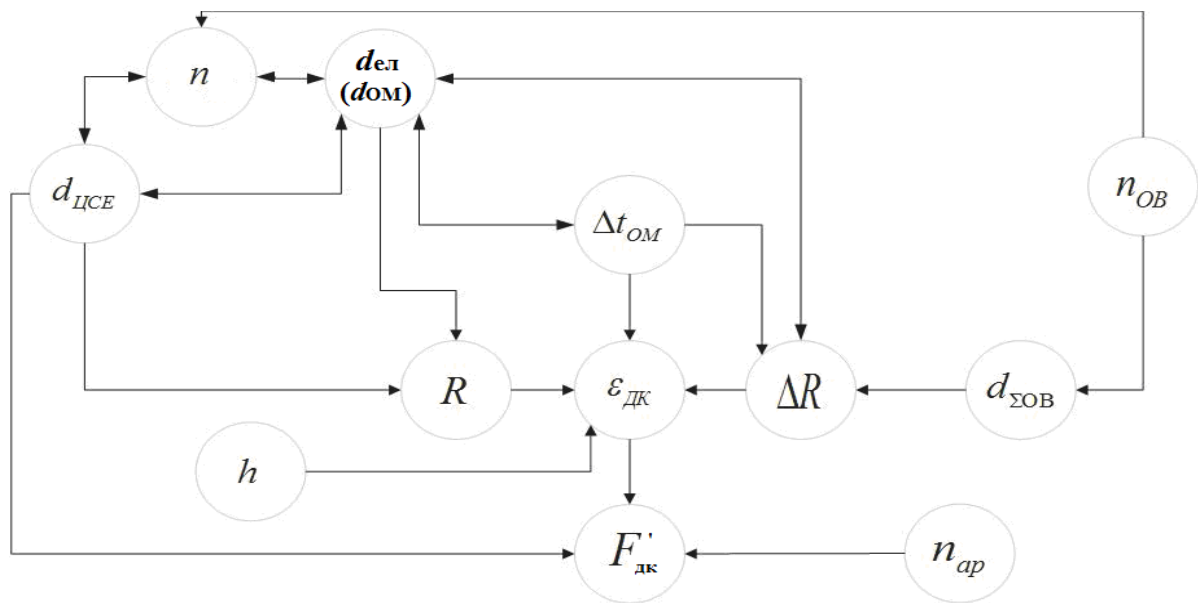


Рисунок 2.11 – Схематичне зображення залежностей параметрів елементів повиву моделей конструкції осердя ДСОК

Згідно [3, 21], діаметр ЦСЕ в ДСОК одноповивного скручення з числом n елементів повиву з діаметром $d_{\text{ел}}$, визначаються виразом:

$$d_{\text{ЦСЕ}} = k_{\pi} \cdot d_{\text{ел}}, \quad (2.59)$$

де $d_{\text{ЦСЕ}}$ – діаметр ЦСЕ, мм; k_{π} – коефіцієнт, що враховує кількість елементів у повиві кабелю; $d_{\text{ел}}$ – діаметр елементу повиву, мм.

В свою чергу коефіцієнт k_{π} визначається за наступною формулою [123]:

$$k_{\pi} = \left(\sqrt{1 + \frac{1}{\sin^2 \theta} \left[\frac{1}{\sin^2 \frac{\pi}{n}} - 1 \right]} - 1 \right), \quad (2.60)$$

де k_n – коефіцієнт, що враховує кількість елементів у повиві; θ – кут спірального укладання елементів повиву осердя, рад; n – кількість елементів повиву, шт.

В підрозділі роботи допустиме розтягувальне навантаження, $F_{\text{дк}}$, вибраної для досліджень моделі ДСОК визначається тільки за значеннями $\epsilon_{\text{дк}}$ для розробки довідкової та графічної баз методу удосконалення вибору СЕ при конструюванні його оптимальних моделей. Забезпечення значення величин $n_{\text{ОВ}}$ та $F_{\text{дк}}$ будуть забезпечувати визначення геометричних та конструктивних параметрів повивів.

Удосконалення вибору СЕ є задачею оптимізації вибору $d_{\text{ЦСЕ}}$ (склопластикового стержня) та кількості і типу арамідних ниток ПСЕ при дослідженні їх впливу на конструктивні та геометричні параметри моделі кабелю.

Так, враховуючи роботи [3, 21, 34, 64, 65, 86, 112] науковий інтерес представляє розробка методу удосконалення процесу вибору СЕ моделі кабелю з тим, щоб забезпечити їх задані значення МДРН та допустиме розтягувальне навантаження (ДРН) при найменших витратах на матеріали СЕ та оптимізувати у результаті конструкцію всього осердя не втрачаючи його рекомендованих механічних та оптичних параметрів.

Вибір кількості та типу арамідних ниток в ПСЕ дозволяє досягти та забезпечити складових заданого МДРН та ДРН кабелю, виходячи з одержаного значення його максимального поздовжнього видовження. Арамідні нитки ПСЕ, як правило, не призводять до значного збільшення ваги та розміру моделі кабелю.

В підрозділі одержані залежності величин $F'_{\text{ЦСЕ}}$ (рис. 2.12) та $F'_{\text{ПСЕ}}$ (рис. 2.13): від діаметру ЦСЕ та кількості арамідних ниток ПСЕ, різній структурі моделі осердя ДСОК; діаметру ЦСЕ до 4 мм; кількості елементів повиву – (від 3 до 8) шт; діаметру елемента повиву (від 1,8 до 3,0) мм; кількості ОВ в кожному ОМ, $n_{\text{ОВ}} = 12$. В розрахунках також було використано: радіальна товщина стінки ОМ, $\Delta t_{\text{ОМ}} = 0,15 \cdot d_{\text{ОМ}}$ [21, 112, 113 – 130]; крок спірального укладання елементів повиву $h = 100$ мм [112]; діаметр ОВ в захисному пофарбованому покритті 255 мкм; ЦСЕ – склопластиковий стержень фірми «Polystal» з $E_{\text{сц}} = 50\,000$ Н/мм²

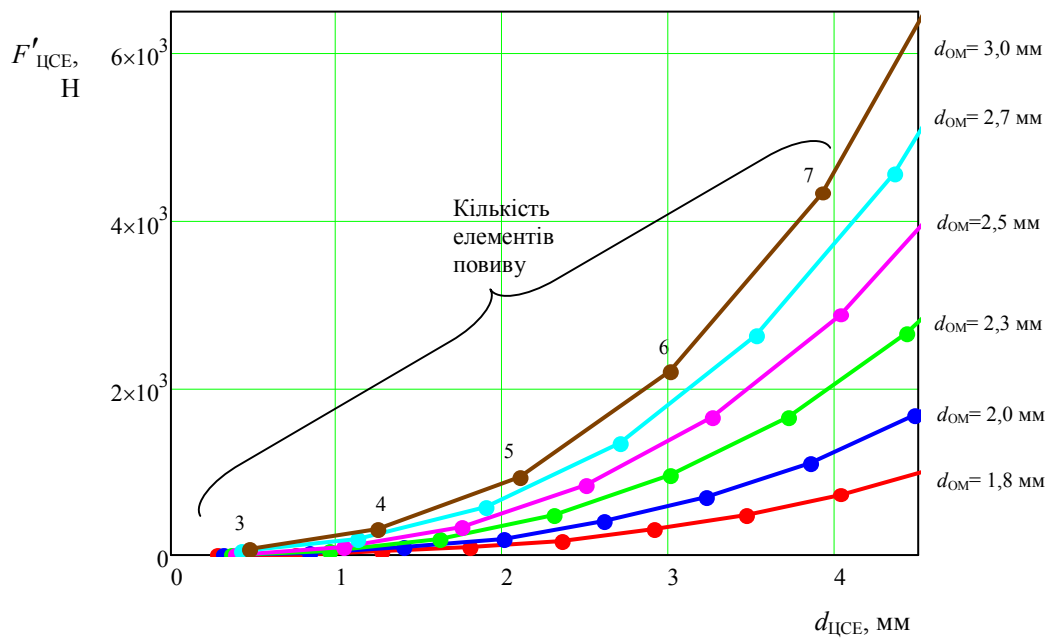


Рисунок 2.12 – Залежності $F_{\text{ЦСЕ}}$ від діаметру ЦСЕ, $d_{\text{ЦСЕ}}$, при різній кількості та діаметрах ОМ в повиві кабелю без урахування значення $\epsilon_{\text{ДОВ}}$

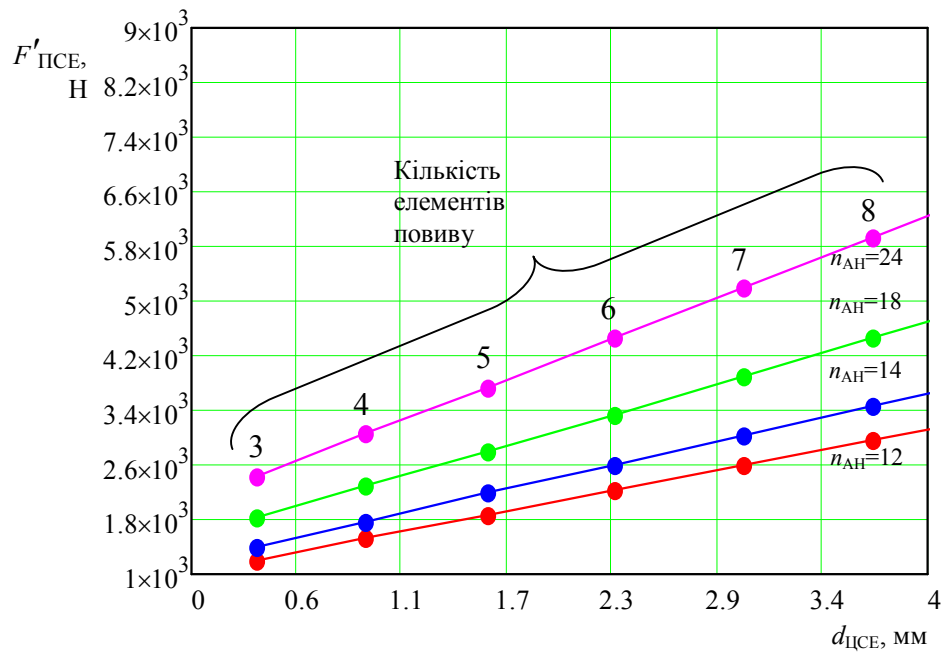


Рисунок 2.13 – Залежності $F_{\text{ПСЕ}}$ від діаметру ЦСЕ $d_{\text{ЦСЕ}}$ при різній кількості елементів діаметром 2,3 мм в повиві кабелю без урахування значення $\epsilon_{\text{ДОВ}}$

[3, 21, 86, 112 – 115, 127, 128]; з числом арамідних ниток в повиві ПСЕ 12, 14, 18 та 24 типу «Twaron» D1052-8050 з $E_{ан} = 104\,000\text{ Н/мм}^2$.

Експериментальна складова методу. В якості прикладу виберемо конструкцію осердя одноповивної моделі 48-волоконного ДСОК, СЕ якої забезпечать $F_{мк} = 7\text{ кН}$. Максимально допустиме видовження ОВ прийнято 0,25 % [3, 4, 86]. Згідно до рис. 2.12 значення $F'_{ЦСЕ} = 0,48\text{ кН}$, а згідно до рис. 2.13 значення $F'_{ПСЕ} = 3,30\text{ кН}$ при $n_{ан} = 18\text{ шт.}$, а при $n_{ан} = 24\text{ шт.}$ $F'_{ПСЕ} = 4,44\text{ кН}$.

Таким чином, $F_{мк}$ при $n_{ан} = 18\text{ шт.}$ дорівнює 3,78 кН, а при $n_{ан} = 24\text{ шт.}$ – 4,92 кН. Тоді, згідно до виразу (2.58) табл. 2.11 значення k_p буде дорівнювати 2,08 при $\epsilon_{мк} = 0,231\text{ \%}$ [116], а значення $F_{мк}$ при 18 арамідних нитках буде дорівнювати 7,86, а при 24 шт. – 10,23 кН.

Виконані дослідження зі створення методу удосконалення вибору СЕ при розробці оптимальної конструкції ДСОК виконані за допомогою програмної реалізації в середовищі Python відповідно до графічної моделі, представленої на рис. 2.14.

Аналіз результатів досліджень. Таким чином, результати розробки методу удосконалення вибору силових елементів при проектуванні оптимальної конструкції ОК дозволили встановити, що: дослідження з удосконалення вибору силових елементів ДСОК показали різний характер залежностей розтягувальних навантажень, які забезпечуються центральним та периферійним СЕ, а діаметр ЦСЕ є визначальним параметром осердя при визначенні величин $F'_{ЦСЕ}$ та $F'_{ПСЕ}$; наведений приклад з прискореного вибору СЕ за розрахунками розтягувальних навантажень $F'_{ЦСЕ}$ та $F'_{ПСЕ}$, в свою чергу, показав, що:

а) використання арамідних ниток в якості ПСЕ дає вклад в загальну величину $F_{мк}$ приблизно на порядок більший, ніж склопластикового стержня ЦСЕ;

б) останнє не є приводом для відмови використання склопластикового стержня для ЦСЕ (адже існують інші види механічних навантажень на кабель, як згинальні і роздавлювальні) та конструктивні функції, які перекриває склопластиковий стержень ЦСЕ;

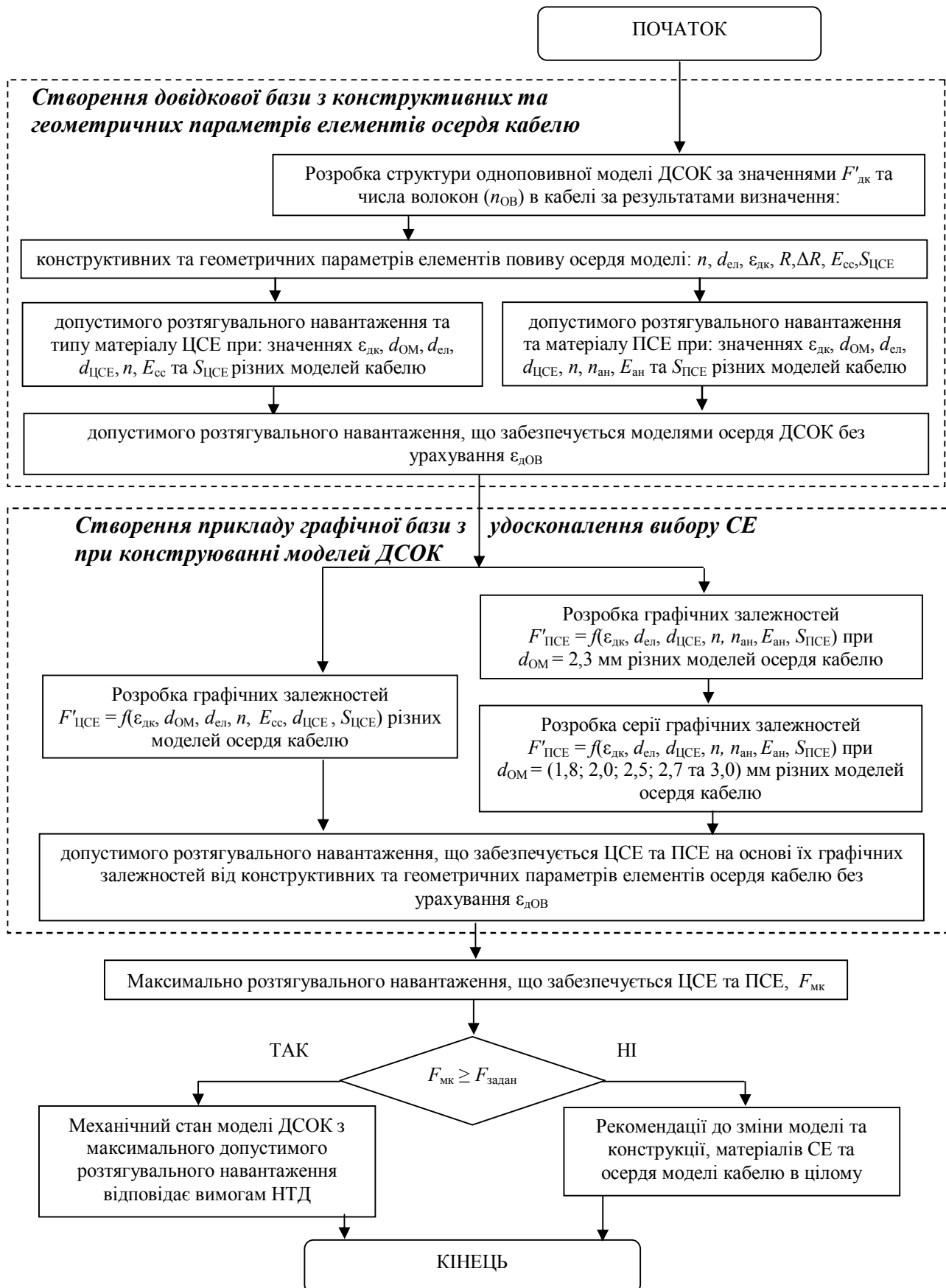


Рисунок 2.14 – Графічна модель реалізації методу удосконалення вибору силових елементів при розробці моделі осердя конструкції ДСОК

в) правильний вибір ЦСЕ та його діаметру надають можливість оптимізації моделі конструкції ДСОК.

Рекомендації з використання одержаних залежностей $F'_{\text{ЦСЕ}}$ та $F'_{\text{ПСЕ}}$ від діаметра центрального силового елемента. Використання отриманих залежностей між розтягувальними навантаженнями, що забезпечуються СЕ кабелю, та параметрами моделі конструкції (діаметром ЦСЕ, кількістю елементів повиву, кількістю арамідних ниток ПСЕ, тощо) дозволяють на етапі розробки ОК значно скоротити час вибору оптимальних: силових елементів, структуру осердя та параметрів інших конструктивних елементів кабелю для забезпечення заданого МДРН та зменшення повної собівартості кабелю.

Висновки. Результати розробки методу удосконалення вибору силових елементів при розробці моделі конструкції ОК дозволили: розробити теоретичну та експериментальну складові методу; довести, що використання арамідних ниток в якості ПСЕ дає вклад в МДРН кабелю більший, ніж склопластиковий стержень ЦСЕ; оптимізувати модель конструкції ДСОК за рахунок правильного вибору $d_{\text{ЦСЕ}}$; рекомендувати отримані залежності $F'_{\text{ЦСЕ}}$ та $F'_{\text{ПСЕ}}$ від $d_{\text{ЦСЕ}}$ використовувати на етапі проектування моделі ДСОК одноповивної шести-елементної конструкції.

2.5 Висновки до другого розділу

В даному розділі з розвитку теорії проектування та оптимізації багатомодульних конструкцій оптичних кабелів було:

А. Виконано:

- обґрунтування послідовності проектування та розробки конструкції кабелю для забезпечення ефективних проектування та експлуатації лінійних споруд ВОЛЗ;
- розробку теоретичних підходів забезпечення механічної міцності та передавальних параметрів ОК на основі загальних вимог до ВОЛЗ;
- обґрунтування шляхів створення високонадійних конструкцій ОК;

– розробку методів оптимізації багатомодульної моделі осердя конструкції ОК, в рамках яких:

а) розроблено метод оптимізації осердя багатомодульної моделі конструкції ОК;

б) проведено обґрунтування та оптимізацію процесу прискореного вибору структури трьохповивного осердя кабелю;

в) розроблено метод оптимізації багатомодульної моделі конструкції ОК за критерієм мінімальної собівартості.

– розробку методу удосконалення вибору силових елементів при проектуванні оптимальної конструкції кабелю.

Б. Встановлено, що:

– в умовах незначного видовження кабелю (до 0,5 %) для отримання більшого значення $F_{\text{дк}}$ доцільно використовувати в якості ЦСЕ сталевий дріт, а в якості ПСЕ арамідні нитки типу «Twaron» D-2200-2420 з більшою лінійною густиною;

– збільшення кількості трубок ОМ до максимального значення в першому повиві багатоповивного ОК є недоцільним, оскільки перехід до більшої кількості повивів з меншою кількістю ОМ в I повиві кабелю дозволить отримати більш економічно вигідну конструкцію кабелю при одночасному забезпеченні заданого загального числа ОВ. Крім того, це веде до зменшення витрат на матеріали конструктивних елементів кабелю віднесеного на одне оптичне волокно;

– розрахунок механічної міцності багатомодульної конструкції осердя оптичних кабелів мереж абонентських ліній потрібно проводити за геометричними параметрами першого повиву з подальшим перерахунком (збільшенням) кроку спірального укладання елементів або зменшенням діаметра трубки ОМ інших повивів задля зменшення матеріаломісткості ОК. Так, оптимізація моделі конструкції осердя, на прикладі, двоповивного ОК за рахунок збільшення кроку спірального укладання елементів другого повиву дала можливість зменшити собівартість кабелю, порівняно з неоптимізованою конструкцією на 0,88 %, а за рахунок зменшення діаметра трубок ОМ в другому

повиві ОК – на 8,75 %;

– використання арамідних ниток в якості ПСЕ дає вклад в загальну величину МДРН приблизно на порядок більший, ніж склопластикового стержня ЦСЕ. Тому правильний вибір ЦСЕ та його діаметру надають можливість оптимізації моделі конструкції ДСОК.

В. Рекомендовано:

– використовувати теоретичні підходи щодо забезпечення конструктивної стійкості підземних ОК до розтягувальних навантажень при розробці нормативного документу з конструювання механічної міцності кабелів;

– використовувати в кабельній промисловості розроблений метод оптимізації осердя моделі багатоповивного ОК модульної конструкції для ефективного вибору та розрахунку їх елементів мереж абонентських ліній і зменшення їх матеріаломісткості, й, як наслідок, зниження собівартості;

– використовувати на етапі проектування кабелю одержану низку залежностей повної собівартості ОК різної структури від параметрів його конструкції задля прискорення обґрунтованого вибору моделі його осердя з одночасним забезпеченням необхідної ємності ОВ та мінімізації повної собівартості ОК;

– використовувати на етапі проектування кабелю отримані залежності між розтягувальними навантаженнями, що забезпечуються СЕ кабелю, та параметрами моделі його конструкції задля значного скорочення часу вибору оптимальних СЕ, структури осердя та параметрів інших елементів кабелю для забезпечення заданого МДРН та зменшення повної собівартості кабелю.

РОЗДІЛ 3

РОЗВИТОК ТЕОРІЇ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВОЛЗ НА ЕТАПАХ ПРОЄКТУВАННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ

3.1 Загальні положення з виробництва ОК, будівництва та експлуатації ВОЛЗ

Виробництво оптичних кабелів та будівництво ВОЛЗ є складними багатоступеневими процесами, що вимагають дотримання технологічних стандартів і нормативних вимог. Висока якість матеріалів, точність виробничих процесів, виробництва ОК та будівництва ВОЛЗ є ключовими факторами, що визначають надійність оптичної інфраструктури.

Основною метою при розробці конструкції ОК є створення належного захисту ОВ в процесі виробництва, монтажу й експлуатації кабелю. Якщо ОВ піддається зовнішнім впливам, які перевищують допустимі межі, то це призведе до критичної зміни характеристик волокна, таких, як, в першу чергу, експлуатаційний термін служби і загасання. З даною проблемою можливо справитися двома способами. Перший: при виробництві ОК усі ОВ повинні відповідати потрібній якості, що забезпечується заводською системою гарантії якості. Контроль якості ОВ повинен здійснюватися на кожному етапі, включаючи перевірку його геометричних параметрів, спектральних характеристик загасання та механічних властивостей. Другий: за технологіями проєктування і виробництва ОК, які повинні забезпечувати механічну цілісність ОВ за нормативний термін служби кабелю [3].

Будівництво ВОЛЗ передбачає виконання комплексу робіт, що включають проєктування лінії, прокладання кабелів, монтаж з'єднувальних муфт і розподільних пристроїв, тестування та введення в експлуатацію. При будівництві ВОЛЗ повинні використовуватися найбільш сучасні кабелі й устаткування, вироби і матеріали, бажано вітчизняного виробництва, і так само передові

індустріальні методи прокладання ОК [3]. Вибір методів прокладання залежить від особливостей місцевості, призначення мережі та вимог до надійності ВОЛЗ.

Прокладання ОК буває підземна, підводна, повітряна та внутрішньобудинкова. Використання, наприклад, горизонтально-спрямованого буріння або розробки мікротраншеї, дозволяють мінімізувати вплив навколишнього середовища на ОК та скоротити терміни будівництва. Технічні рішення при будівництві лінійних споруд забезпечують надійність і довгострокову експлуатацію ВОЛЗ, можливість збільшення обсягів передаваної інформації з мінімізацією витрат на нове будівництво або реконструкцію кабельної магістралі. Також вони забезпечують сприятливі умови для технічної експлуатації лінійних споруд ВОЛЗ [131].

Одним із ключових аспектів забезпечення експлуатаційної надійності ВОЛЗ є якість монтажу та контроль оптичних і електричних параметрів її елементів. Для контролю ліній використовують рефлектометричні методи, спектральний аналіз, механічні випробування та методи електричних вимірювань і інше. Крім того, важливим є дотримання норм будівництва та стандартів, зокрема, таких як [23 – 30, 132 – 134], що забезпечують довговічність мережної інфраструктури.

Таким чином, виробництво ОК і будівництво ВОЛЗ є технологічно складними процесами, що вимагають ретельного дослідження, планування, якісного виконання робіт та дотримання нормативних вимог для забезпечення ефективної та довговічної роботи ЕКМ зв'язку.

3.2 Постановка задачі дослідження забезпечення надійності ВОЛЗ на етапах виробництва ОК та її будівництва і експлуатації

Розвиток сучасних ВОЛЗ потребує високого рівня надійності як у процесі виробництва їх складових, зокрема, ОК, так і на етапах їх будівництва та експлуатації.

Метою досліджень даного розділу є розвиток та вдосконалення

теоретичних підходів до забезпечення надійності ВОЛЗ на етапах виробництва ОК різних конструкцій та при її будівництві.

У рамках цих досліджень необхідно вирішити такі задачі:

- 1) оцінити термомеханічний вплив на оптичні волокна в процесі їх розташування в трубці ОМ та виготовлення ОК;
- 2) оцінити температурний вплив умов експлуатації ВОЛЗ на геометричні розміри та параметри ОК та його елементів;
- 3) провести аналіз основних порушень технології виробництва ОК, які можуть впливати на його надійність, та надати рекомендації з їх недопущення;
- 4) провести аналіз основних порушень технології будівництва ВОЛЗ та надати рекомендації з їх недопущення при:
 - вимірах параметрів ОК та інших компонентів ВОЛЗ;
 - приймально-здавальних роботах лінійних споруд ВОЛЗ.

Результати проведених досліджень дозволять підвищити рівень надійності ВОЛЗ шляхом усунення можливих недоліків у технологічних процесах виробництва ОК та її будівництва за рахунок розробки рекомендацій щодо недопущення порушень.

3.3 Дослідження термомеханічного впливу на оптичні волокна при їх розташуванні в трубці оптичного модуля

Як відомо з [3, 4, 21, 51, 135 – 138], при нормальній температурі навколишнього середовища та дії певного розтягувального навантаження на ОК укладене ОВ в трубку ОМ може мати довжину, яка дорівнює довжині трубки. При цьому, зміна температури ОК може привести до зміни довжини волокна та трубки ОМ пропорційно значенням ТКЛР їх матеріалів.

Для проведення досліджень термомеханічної зміни довжини кварцового ОВ відносно зміни довжини трубки ОМ із різних матеріалів використаємо дані підрозділу 1.4.2. При цьому приймемо такі припущення:

1. Через малі величини зміна розмірів елементів конструкції ОК в

радіальному напрямі під впливом температури не враховується.

2. Через різницю α матеріалів трубка ОМ змінює розміри незалежно від інших елементів ОК (рис. 3.1), так як конструкція допускає їх вільне взаємне поздовжнє зміщення.

3. В якості матеріалів трубки ОМ прийнято лише полібутилентерефталат, поліамід та полікарбонат, а оптичного волокна – кварцове скло.

4. Довжини трубки ОМ та ОВ при температурі $t_0 = +20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($+293\text{ K}$) дорівнюють одна одній, тобто довжина оптичного волокна (або скрутня ОВ) рівна довжині осьової лінії модуля.

5. Розрахунки зміни довжини ОВ в трубці ОМ виконуються при температурі $t_0 = +20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($+293\text{ K}$) та при зміні температури середовища t в діапазоні (від мінус 40 до $+60$) $^{\circ}\text{C}$ / (від $+233$ до $+333$) K .

Результати проведених досліджень для заданого діапазону температур дозволять встановити при її зміні (ΔT):

- величини абсолютного видовження ОВ та трубки ОМ ($\Delta L_{\text{ОВ}}$, $\Delta L_{\text{ТОМ}}$);
- величини абсолютної зміни довжини ОВ ($\epsilon_{\text{ОВ}}$) та трубки ОМ ($\epsilon_{\text{ТОМ}}$);
- величини відносної зміни довжини ОВ від довжини трубки ОМ ($\epsilon_{\text{ОВ, ТОМ}}$);
- величини сили розтягування ОВ ($P_{\text{ОВ}}$);

Крім того, вони дозволять встановити характер стану (видовження або скорочення) волокна в трубці ОМ у відповідності до його початкової (контрольної) довжини при t_0 .

Як відмічалось раніше, конструкція ОК повинна проектуватися з урахуванням забезпечення мінімальної взаємодії матеріалів ОВ та інших елементів при виготовленні та експлуатації, а також при зміні їх розмірів під дією механічних та фізико-кліматичних факторів оточуючого середовища [23]. Наявність в конструкції ОК елементів, виготовлених із матеріалів з різними α_0 , є причиною зміни геометричних розмірів ОВ, зокрема його довжини. При зміні температури експлуатації це приводить до виникнення сил розтягу або стискання ОВ в трубці ОМ конструкції кабелю. Зазначене може призвести до появи

додаткових втрат сигналу, що передається, та скоротити термін служби ОК за рахунок виникнення мікротріщин, макро- та мікровигинів ОВ.

Крім того, зменшення довжини оптичного волокна в трубці ОМ під дією механічних навантажень та температури може привести до обмеження вільного пересування ОВ в трубці. Це зменшить величину $F_{\text{МК}}$ нижче номінального значення, що приведе до прискорення старіння, зміни механічних та оптичних параметрів кабелю у гірший бік [136 – 138].

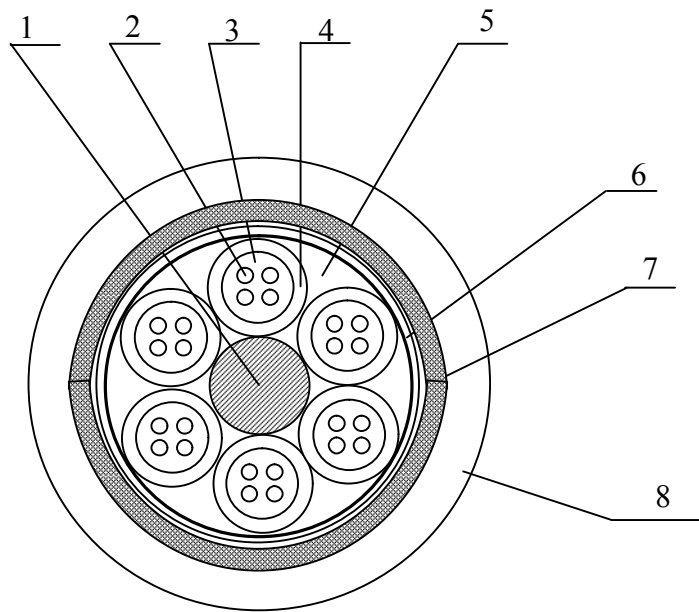


Рисунок 3.1 – Конструкція ОК для дослідження термомеханічного впливу:

- 1 – ЦСЕ; 2 – ОВ; 3 – гідрофобний заповнювач ОМ; 4 – трубка ОМ;
5 – гідрофобний заповнювач осердя; 6 – скріплювальна обмотка; 7 – ПСЕ;
8 – захисний шланг

Як зазначалося у підрозділі 1.4.2, α_0 матеріалів елементів ОК характеризує відносну зміну довжини ОК від зміни температури відповідно до виразу (1.5). Згідно до нього під дією температури навколишнього середовища абсолютне видовження елемента кабелю згідно [136] визначається у вигляді:

$$\Delta L = L \cdot \alpha_0 \cdot \Delta T, \quad (3.1)$$

де ΔL – абсолютне видовження елемента, м; L – початкова (контрольна) довжина елемента, м; α_0 – ТКЛР матеріалу елемента, K^{-1} ; ΔT – зміна температури

навколишнього середовища, К.

Якщо елемент конструкції ОК має додатне значення α_0 , то при підвищенні (зниженні) температури в ньому виникають сили розтягування (стискання). Коли значення α_0 елемента від'ємне, то все відбувається навпаки.

Згідно до виразу (1.5) абсолютна зміна довжини ОВ визначається у вигляді:

$$\varepsilon_{ОВ} = \alpha_{ОВ} \cdot \Delta T, \quad (3.2)$$

де $\varepsilon_{ОВ}$ – абсолютна зміна довжини ОВ від зміни температури; $\alpha_{ОВ}$ – ТКЛР оптичного волокна, K^{-1} ; ΔT – зміна температури навколишнього середовища, К.

Згідно до [136 – 139] відносна зміна довжини ОВ від довжини трубки ОМ визначається у вигляді:

$$\varepsilon_{ОВ,ТОМ} = \Delta\alpha \cdot \Delta T = (\alpha_{ОВ} - \alpha_{ТОМ})(t - t_0), \quad (3.3)$$

де $\varepsilon_{ОВ,ТОМ}$ – зміна довжини ОВ відносно довжини трубки ОМ; $\Delta\alpha$ – різниця ТКЛР матеріалів ОВ та трубки ОМ ($\alpha_{ОВ} - \alpha_{ТОМ}$), K^{-1} ; ΔT – зміна температури середовища, К; $\alpha_{ОВ}, \alpha_{ТОМ}$ – ТКЛР матеріалів ОВ та трубки ОМ, відповідно, K^{-1} ; t – температура середовища, при якій визначається довжина ОВ відносно довжини трубки ОМ, К; t_0 – температура, при якій початкова довжина ОВ умовно рівна нулю, К.

В додатку В табл. В.1 наведені типові значення α_0 матеріалів ОВ та трубки ОМ, що використовуються при виготовленні оптичного кабелю [21, 34, 136]. Як видно, з таблиці значення $\alpha_{ОВ}$ та $\alpha_{ТОМ}$ різні, тобто при зміні температури довжини цих елементів зміняться по різному. Причому, температурна залежність кварцового скла менша, ніж у матеріалів трубки ОМ. Таким чином, оптичні волокна будуть знаходитися у стані видовження або скорочення при зміні температури, тобто підлягають діям сил розтягування (стискання).

Виходячи з характеристик матеріалів табл. В.1 та того, що для заданих матеріалів значення ТКЛР ОВ менше, ніж ТКЛР матеріалів трубки ОМ, зміна довжини ОВ порівняно з довжиною трубки модуля буде відбуватися так, як показано на рис. 3.2 згідно до [21, 136 – 139].

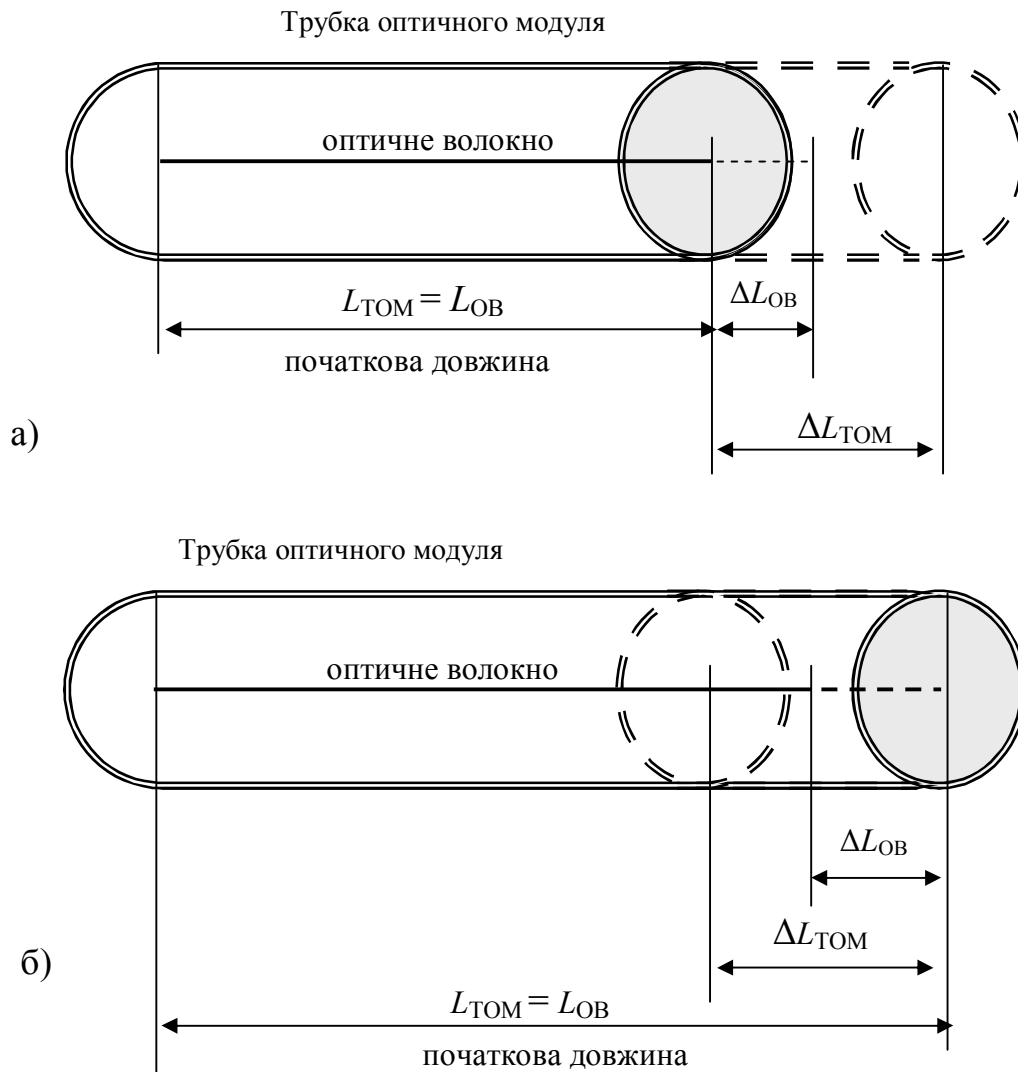


Рисунок 3.2 – Зміна довжини ОВ порівняно з довжиною трубки ОМ при:
а) збільшенні температури; б) зменшенні температури

Одним з важливих процесів під час перевірки якості виготовлення ОВ на заводі-виробнику є пружтест (proof test) сили натягу та видовження ОВ, що не повинні перевищувати 4 Н та 0,5 %, відповідно [3, 21].

Сила розтягування ОВ може бути визначена із даних сили натягу та видовження при пружтесті під час його відбракування на підприємстві [136]:

$$P_{ОВ} = \frac{\varepsilon_{ОВ}}{\varepsilon_{\text{тестОВ}}} P_{\text{тестОВ}}, \quad (3.4)$$

де $P_{ОВ}$ – сила розтягування ОВ при температурі ΔT , Н; $\varepsilon_{ОВ}$ – абсолютна довжина ОВ при температурі навколишнього середовища (ΔT); $\varepsilon_{\text{тестОВ}}$ – видовження ОВ при тестуванні його якості; $P_{\text{тестОВ}}$ – сила розтягування ОВ при тестуванні, Н.

Для дослідження залежностей $\Delta L_{\text{ОВ}}$, $\Delta L_{\text{ТОМ}}$, $\varepsilon_{\text{ОВ}}$, $\varepsilon_{\text{ТОМ}}$, $\varepsilon_{\text{ОВ,ТОМ}}$, $P_{\text{ОВ}}$ від зміни температури навколишнього середовища в заданому діапазоні та встановлення характеру стану волокна від його початкової довжини ($L = 1$ км) розрахуємо значення цих величин при $t = +60$ °C / 333 К та матеріалу трубки ОМ із полібутилентерефталата.

$$\text{Тоді: } \Delta L_{\text{ОВ}} = 10^3 \cdot 5,5 \cdot 10^{-7} \cdot (333 - 293) = 0,022 \text{ м,}$$

$$\Delta L_{\text{ТОМ}} = 10^3 \cdot 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot (333 - 293) = 6 \text{ м;}$$

$$\varepsilon_{\text{ОВ}} = 5,5 \cdot 10^{-7} \cdot (333 - 293) = 2,2 \cdot 10^{-5} (0,0022 \%);$$

$$\varepsilon_{\text{ТОМ}} = 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot (333 - 293) = 6 \cdot 10^{-3} (0,6 \%);$$

$$\varepsilon_{\text{ОВ,ТОМ}} = (5,5 \cdot 10^{-7} - 1,5 \cdot 10^{-4}) \cdot (333 - 293) = -6 \cdot 10^{-3} (-0,6 \%);$$

$$P_{\text{ОВ}} = \frac{0,000022}{0,005} \cdot 4 = 0,018 \text{ Н.}$$

Аналіз результатів цих розрахунків показав, що при нагріванні трубки ОМ до $t = +60$ °C (333 К):

– абсолютне видовження ОВ від зміни температури мале та у порівнянні із абсолютним видовженням трубки ОМ від ΔT менше у 273,3 рази;

– абсолютна зміна довжини ОВ від зміни температури дорівнює 0,0022 %;

– відносна зміна довжини ОВ від довжини трубки ОМ дорівнює мінус 0,6 %. Знак «мінус» у значенні $\varepsilon_{\text{ОВ,ТОМ}}$ означає, що при даній температурі ОВ, яке має $\Delta L_{\text{ОВ}} = \Delta L_{\text{ТОМ}}$, буде коротше відносно трубки ОМ. Тому на нього будуть діяти сили розтягу, що спричиняють незначне видовження волокна;

– сила розтягу ОВ від зміни температури також дуже мала та у порівнянні із силою розтягу волокна при тестуванні менше у 222,2 рази.

Для дослідження термомеханічного впливу на кварцове ОВ в трубці ОМ із полібутилентерефталату, поліаміду та полікарбонату в заданому діапазоні температур були виконані розрахунки $\Delta L_{\text{ОВ}}$, $\Delta L_{\text{ТОМ}}$, $\varepsilon_{\text{ОВ}}$, $\varepsilon_{\text{ТОМ}}$, $\varepsilon_{\text{ОВ,ТОМ}}$ та $P_{\text{ОВ}}$, які дозволили встановити характер стану (видовження або скорочення) ОВ при зміні температури (від мінус 40 до +60) °C.

В табл. 3.1 зведено результати розрахунків цих параметрів і стану кварцового ОВ та трубки ОМ із різних матеріалів. Результати розрахунків зміни абсолютної довжини кварцового ОВ ($\epsilon_{ОВ}$) в трубці ОМ із полібутилентерефталата та відносної зміни його довжини від довжини трубки ОМ ($\epsilon_{ОВ,ТОМ}$) із різних матеріалів в заданому діапазоні температур приведені на рис. 3.3.

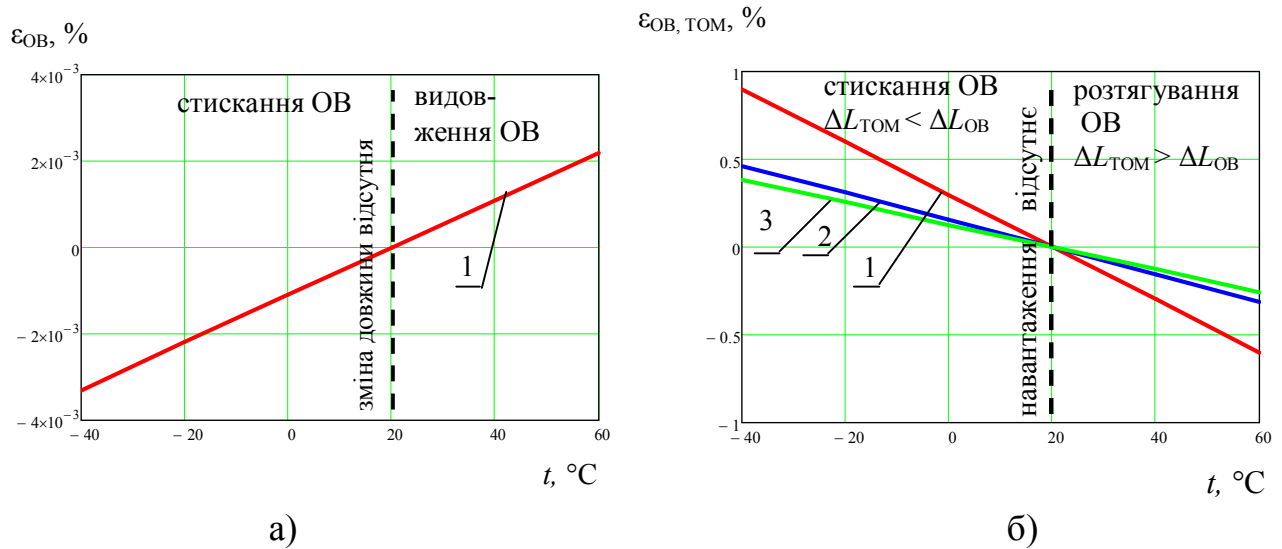


Рисунок 3.3 – Зміна довжини ОВ від температури при різних матеріалах трубки ОМ (1 – полібутилентерефталат; 2 – поліамід; 3 – полікарбонат):

а) абсолютна, б) відносна до довжини трубки ОМ

Результати дослідження термомеханічного впливу на кварцові ОВ в трубці ОМ із різних матеріалів, на основі даних додатку В (табл. В.1) та рис. 3.3 дозволили встановити, що:

1) при температурах вище (від 20 до 60) °С / (від 293 до 333) К сила розтягу ОВ викликає його видовження (від 0 до 0,0022) % для абсолютного і (від 0 до мінус 0,6) % для відносного видовження, а при температурах нижче (від 20 до мінус 40) °С – стискання (від 0 до мінус 0,0033) % для абсолютного і (від 0 до 0,9) % відносного;

2) зміни $\epsilon_{ОВ}$ і $\epsilon_{ОВ,ТОМ}$ вказують, що таке видовження не приводить до створення в структурі матеріалу ОВ мікротріщин, а стискання – до макровигинів в трубці ОМ;

Таблиця 3.1 – Зміна $\Delta L_{ОВ}$, $\Delta L_{ТОМ}$, $\epsilon_{ОВ}$, $\epsilon_{ТОМ}$, $\epsilon_{ОВ,ТОМ}$, $P_{ОВ}$ та характер стану ОВ при різних температурах

Тем- пера- тура t , $^{\circ}\text{C}$ K	Зміна значень $\Delta L_{ОВ}$, м, при:		Зміна значень $\Delta L_{ТОМ}$, м, при:		Зміна значень $\epsilon_{ОВ}$, %, при:		Зміна значень $\epsilon_{ТОМ}$, %, при:		Зміна значень $\epsilon_{ОВ,ТОМ}$ при:		Значення $P_{ОВ}$, Н, при:		Характер стану ОВ при:	
	збіль- шен- ні t	змен- шен- ні t	збіль- шен- ні t	змен- шен- ні t	збіль- шен- ні t	змен- шен- ні t	збіль- шен- ні t	змен- шен- ні t	збіль- шен- ні t	змен- шен- ні t	збіль- шен- ні t	змен- шен- ні t	збіль- шен- ні t	змен- шен- ні t
$\frac{+60}{+333}$	0,022	–	6	–	$2,2 \cdot 10^{-3}$	–	0,6	–	–0,006	–	+0,018	–	*	–
$\frac{+40}{+313}$	0,011	–	3	–	$1,1 \cdot 10^{-3}$	–	0,3	–	–0,003	–	+0,009	–		–
$\frac{+20}{+293}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	–	–
$\frac{0}{+273}$	–	– 0,011	–	–3	–	$-1,1 \cdot 10^{-3}$	–	–0,3	–	+0,003	–	– 0,009	–	**
$\frac{-20}{+253}$	–	– 0,022	–	–6	–	$-2,2 \cdot 10^{-3}$	–	–0,6	–	+0,006	–	– 0,018	–	
$\frac{-40}{+233}$	–	– 0,033	–	–9	–	$-3,3 \cdot 10^{-3}$	–	–0,9	–	+0,009	–	– 0,026	–	

Примітка: * видовження трубки ОМ більше видовження ОВ, поява незначних сил розтягу ОВ;

** скорочення трубки ОМ більше скорочення ОВ, поява незначних сил стискання ОВ;

1) значення ТКЛР матеріалів з кварцового ОВ $\alpha_{ОВ} = 5,5 \cdot 10^{-7}$, K^{-1} , та полібутилентерефталатної трубки ОМ, $\alpha_{ТОМ} = 1,5 \cdot 10^{-4}$, K^{-1} ;

2) початкова довжина ОВ, $L_{ОВ} = L_{ТОМ}$ при температурі $t_0 = +20^{\circ}\text{C} / 293 \text{ K}$.

3) відносна зміна довжини ОВ до довжини трубки ОМ практично не залежить від типу матеріалу трубки, тому виготовлення трубки ОМ на підприємстві-виробнику кабелю залежить від його обладнання, прийнятої технології виробництва та собівартості матеріалу;

4) така величина термомеханічного впливу на ОВ в трубці ОМ не впливає на $\epsilon_{\text{МК}}$ при його конструюванні.

3.4 Термомеханічний вплив на оптичні волокна в процесах виготовлення ОК, будівництва та умов експлуатації ВОЛЗ

Створення надійних, економічних, простих у виробництві конструкцій ОК, які б задовольняли вимогам умов їх експлуатації та були здатні забезпечувати цілісність ОВ та стабільність його параметрів передачі, є актуальною задачею сучасної кабельної промисловості.

Ефективна технічна експлуатація оптичного кабелю в широкому діапазон температур, як правило, (від мінус 40 до +60) °C [3, 34, 88], потребує, в першу чергу, його механічно-міцної та надійної конструкції, якісних матеріалів елементів та врахування усіх фізичних та термомеханічних процесів, що можуть виникати в його елементах.

Одним із зовнішніх впливових факторів на конструкцію ОК є дія різних температур як в процесі виготовлення конструктивних елементів кабелю (зокрема, трубок ОМ, захисних покривів та інше) так і навколишнього середовища експлуатації. Внаслідок різниці значень α_0 матеріалів елементів кабелю, при дії температури в його конструкції виникає зміна довжин цих елементів та через що утворюється їх екстремальні розтягувальні або стискальні зусилля. Такий стан ОК може приводити до появи в ОВ розтягувальних або стискальних зусиль за рахунок надлишкового збільшення або зменшення довжини волокон порівняно з довжиною трубки ОМ, в яку вони укладені.

Останнє може спричинити непередбачувану зміну параметрів передавання (коефіцієнта загасання та дисперсії сигналу), передчасне старіння та вихід з ладу

ОК і, як наслідок, всієї ВОЛЗ. Це все стане наслідками того, що забезпечити мінімальний термін експлуатації кабелю в 30 років стане неможливим [25, 28].

В даний час в технічній та науковій літературі відсутні повною мірою дані про термомеханічний вплив на ОВ в процесі виробництва ОК та будівництва і експлуатації ВОЛЗ. Наприклад, у роботах [52, 127, 135] приведено метод визначення α_0 та модуля Юнга всього кабелю, оцінка зміни відносного видовження та фіктивної механічної напруги конструкції діелектричного ОК з елементами із різних матеріалів під дією температури умов експлуатації. Проте, дослідження та визначення зміни довжини ОВ в трубці ОМ конструкції ОК в процесі його виробництва та експлуатації ВОЛЗ в цих роботах не проводилось.

Метою даного підрозділу є обґрунтування термомеханічного впливу на ОВ в трубці ОМ в процесах виробництва ОК, будівництва та експлуатації ВОЛЗ і надання практичних рекомендацій по недопущенню порушень їх технологій.

Як відомо, в Україні ОВ не виготовляються. Натомість закордонні ОВ розміщуються в осердя ОК різної конструкції та призначення. В таких умовах основна задача заводів-виробників (наприклад, вітчизняні ПАТ «Завод «Південкабель»» та ПАТ «Одескабель») є створення відповідних конструкцій ОК, що забезпечували б механічну цілісність ОВ при його виготовленні, прокладанні та монтажу, а також в усіх режимах експлуатації кабелю.

Аналізуючи стан ОВ як окремих елементів ОК можливо виділити такі основні ситуації, при яких в них можуть виникати механічні зусилля в процесі виготовлення та експлуатації кабелю:

- 1) розміщення пучка ОВ в щойно сформовану з розплавленого матеріалу трубку ОМ в екструдері обладнання та подальше охолодження цієї конструкції;
- 2) дія розтягувальних або згинальних навантажень, тощо в процесі прокладання, монтажу та експлуатації оптичних кабелів;
- 3) дія на ОК температур зони експлуатації, що спричиняє появу розтягувальних або стискальних навантажень (станів) в його елементах пропорційно значенням α_0 їх матеріалів та призводить до вільного пересування пучка ОВ в трубці ОМ за рахунок зменшення або збільшення його довжини.

Очевидно, що п. 1 відноситься до процесу виробництва ОК на заводі-виробнику, а п. 2 та 3 – до будівництва ВОЛЗ і експлуатації кабелю.

Таким чином, дослідження термомеханічного впливу на ОВ кабелю в даних ситуаціях надасть оцінки потреби його врахування при проектуванні кабельної продукції. Вказані дослідження проведемо при:

- кварцовому оптичному волокні;
- матеріалах трубки ОМ: полібутилентерефталат, поліамід, полікарбонат;
- температурі цеха (від +35 °С до +15)°С / (від 308 до 288) К та температурі середовища експлуатація ОК (від мінус 40 до +60) °С / (від 233 до 333) К.

3.4.1 Дослідження термомеханічного впливу на оптичні волокна на етапі виготовлення кабелю

На етапі виробництва ОК має місце розплавлення матеріалу майбутнього конструктивного елемента, що супроводжується його подальшим усадженням при охолодженні до нормальної температури цеху виробництва та, як результат, в першу чергу, зміною геометричних розмірів (зокрема, довжини). Прикладом виготовлення одного із елементів ОК є розміщення ОВ (або пучка ОВ) в трубці ОМ, яка формується з розплавленого матеріалу на виході екструдера установки. Температура ОВ при цьому дорівнює температурі цеху, яка змінюється в залежності від пори року в діапазоні (15...35) °С. На виході екструдера сформована трубка ОМ з поданими всередину ОВ проходить через ванну охолодження (довгу вузьку ємність довжиною 30...40 м), де охолоджується циркулюючою водою. При цьому матеріал трубки ОМ усаджується та, як наслідок, зменшується по довжині. Оптичні волокна при контакті з гарячим матеріалом трубки ОМ під дією стискальних зусиль розміщуються в модулі за гелікоїдою.

Згідно до (3.1), під дією температури абсолютне видовження елементів ОК змінюється (збільшується або зменшується порівняно з їх початковою довжиною) пропорційно значенню α_0 матеріалу.

Конструкція ОК повинна проєктуватися з урахуванням забезпечення мінімальної взаємодії матеріалів ОВ та інших елементів при його виготовленні, будівництві та експлуатації ВОЛЗ, а також при зміні розмірів усіх елементів кабелю під дією температури оточуючих середовищ. Наявність в конструкції ОК елементів із матеріалів з різними α_0 є причиною зміни геометричних розмірів ОВ, зокрема, його довжини [136].

Охолодження трубки ОМ від температури плавлення до температури охолоджуючої рідини приводить до зменшення, в першу чергу, довжини ОМ. Це призводить до відмінності довжин ОВ, закладених всередину, та кінцевої довжини трубки ОМ. Зокрема через те, що $\alpha_{\text{ТОМ}}$ більший за $\alpha_{\text{ОВ}}$ трубка ОМ буде зменшуватися більше, ніж волокно. Внаслідок чого при початковій рівності їх довжин $L_{\text{ТОМ}} = L_{\text{ОВ}}$ будуть виникати сили стискання ОВ в трубці ОМ. Це може привести до появи додаткових втрат сигналу, що передається, за рахунок виникнення макро- та мікрОВигинів волокна. Задля дослідження та усунення такої ситуації є потреба визначення значення абсолютного видовження ОВ та трубки ОМ при її охолодженні та кінцевої різниці їх довжин.

Згідно з даними табл. В.1 Додатку В та на основі виразу (3.1) проведемо розрахунок $\Delta L_{\text{ТОМ}}$ із полібутилентерефталата при зміні температури від температури плавлення її матеріалу $t_0 = 250 \text{ }^\circ\text{C} / 523 \text{ K}$, до температури цеху $t = 35 \text{ }^\circ\text{C} / 308 \text{ K}$. Тоді,

$$\Delta L_{\text{ТОМ}} = 35 \cdot 10^{-3} \cdot 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot (308 - 523) = -1,13 \text{ м.}$$

Оскільки ОВ в процесі виготовлення ОМ подається в його трубку при $t = 35 \text{ }^\circ\text{C} / 308 \text{ K}$, то його початкова довжина не змінюється, і дослідження виконуються при довжині ванни 35 м ($L_{\text{ОВ}} = 35 \text{ м}$).

Тоді, довжина трубки ОМ на виході ванни охолодження за рахунок усадки матеріалу буде дорівнювати:

$$L'_{\text{ТОМ}} = L_{\text{ОВ}} - \Delta L_{\text{ТОМ}}, \quad (3.4)$$

де $L'_{\text{ТОМ}}$ – довжина трубки ОМ на виході ванни охолодження, м; $L_{\text{ОВ}}$ – початкова довжина ОВ, м; $\Delta L_{\text{ТОМ}}$ – зміна довжини трубки ОМ за рахунок її охолодження, м.

Таким чином, $L_{\text{ТОМ}}$ на виході із ванни буде: $L'_{\text{ТОМ}} = 35 - 1,13 = 33,87 \text{ м}$.

Трубка ОМ на виході ванни охолодження має довжину 0,968 % від її довжини при температурі плавлення матеріалу. Внаслідок цього на укладання ОВ по гелікоїді в трубці ОМ піде 0,032 % від $L_{ОВ}$.

Для дослідження залежності абсолютного видовження трубки ОМ із різних матеріалів від температури цеху було розраховано $\Delta L_{ТОМ}$ при t (від 15 до 35) °С. Результати цих розрахунків представлені на рис. 3.4.

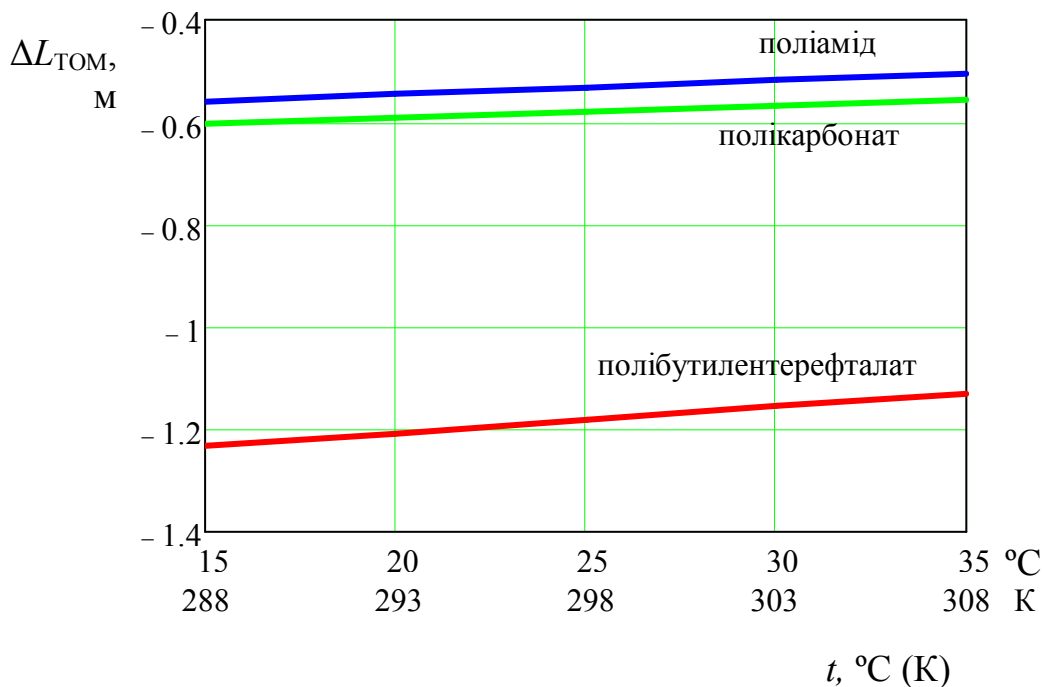


Рисунок 3.4 – Залежність абсолютного видовження трубки ОМ із різних матеріалів $\Delta L_{ТОМ}$ від температури цеху t

Таким чином, дослідження термомеханічного впливу на кварцові ОВ при усадці трьох матеріалів трубки ОМ на виході з ванни охолодження обладнання з виготовлення оптичного модуля показують, що при:

- зміні температури від температури плавлення матеріалів трубки ОМ до температури цеху ОВ розміщується по гелікоїді. Гелікоїда складає (від 0,014 до 0,032) % відносно базової довжини волокна при $t = 35$ °С / 308 К та матеріалу трубки ОМ із полібутилентерефталату;

- зменшенні температури цеху до 15 °С / 288 К гелікоїда зростає на 8,5 %, що відповідає її довжині в 10 см на базовій довжині $L_{ОВ} = 35$ м та при матеріалі трубки ОМ із полібутилентерефталату;

– усадка матеріалу трубки ОМ спричиняє стискання ОВ в трубці модуля та утворення її мікрОВигинів. Як відомо, сучасні ОВ мають захисне покриття, що протидіє появі макро- та мікрОВигинів [88, 108 – 111]. Тому, така незначна за величиною гелікоїда ОВ в трубці ОМ практично не впливає на конструкцію ОК.

3.4.2 Дослідження термомеханічного впливу на ОВ кабелю на етапах будівництва та умов експлуатації ВОЛЗ

Для дослідження термомеханічного впливу на ОВ кабелю на етапах будівництва та експлуатації ВОЛЗ розглянемо величини абсолютного видовження $\Delta L_{ОВ}$ і $\Delta L_{ОК}$, абсолютних довжин $\epsilon_{ОВ}$ і $\epsilon_{ОК}$ та зміни довжини ОВ відносно довжини кабелю ($\epsilon_{ОВ,ОК}$) в діапазоні температур середовища експлуатації ОК. Для розрахунку $\Delta L_{ОК}$, $\epsilon_{ОК}$ та $\epsilon_{ОВ,ОК}$ визначимо ТКЛР всього кабелю. Як об'єкт дослідження виберемо діелектричний 6-модульний ОК (рис. 3.1), що містить у своїй конструкції елементи з параметрами згідно до табл. В.2 Додатку В. Особливістю кабелю є розташування оптичних модулів вздовж поздовжньої вісі склопластикового ЦСЕ без їх скручування (рис. 3.1).

Очевидно, що через різні значення ТКЛР ОВ та ОК, при зміні температури довжини цих елементів зміняться по різному. Таким чином, ОВ в осерді ОК будуть підлягати діям сил розтягу або стискання при зміні температури, аналогічно ситуації інтеграції їх в трубку ОМ.

Як відомо, в конструкцію ОК, наприклад діелектричних, можуть входити елементи, які мають різні (додатні та від'ємні) значення α_0 . Тоді реакція кабелю на зміну температури є складним процесом та потребує визначення ТКЛР всього кабелю за виразом [136]:

$$\alpha_{ОК} = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i E_i S_i}{\sum_{i=1}^n E_i S_i}, \quad (3.5)$$

де $\alpha_{ОК}$ – ТКЛР оптичного кабелю, K^{-1} ; α_i, E_i, S_i – ТКЛР, K^{-1} , модуль Юнга, H/mm^2 ,

та площа поперечного перетину, мм^2 , i -го елемента кабелю, відповідно; n – кількість елементів кабелю, які приймають механічне навантаження.

У практиці розрахунку модульної конструкції ДСОК часто використовується 6-модульна конструкція з ЦСЕ зі склопластикового стержня діаметром (від 2 до 3) мм і різною кількістю арамідних ниток «Тварон» типів D2200, D1055, або D1052.

Згідно з [86, 110, 136] площі склопластикового стержня й шару арамідних ниток визначалися за формулами:

$$S_{\text{сст}} = \frac{\pi d_{\text{сп}}^2}{4}, \quad S_{\text{ан}} = \frac{LD}{\rho} n \cdot 10^{-4}, \quad (3.6)$$

де $S_{\text{сст}}$, $S_{\text{ан}}$ – відповідно площа поперечного перетину склопластикового стержня й шару арамідних ниток, мм^2 ; $d_{\text{сп}}$ – діаметр склопластикового стержня, мм; LD – лінійна щільність однієї нитки, текс; ρ – щільність арамідних ниток, г/см^3 ; n – кількість ниток, шт.

Для досліджень використаємо наведені у табл. В.2 Додатку В довідкові значення ТКЛР і модуля Юнга матеріалів елементів ДСОК згідно [34, 118].

На основі виразів (3.5) та (3.6) для вибраної конструкції ОК з кварцовими ОВ, різними матеріалами трубки ОМ та різною кількістю арамідних ниток (12, 18 та 24 шт.) ПСЕ були розраховані значення ТКЛР ОК $\alpha_{\text{ОК}}$, приведені в табл. 3.2.

По аналогії з виразами (3.1) – (3.3) для оцінки термомеханічного впливу на ОВ в трубці ОМ (підрозділ 3.3), проведемо дослідження залежностей $\Delta L_{\text{ОК}}$, $\varepsilon_{\text{ОК}}$ та $\varepsilon_{\text{ОВ,ОК}}$ від зміни температури при: початковій довжині $L = 1$ км, $t = 60$ °C / 333 К, 12 арамідних нитках ПСЕ та матеріалу трубки ОМ із полібутилентерефталата. Тоді, $\Delta L_{\text{ОК}}$, $\varepsilon_{\text{ОК}}$ та $\varepsilon_{\text{ОВ,ОК}}$ будуть дорівнювати:

$$\Delta L_{\text{ОК}} = 10^3 \cdot 13,52 \cdot 10^{-6} \cdot (333 - 293) = 0,541 \text{ м};$$

$$\varepsilon_{\text{ОК}} = 13,52 \cdot 10^{-6} \cdot (333 - 293) = 0,541 \cdot 10^{-3} (0,054 \%);$$

$$\varepsilon_{\text{ОВ,ОК}} = (5,5 \cdot 10^{-7} - 135,2 \cdot 10^{-7}) \cdot (333 - 293) = -0,52 \cdot 10^{-3} (-0,052 \%).$$

Результати розрахунків $\Delta L_{\text{ОК}}$, $\varepsilon_{\text{ОК}}$ та $\varepsilon_{\text{ОВ,ОК}}$ і значення величин $\Delta L_{\text{ОВ}}$, $\varepsilon_{\text{ОВ}}$ та

$\varepsilon_{ОВ,ТОМ}$ (табл. 3.1) зведені до табл. 3.3.

Аналіз результатів розрахунків (табл. 3.3) показав, що за температури $t = 60\text{ }^{\circ}\text{C} / 333\text{ K}$ та трубки ОМ із полібутилентерефталату:

- абсолютна довжина ОК більша абсолютної довжини ОВ в 24,55 рази;
- зміна довжини ОВ відносно довжини ОК складає мінус 0,052 %, а відносно довжини трубки ОМ – мінус 0,6 % (підрозділ 3.3);

Таблиця 3.2 – Розрахункові значення ТКЛР ОК при різних матеріалах трубки ОМ та кількості арамідних ниток ПСЕ

Матеріал трубки ОМ	Температурний коефіцієнт лінійного розширення кабелю $\alpha_{ОК} \cdot 10^{-6}, \text{K}^{-1}$, при кількості арамідних ниток ПСЕ, шт.		
	12	18	24
полібутилентерефталат	13,52	9,01	6,45
поліамід	12,08	8,01	5,67
полікарбонат	12,20	8,12	5,77

Таким чином, при даній температурі ОВ буде коротше відносно ОК. Тому, на нього діють сили розтягу, що спричиняють незначне видовження ОВ, яке є меншим, ніж його видовження при розтягуванні тільки в одній трубці ОМ.

Результати розрахунків залежностей зміни довжини ОВ відносно довжини ОК від температури умов експлуатації та різних матеріалів трубки ОМ кабелю приведені в табл. 3.4 та на рис. 3.5.

Аналізуючи величину зміни довжини ОВ у вибраній конструкції ОК можна прийти до висновку, що при термомеханічному впливі дія додатніх температур на ОК в цілому є більшою, ніж дія від'ємних температур, за рахунок появи незначних сил розтягу волокна ($\sim 0,05\%$), тому при проектуванні конструкції ОК $\varepsilon_{ОВ,ОК}$ не потрібно враховувати.

Таблиця 3.3 – Зміна $\Delta L_{ОВ}$, $\Delta L_{ОК}$, $\epsilon_{ОВ}$, $\epsilon_{ОК}$, $\epsilon_{ОВ,ОК}$ та характер стану ОВ при різних температурах

Тем- пера- тура t , °C К	Зміна значень $\Delta L_{ОВ}$, м, при:		Зміна значень $\Delta L_{ОК,м,при}$:		Зміна значень $\epsilon_{ОВ}$, %, при:		Зміна значень $\epsilon_{ОК}$, %, при:		Зміна значень $\epsilon_{ОВ,ОК}$, %, при:		Характер стану ОВ при:	
	збіль- шен- ні t	змен- шен- ні t	збіль- шен- ні t	змен- шен- ні t	збіль- шен- ні t	змен- шен- ні t	збіль- шен- ні t	змен- шен- ні t	збіль- шен- ні t	змен- шен- ні t	збіль- шен- ні t	змен- шен- ні t
$\frac{+60}{+333}$	0,022	–	0,54	–	$2,2 \cdot 10^{-3}$	–	$54 \cdot 10^{-3}$	–	–0,052	–	*	–
$\frac{+40}{+313}$	0,011	–	0,27	–	$1,1 \cdot 10^{-3}$	–	$27 \cdot 10^{-3}$	–	–0,026	–		–
$\frac{+20}{+293}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	–	–
$\frac{0}{+273}$	–	–0,011	–	–0,27	–	$-1,1 \cdot 10^{-3}$	–	$-27 \cdot 10^{-3}$	–	0,026	–	**
$\frac{-20}{+253}$	–	–0,022	–	–0,54	–	$-2,2 \cdot 10^{-3}$	–	$-54 \cdot 10^{-3}$	–	0,052	–	
$\frac{-40}{+233}$	–	–0,033	–	–0,81	–	$-3,3 \cdot 10^{-3}$	–	$-81 \cdot 10^{-3}$	–	0,078	–	

Примітка: * видовження конструкції ОК більше видовження ОВ, поява незначних сил розтягу ОВ;

** скорочення конструкції кабелю більше скорочення ОВ, поява незначних сил стискання ОВ;

1) значення ТКЛР матеріалів з кварцового ОВ $\alpha_{ОВ} = 5,5 \cdot 10^{-7}$, K^{-1} , та полібутилентерефталатної трубки ОМ, $\alpha_{ТОМ} = 1,5 \cdot 10^{-4}$, K^{-1} ;

2) початкова довжина ОВ, $L_{ОВ} = L_{ОК}$ при температурі $t_0 = +20$ °C / 293 К.

Таблиця 3.4 – Результати розрахунку зміни довжини ОВ відносно довжини ОК з різними матеріалами трубки ОМ, 12 арамідними нитками при температурі навколишнього середовища в діапазоні (мінус 40 ...+60) °С

№	Матеріал трубки ОМ	Значення $\varepsilon_{ОВ,ОК}$, %, при температурі t , °С					
		-40	-20	0	+20	+40	+60
1	Полібутилентерефталат	0,078	0,052	0,026	0	-0,026	-0,052
2	Поліамід	0,069	0,046	0,023	0	-0,023	-0,046
3	Полікарбонат	0,070	0,047	0,023	0	-0,023	-0,047

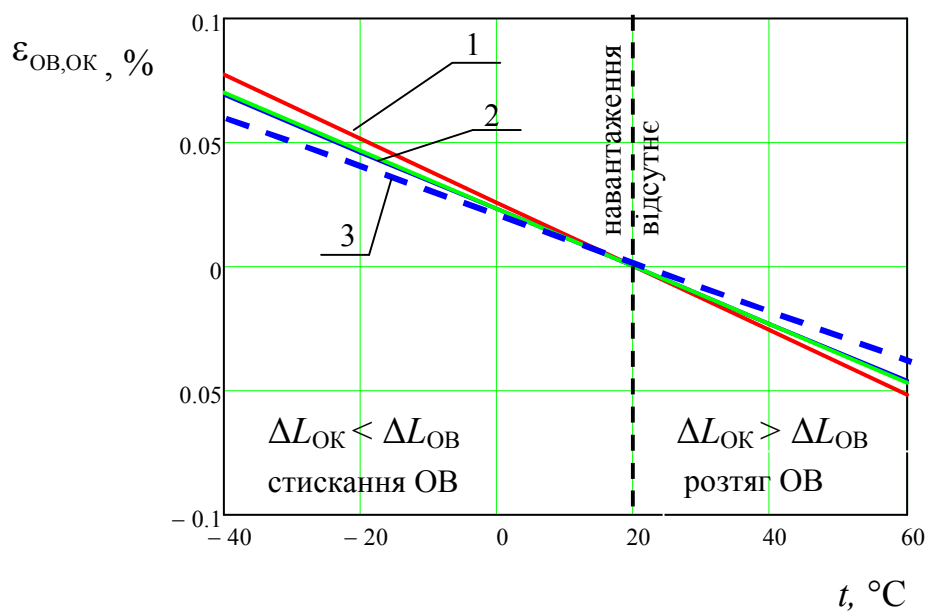


Рисунок 3.5 – Зміна довжини ОВ відносно довжини ОК за різних температур і матеріалів трубки ОМ: 1 – полібутилентерефталат; 2 – поліамід; 3 – полікарбонат

Проведені в цьому підрозділі дослідження показали, що:

а) термомеханічні впливи на ОВ при виробництві та експлуатації ОК практично мало впливають на зміну довжини волокна;

б) результати розрахунків зміни довжини ОВ відносно довжини трубки ОМ при виробництві кабелю та відносно довжини ОК при експлуатації дозволили встановити, що:

– через менше значення ТКЛР матеріалу ОВ стають довгими за трубку ОМ при її усадженні. Це спричиняє їх розташуванню в трубці за гелікоїдою та

приводить до створення їх технологічного запасу та збільшення максимального розтягувального зусилля конструкції кабелю;

– дія підвищення температури на готову конструкцію ОК не приводить до появи надмірних розтягувальних зусиль, що спричиняють ініціювання мікротріщин або навіть розривів волокна. Це не потребує необхідності врахування та створення певної надлишкової довжини волокна при його інтеграції в трубку ОМ на виробництві.

3.5 Розробка методу оцінки температурного впливу умов експлуатації ВОЛЗ на геометричні розміри і параметри осердя ОК

Обґрунтування необхідності методу. Як зазначалося у попередніх розділах, забезпечення фізичної цілісності та стабільності передавальних характеристик ОВ є найважливішою задачею при розробці та виробництві конструкцій ОК, будівництві та експлуатації ВОЛЗ [21, 60]. Це обумовило розробку низки конструкцій ОК, які відрізняються різноманітністю конструктивних рішень, якістю, параметрами та матеріалами елементів й здатні забезпечити дану задачу.

Одним із важливих моментів розробки конструкції ОК є забезпечення термостабільності передбачених її розробниками характеристик при зміні температури. Воно виникає тому, що при зміні температури ОК з'являється пружно-деформований стан внаслідок різниці ТКЛР матеріалів його елементів, в першу чергу, ОВ та трубки ОМ [4, 53]. Цей стан ОК може привести до появи в ОВ розтягувальних або стискальних зусиль, які можуть спричинити непередбачену зміну параметрів передавання. Зазначене вище досягається шляхом забезпечення найменшого контакту ОВ або скрутня ОВ та внутрішньої поверхні стінки трубки ОМ та на практиці, як правило, реалізується при температурі виготовлення ОК вільним розміщення ОВ в трубці ОМ (рис. 3.6).

Таким чином, під дією температури поздовжні та поперечні розміри елементів осердя ОК (ОВ, трубки ОМ, ЦСЕ) змінюються у відповідності до

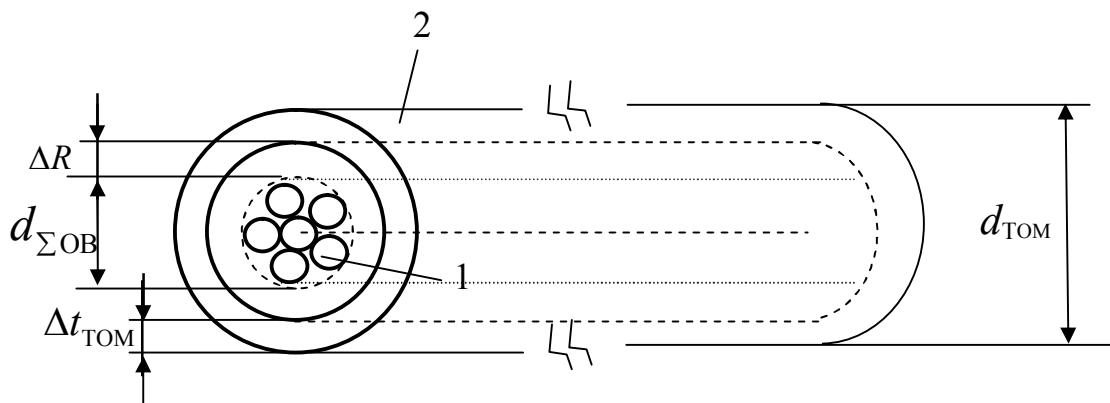


Рисунок 3.6 – Скрутень оптичних волокон, вільно укладених в трубці ОМ:

1 – оптичне волокно; 2 – трубка оптичного модуля

значень ТКЛР їх матеріалів.

Крім того, в літературних джерел, наприклад, [51, 53, 136, 137] зазначено, що важливим моментом при конструюванні ОК є правильний вибір $d_{\text{ОМ}}$, $\Delta t_{\text{ОМ}}$ та $n_{\text{ОВ}}$ з забезпеченням необхідного простору всередині ОМ для вільного пересування в ньому волокон під дією механічних навантажень на кабель. Зазначені геометричні розміри елементів дозволяють визначати $\epsilon_{\text{ДК}}$, яке є критерієм розрахунку $F_{\text{МК}}$, що регламентується в ТУ на виріб і повинне забезпечуватися протягом усього нормативного терміну служби.

Дана ситуація вказує на необхідність досліджень впливу температури на геометричні параметри елементів конструкції ОК, оскільки в даний час в технічній літературі відсутні повною мірою дані про результат температурного впливу на геометричні розміри елементів та параметри конструкції ОК.

Метою даного підрозділу є розробка методу оцінки температурного впливу умов експлуатації ВОЛЗ на геометричні розміри і конструктивні параметри осердя одноповивного ОК з числом трубок ОМ від 3 до 12.

Конструкція ОК проєктується з урахуванням забезпечення мінімальної взаємодії матеріалів ОВ та інших елементів при виготовленні та експлуатації, а також при зміні їх розмірів під дією різної температури [4, 95, 112, 114, 136].

Наявність в конструкції ОК елементів, виготовлених із матеріалів з різними α_0 , є причиною різної зміни їх геометричних розмірів.

Теоретична складова методу.

1. *Оцінка температурного впливу умов експлуатації ОК на геометричні розміри елементів його осердя.*

В [21, 34] показано, що для випадку рівності α_0 матеріалів трубки ОМ та α_0 ОВ, діаметр трубки оптичного модуля може бути прийнятий як:

$$d_{\text{ТОМ}} = d_{\text{ОВ}} + 2 \cdot \Delta t_{\text{ТОМ}}, \quad (3.7)$$

де $d_{\text{ТОМ}}$ – діаметр трубки ОМ, мм; $d_{\text{ОВ}}$ – діаметр ОВ або скрутня ОВ, мм; $\Delta t_{\text{ТОМ}}$ – радіальна товщина стінки трубки ОМ, мм.

Тоді мінімальний діаметр трубки ОМ з урахуванням взаємодії ОВ та внутрішньої поверхні стінки трубки ОМ, а також зміни радіальних розмірів цих елементів при зміні температури, може визначатися за виразом [136]:

$$d_{\text{мін}} = \frac{2 \cdot \Delta t_{\text{ТОМ}} [1 + \alpha_{\text{ТОМ}} (t - 20)] + d_{\text{ОВ}} [1 + \alpha_{\text{ОВ}} (t - 20)]}{1 - \sqrt{1 + \frac{\text{ctg}^2 \frac{\pi}{n}}{\sin^2 \theta} \cdot \frac{\Delta \alpha \cdot (t - 20)}{2 \cos^2 \theta}}}, \quad (3.8)$$

де $d_{\text{мін}}$ – мінімальний діаметр трубки ОМ, мм; $\alpha_{\text{ТОМ}}$, $\alpha_{\text{ОВ}}$ – ТКЛР матеріалів трубки ОМ та ОВ, відповідно, K^{-1} ; t – температура умов спостереження, $^{\circ}\text{C}$; n – кількість елементів осердя, укладених навколо центрального силового елемента; θ – кут спірального укладання елементів в повиві осердя кабелю, рад; $\Delta \alpha$ – різниця ТКЛР матеріалів ОВ та трубки ОМ, K^{-1} .

Проте на практиці в реальних конструкціях ОК при використанні існуючих полімерних матеріалів рівність ТКЛР трубки ОМ та ОВ не існує, тому діаметр трубки оптичного модуля вибирається більшим за величину $d_{\text{ОВ}} + 2 \cdot \Delta t_{\text{ТОМ}}$. Тобто на величину, яка передбачає врахування відстані (зазор, заповнений гідрофобним заповнювачем) між ОВ та внутрішньою поверхнею стінки трубки ОМ задля забезпечення можливості їх вільного пересування. Виходячи з [136] та рис. 1.10, відстань ΔR між ОВ та внутрішньою поверхнею стінки трубки ОМ, при осьовому розташуванні волокон в модулі визначається за виразом (1.6).

При зміні температури ΔR змінюється на додаткову величину через зміну радіальних розмірів трубки ОМ та ОВ на величину відстані між ОВ (скрутнем

ОВ) та внутрішньою поверхністю трубки ОМ. Вона визначається згідно [136]:

$$\Delta R_{\text{дод}}(t) = \left[\left(d_{\text{ТОМ}}^{20} - 2 \cdot \Delta t_{\text{ТОМ}}^{20} \right) \alpha_{\text{ТОМ}} - d_{\text{ОВ}}^{20} \cdot \alpha_{\text{ОВ}} \right] \frac{(t - 20)}{2}, \quad (3.9)$$

де $\Delta R_{\text{дод}}(t)$ – додаткова відстань між ОВ (скрутнем ОВ) та внутрішньою поверхнею трубки ОМ, мм; $d_{\text{ТОМ}}^{20}$, $\Delta t_{\text{ТОМ}}^{20}$, $d_{\text{ОВ}}^{20}$ – діаметр трубки ОМ, її радіальна товщина та діаметр ОВ (скрутня ОВ) при температурі 20°C, мм; $\alpha_{\text{ТОМ}}$, $\alpha_{\text{ОВ}}$ – ТКЛР трубки ОМ та ОВ, відповідно, K⁻¹; t – температура умов експлуатації ОК, °C.

Тоді, загальний вираз для визначення відстані ΔR при зміні температури умов експлуатації згідно [136] дорівнює:

$$\begin{aligned} \Delta R(t) &= \Delta R^{20} + \Delta R_{\text{дод}}(t) = \\ &= \frac{1}{2} \left[\left(d_{\text{ТОМ}}^{20} - 2 \cdot \Delta t_{\text{ТОМ}}^{20} \right) \left[1 + \alpha_{\text{ТОМ}}(t - 20) \right] - d_{\text{ОВ}}^{20} \left[1 + \alpha_{\text{ОВ}}(t - 20) \right] \right], \end{aligned} \quad (3.10)$$

де $\Delta R(t)$ – відстань між ОВ (скрутнем ОВ) та внутрішньою поверхністю трубки ОМ при зміні температури умов експлуатації ОК, мм; ΔR^{20} – відстань між ОВ (скрутнем ОВ) та внутрішньою поверхністю трубки ОМ при температурі 20 °C, мм; $\Delta R_{\text{дод}}(t)$ – додаткова відстань між ОВ (скрутнем ОВ) та внутрішньою поверхністю трубки ОМ, мм; $d_{\text{ТОМ}}^{20}$, $\Delta t_{\text{ТОМ}}^{20}$, $d_{\text{ОВ}}^{20}$ – діаметр трубки ОМ, її радіальна товщина та діаметр ОВ (скрутня ОВ) при температурі 20 °C, мм; $\alpha_{\text{ТОМ}}$, $\alpha_{\text{ОВ}}$ – ТКЛР трубки ОМ та ОВ, відповідно, K⁻¹; t – температура експлуатації ОК, °C.

Зміна вільного простору в трубці ОМ зменшує можливість ОВ переміщатися при появі прикладених, в першу чергу, поздовжніх сил до кабелю. Це спричиняє зменшення його відносного видовження, й, таким чином, обмеження його механічної міцності.

Одним із конструктивних параметрів осердя ОК є його $\varepsilon_{\text{дк}}$ при $t = 20$ °C, яке можливо визначати за виразом (1.4). З урахуванням усіх геометричних розмірів елементів осердя ОК, залежних від температури експлуатації, цей вираз можливо згідно до [21, 112, 136, 139] представити:

$$\varepsilon_{\text{дк}}(t) = -1 + \sqrt{1 + \frac{4\pi^2 R^2(t)}{h^2(t)} \left(\frac{2\Delta R(t)}{R(t)} - \frac{\Delta R^2(t)}{R^2(t)} \right)}, \quad (3.11)$$

де $\varepsilon_{\text{дк}}(t)$ – допустиме відносне видовження ОК при температурі експлуатації (t в $^{\circ}\text{C}$); $R(t)$ – радіус спірального укладання елементів повиву в осерді при температурі експлуатації ОК, мм; $\Delta R(t)$ – відстань між ОБ (скрутнем ОБ) та внутрішньою поверхнею трубки ОМ при температурі експлуатації ОК, мм; $h(t)$ – крок спірального укладання елементів повиву при температурі експлуатації, мм.

Крок спірального укладання елементів повиву ОК змінюється в залежності від його конструкції та визначається згідно до [136] зі співвідношення до осьової довжини елемента:

$$\Delta h(t) = \frac{h^{20} \cdot \Delta l_{\text{ТОМ}}(t)}{l_{\text{ТОМ}}^{20}}, \quad (3.12)$$

де $\Delta h(t)$ – зміна кроку спірального укладання елементів повиву при температурі експлуатації, мм; h^{20} – крок укладання елементів повиву при температурі 20°C , мм; $\Delta l_{\text{ТОМ}}(t)$ – зміна довжини трубки ОМ при температурі експлуатації ОК, мм; $l_{\text{ТОМ}}^{20}$ – початкова довжина трубки ОМ при температурі 20°C , мм.

У цьому виразі $\Delta l_{\text{ТОМ}}$ та $l_{\text{ТОМ}}$ визначаються за виразами:

$$\Delta l_{\text{ТОМ}}(t) = l_{\text{ТОМ}}^{20} \cdot \alpha_{\text{ТОМ}}(t - 20), \quad l_{\text{ТОМ}}^{20} = \sqrt{(h^{20})^2 + (2 \cdot \pi \cdot R)^2}, \quad (3.13)$$

де $\Delta l_{\text{ТОМ}}(t)$ – зміна довжини трубки ОМ при температурі ОК ($^{\circ}\text{C}$), мм; $l_{\text{ТОМ}}^{20}$ – початкова довжина трубки ОМ при температурі 20°C , мм; $\alpha_{\text{ТОМ}}$ – ТКЛР трубки ОМ, K^{-1} ; t – температура експлуатації ОК, $^{\circ}\text{C}$; h^{20} – крок укладання елементів повиву при температурі 20°C , мм; R – радіус спірального укладання елементів повиву в кабелі, мм.

Згідно до рис. 2.10, радіус спірального укладання елементів повиву в осерді кабелю при температурі експлуатації ОК визначається за виразом:

$$R = \frac{d_{\text{ЦСЕ}}(t) + d_{\text{ТОМ}}(t)}{2}, \quad (3.14)$$

де R – радіус спірального укладання елементів повиву в осерді ОК, мм; $d_{\text{ЦСЕ}}(t)$, $d_{\text{ТОМ}}(t)$ – діаметри ЦСЕ та трубки ОМ при температурі експлуатації ОК, відповідно, мм.

Між діаметрами трубки ОМ та ЦСЕ існує зв'язок [3, 4, 136, 137], який характеризується коефіцієнтом k_{π} . Цей коефіцієнт залежить від кількості елементів повиву, а зв'язок між $d_{\text{ТОМ}}$ та $d_{\text{ЦСЕ}}$ визначається за виразом:

$$d_{\text{ЦСЕ}}(t) = d_{\text{ТОМ}}(t) \cdot k_{\pi}, \quad (3.15)$$

де $d_{\text{ЦСЕ}}(t)$, $d_{\text{ТОМ}}(t)$ – діаметри ЦСЕ та трубки ОМ при температурі експлуатації ОК, відповідно, мм; k_{π} – коефіцієнт зв'язку між діаметрами ЦСЕ та трубки ОМ (розділ 2).

Проте у випадку температурної зміни $\varepsilon_{\text{дк}}$ ОК за виразами (1.4) та (3.11) використовувати спрощений вираз (3.15) некоректно, оскільки втрачається зв'язок з α_0 матеріалу силового елемента.

Згідно до [136] зміну діаметрів трубки ОМ та ЦСЕ при температурі експлуатації ОК можна визначити за виразами:

$$\begin{aligned} d_{\text{ТОМ}}(t) &= d_{\text{ТОМ}}^{20} [1 + \alpha_{\text{ТОМ}}(t - 20)], \\ d_{\text{ЦСЕ}}(t) &= d_{\text{ЦСЕ}}^{20} [1 + \alpha_{\text{ЦСЕ}}(t - 20)]. \end{aligned} \quad (3.16)$$

де $d_{\text{ТОМ}}(t)$, $d_{\text{ЦСЕ}}(t)$ – діаметри трубки ОМ та ЦСЕ при температурі експлуатації (в °С), відповідно, мм; $d_{\text{ТОМ}}^{20}$, $d_{\text{ЦСЕ}}^{20}$ – діаметр трубки ОМ та ЦСЕ при температурі 20 °С, мм; $\alpha_{\text{ТОМ}}$, $\alpha_{\text{ЦСЕ}}$ – ТКЛР матеріалу трубки ОМ та ЦСЕ, відповідно, К⁻¹; t – температура експлуатації ОК, °С.

2. Оцінка температурного впливу умов експлуатації ОК на конструктивні параметри його осердя.

Згідно [136], результуючий вираз визначення $\varepsilon_{\text{дк}}$ ОК за температурою впливу на геометричні розміри елементів повиву кабелю має вид:

$$\varepsilon_{\text{дк}}(t) = -1 + \sqrt{1 + \frac{4\pi^2}{(h^{20} + \Delta h)^2} \left(d_{\text{ТОМ}}^{20} \left(\frac{[1 + \alpha_{\text{ТОМ}}(t - 20)] + (k + 1)[1 + \alpha_{\text{ЦСЕ}}(t - 20)]}{(k + 1)[1 + \alpha_{\text{ЦСЕ}}(t - 20)]} \right) \Delta R(t) - \Delta R(t)^2 \right)}, \quad (3.17)$$

де $\varepsilon_{\text{дк}}(t)$ – допустиме відносне видовження ОК за температурою умов експлуатації; h^{20} – крок спірального укладання елементів повиву при температурі 20 °С, мм; Δh – зміна кроку укладання згідно за виразом (3.12), мм;

$d_{\text{ТОМ}}^{20}$ – діаметр трубки ОМ при температурі 20 °С, мм; $\alpha_{\text{ТОМ}}$, $\alpha_{\text{ЦСЕ}}$ – ТКЛР матеріалів трубки ОМ та ЦСЕ, відповідно, K^{-1} ; t – температура експлуатації ОК, °С; $k_{\text{п}}$ – 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.

Цей конструктивний параметр ОК забезпечує його допустимого розтягувального зусилля ЦСЕ за виразом:

$$F_{\text{дкЦСЕ}}(t) = \varepsilon_{\text{дк}}(t) \cdot E_{\text{ЦСЕ}} \cdot S_{\text{ЦСЕ}}, \quad (3.18)$$

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, Н/мм^2 ; $S_{\text{ЦСЕ}}$ – площа поперечного перетину ЦСЕ, мм^2 .

Даний метод дозволяє також встановити геометричні розміри елементів одноповивної конструкції ОК з числом ОМ від 3 до 12 при зміні температури експлуатації ВОЛЗ. Розрахункові вирази для визначення геометричних розмірів елементів та конструктивних параметрів осердя одноповивної конструкції кабелю з числом ОМ від 1 до 12 при зміні температури експлуатації ОК наведені в табл. 3.5.

Експериментальна складова методу. Використовуючи удосконалені вирази (3.17) та (3.18) визначено температурну залежність $\varepsilon_{\text{дк}}(t)$ та $F_{\text{дкЦСЕ}}(t)$ за рахунок ЦСЕ 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, діаметр трубки ОМ $d_{\text{ТОМ}}^{20}$ 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 скрутня 12 кварцових ОВ $d_{\text{ОВ}}^{20} = 1,06$ мм [53].

Результати розрахунків $\varepsilon_{\text{дк}}(t)$ при різних діаметрах трубки ОМ із полібутилентерефталату в діапазоні температур умов експлуатації (від мінус 40 до +60) °С показано на рис. 3.7.

Таблиця 3.5 – Розрахункові вирази для визначення геометричних розмірів елементів та конструктивних параметрів осердя одноповивного ОК

Назва елементу, його розміру та конструк- тивного параметру осердя ОК	Вирази для розрахунку		Номер виразу
	геометричних розмірів та конструктивних параметрів осердя кабелю	складові виразу	
1	2	3	4
Геометричних розмірів елементів осердя			
Зміна кроку спірального укладання елементів повиву при температурі експлу- атації ОК	$\Delta h(t) = \frac{h^{20} \cdot \Delta l_{\text{ТОМ}}(t)}{l_{\text{ТОМ}}^{20}},$ $\Delta l_{\text{ТОМ}}(t) = l_{\text{ТОМ}}^{20} \cdot \alpha_{\text{ТОМ}}(t - 20),$ $l_{\text{ТОМ}}^{20} = \sqrt{(h^{20})^2 + (2 \cdot \pi \cdot R)^2}.$	h^{20} – крок спірального укладання елементів повиву при температурі 20 °С, мм; $\Delta l_{\text{ТОМ}}(t)$ – зміна довжини трубки ОМ при температурі експлуатації ОК, мм; $l_{\text{ТОМ}}^{20}$ – початкова довжина трубки ОМ при температурі 20 °С, мм.	(3.12)
Радіус спірального укладання елементів	$R(t) = \frac{d_{\text{ЦСЕ}}(t) + d_{\text{ТОМ}}(t)}{2}.$	$d_{\text{ЦСЕ}}(t)$ – діаметр ЦСЕ при температурі експлуатації ОК, мм; $d_{\text{ТОМ}}(t)$ – діаметр	(3.14)

Продовження табл. 3.5

1	2	3	4
повиву в осерді кабелю при температурі його експлуатації		трубки ОМ при температурі експлуатації ОК, мм.	
Діаметри трубки ОМ та ЦСЕ при температурі експлуатації ОК	$d_{\text{ТОМ}}(t) = d_{\text{ТОМ}}^{20} [1 + \alpha_{\text{ТОМ}}(t - 20)]$ $d_{\text{ЦСЕ}}(t) = d_{\text{ЦСЕ}}^{20} [1 + \alpha_{\text{ЦСЕ}}(t - 20)]$	$d_{\text{ТОМ}}^{20}, d_{\text{ЦСЕ}}^{20}$ – діаметр трубки ОМ та ЦСЕ при температурі 20 °С, мм; $\alpha_{\text{ТОМ}}, \alpha_{\text{ЦСЕ}}$ – ТКЛР матеріалу трубки ОМ та ЦСЕ, відповідно, К ⁻¹ ; t – температура експлуатації ОК, °С	(3.16)
Конструктивні параметри осердя			
Допустиме відносне видовження ОК при температурі його експлуатації	$\varepsilon_{\text{дк}}(t) = -1 + \sqrt{1 + \frac{4\pi^2}{(h^{20} + \Delta h(t))^2}} \cdot \frac{d_{\text{ТОМ}}^{20} \left([1 + \alpha_{\text{ТОМ}}(t - 20)] + (k_{\text{п}} + 1)[1 + \alpha_{\text{ЦСЕ}}(t - 20)] \right)}{\Delta R(t) - \Delta R^2(t)}.$	h^{20} – крок спірального укладання елементів повиву при температурі 20 °С, мм; $\Delta h(t)$ – зміна кроку спірального укладання елементів повиву при температурі експлуатації ОК, мм; $d_{\text{ТОМ}}^{20}$ – діаметр трубки ОМ при температурі 20 °С, мм; t – температура експлуатації ОК, °С;	(3.17)

Закінчення табл.3.5

1	2	3	4
		$\alpha_{\text{ТОМ}}, \alpha_{\text{ЦСЕ}}$ – ТКЛР матеріалів трубки ОМ та ЦСЕ, відповідно, K^{-1} ; k_{π} – коефіцієнт зв'язку між діаметрами ЦСЕ та трубки ОМ (табл. 2.14); $\Delta R(t)$ – відстань між ОВ (скрутнем ОВ) та внутрішньою поверхнею стінки трубки ОМ при температурі експлуатації ОК, мм.	
Коефіцієнт зв'язку між діаметрами ЦСЕ та трубки ОМ	$k_{\pi} = \frac{d_{\text{ЦСЕ}}(t)}{d_{\text{ТОМ}}(t)}$	$d_{\text{ЦСЕ}}(t)$ – діаметр ЦСЕ при температурі експлуатації ОК, мм; $d_{\text{ТОМ}}(t)$ – діаметр трубки ОМ при температурі експлуатації ОК, мм.	(3.15) Значення для конструкцій ОК з числом елементів від 3 до 12 приведені в табл. 2.14
Допустиме розтягувальне зусилля ОК за рахунок ЦСЕ при температурі експлуатації	$F_{\text{дкЦСЕ}}(t) = \varepsilon_{\text{дк}}(t) \cdot E_{\text{ЦСЕ}} \cdot S_{\text{ЦСЕ}};$ $S_{\text{ЦСЕ}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{ЦСЕ}}^2}{4}.$	$\varepsilon_{\text{дк}}(t)$ – допустиме відносне видовження кабелю при температурі експлуатації ОК; $E_{\text{ЦСЕ}}$ – модуль Юнга ЦСЕ, $\text{H}/\text{мм}^2$; $S_{\text{ЦСЕ}}$ – площа поперечного перетину ЦСЕ, мм^2 .	(3.18)

На рис. 3.8, а, б показано температурні залежності допустимого відносного видовження та допустимого розтягувального зусилля за рахунок ЦСЕ ОК при діаметрі трубки ОМ 2,3 мм та матеріалах трубки ОМ згідно табл. В.2 Додатку В.

В табл. 3.6 приведено результати досліджень їх температурних залежностей $\epsilon_{\text{дк}}(t)$, які показують, що при зміні температури в діапазоні (мінус 40...+60) °С вибір матеріалу трубки ОМ обумовлює зміну геометричних розмірів трубки модуля та свободу переміщення ОВ всередині нього.

Аналіз результатів досліджень температурного впливу умов експлуатації ВОЛЗ на геометричні розміри і параметри осердя ОК. Дослідження температурних залежностей $\epsilon_{\text{дк}}(t)$ та $F_{\text{дкЦСЕ}}(t)$ від матеріалу трубки ОМ (рис. 3.8, а, б) показало, що застосування полікарбонату як матеріал трубки ОМ забезпечить їх менші зміни, а тому й загальної величини допустимої поздовжньої механічної міцності кабелю.

Надання рекомендацій з використання методу. Дослідження оцінки температурного впливу умов експлуатації ВОЛЗ на геометричні розміри і параметри осердя ОК створює можливість оптимізації їх конструкцій для ефективного проєктування та експлуатації ліній ТЕКМ зв'язку. Результати цих досліджень рекомендується використовувати заводам-виробникам в процесі розробки та проєктування конструкцій ОК і їх виробництва.

Висновки. На основі розробленого методу оцінки температурного впливу умов експлуатації кабелю ВОЛЗ на геометричні розміри елементів і конструктивні параметри осердя одноповивного ОК було:

- одержано вирази для визначення допустимого відносного видовження кабелю і його допустимого розтягувального зусилля, що забезпечується ЦСЕ, та геометричних розмірів елементів його осердя в залежності від температури в діапазоні (мінус 40...+60) °С;

- одержано температурні залежності зміни допустимого відносного видовження шестимодульної конструкції ОК і його допустимого розтягувального зусилля, що забезпечується ЦСЕ, які дозволили встановити, що його значення збільшується (зменшується) при збільшенні (зменшенні)

Таблиця 3.6 – Значення допустимого відносного видовження ОК, $\varepsilon_{\text{дк}}(t)$, при температурі експлуатації t в діапазоні (мінус 40...+60) °С

№ з/п	Матеріал трубки ОМ	Значення $\varepsilon_{\text{дк}}(t)$ при температурі експлуатації ОК t , °С					
		-40	-20	0	+20	+40	+60
1	Полібутилентерефталат	0,134	0,136	0,138	0,140	0,142	0,144
2	Поліамід	0,137	0,138	0,139	0,140	0,141	0,142
3	Полікарбонат	0,138	0,138	0,139	0,140	0,141	0,142

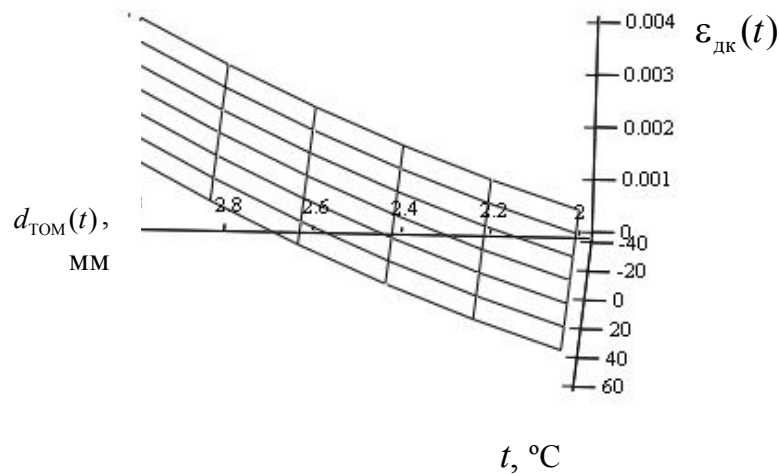


Рисунок 3.7 – Залежність $\varepsilon_{\text{дк}}(t)$ ОК при $d_{\text{ОМ}}(t)$ із полібутилентерефталата

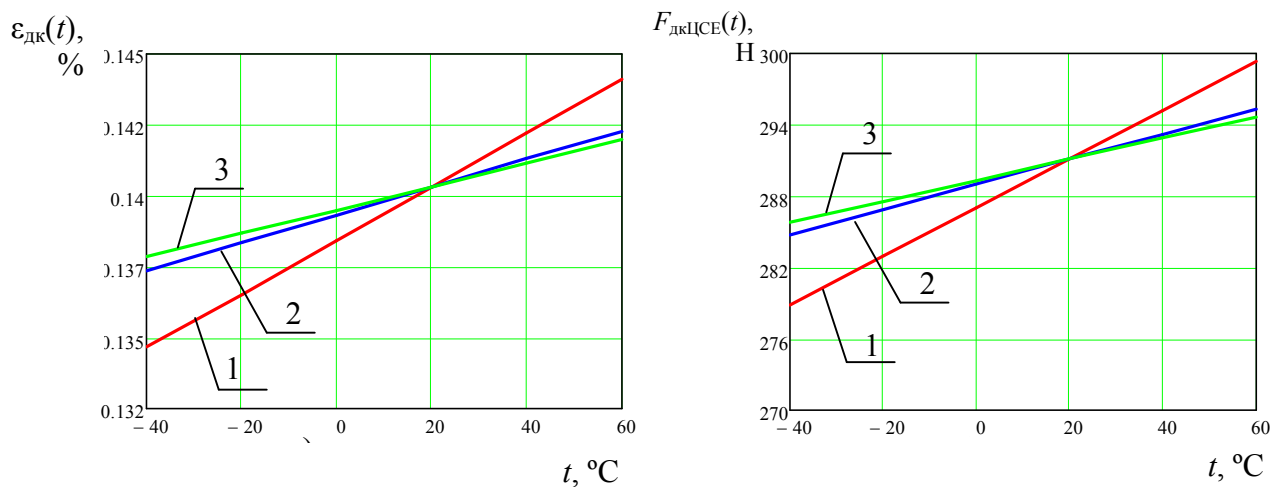


Рисунок 3.8 – Температурні залежності: а) допустимого відносного видовження ОК; б) допустимого розтягувального зусилля ОК при різних матеріалах трубки ОМ: 1 – полібутилентерефталат; 2 – поліамід; 3 – полікарбонат

температури відносно 20 °С. А також вказують на те, що застосування полікарбонату в якості матеріалу трубки ОМ, в якому розташовані кварцові ОВ, забезпечить менші зміни $\varepsilon_{\text{дж}}(t)$ та $F_{\text{джЦСЕ}}(t)$ при зміні температури відносно 20 °С;

– доведено, що для врахування при конструюванні ОК зміни поздовжньої механічної міцності кабелю та виконання правильного вибору матеріалів, зокрема трубки ОМ, ЦСЕ та ОВ, доцільно враховувати температурний вплив на геометричні розміри елементів осердя підвісного кабелю та його допустиме відносне видовження.

3.6 Аналіз основних порушень технології виробництва ОК та рекомендації з їх недопущення

Надійність кабельної ВОЛЗ в значній мірі залежить від якості та надійності її компонентів (кабелю, муфт та інших складових лінійних споруд).

Нормальна робота ВОЛЗ залежить від низки факторів. Умовно ці фактори можна розділити на внутрішні та зовнішні.

Внутрішні фактори залежать від причин, які виникають в процесі виготовлення компонентів ВОЛЗ, проектування, монтажу і експлуатації лінії.

Зовнішні фактори, що, в основному, впливають на ВОЛЗ залежать від кліматичних, механічних впливів, струмів блискавки та інше. Але величина впливу цих факторів суттєво залежить як від розробки і випуску компонентів ВОЛЗ, так і від проектування, будівництва й експлуатації лінії. Тому завжди необхідно проводити заходи, спрямовані на захист ВОЛЗ від шкідливої дії цих факторів [4, 23 – 30, 131]. У свою чергу, за характером дії на компоненти ВОЛЗ, ці фактори розділяються на конструктивно-виробничі та експлуатаційні [4, 131].

До конструктивно-виробничих належать фактори, пов'язані з розробкою, проектуванням і виготовленням кабелів.

Так, для ОК, що експлуатуються в різних умовах (ґрунті, кабельній каналізації, під водою та ін.), вимагаються різні конструктивні рішення, що забезпечують їх надійність [4, 31, 32, 54, 55, 108 – 111]. Тому від того, наскільки

повно враховані при розробці та виготовленні кабелю умови його роботи, значною мірою залежить надійність його експлуатації.

Таким чином, вплив конструктивно-виробничих факторів на надійність ВОЛЗ є першорядним, тому що недостатньо надійні компоненти не можуть забезпечити її надійну роботу.

Отже, забезпечення надійності компонентів ВОЛЗ на етапі їх виробництва є актуальним. Воно залежить від недопущення порушень технологій на підприємстві-виробнику.

В даному підрозділі в якості прикладу проведено аналіз основних причин порушень технології виробництва ОК, допущення яких є неприпустимим. Основні порушення технології виробництва ОК з'являються за рахунок відсутності або неналежної організації:

- системи вхідного контролю та випробування матеріалів і готових складових конструкції кабелю;
- роботи постійної випробувальної бази складових конструкції кабелю;
- обов'язкового контролю параметрів (оптичних модулів, осердя, захисних покривів) після кожного етапу виготовлення кабелю;
- приймання підрозділом виробничо-технологічної комісії (ВТК) за результатами приймально-здавальних вимірів кожного барабана кабелю.

Особливе значення для оцінки якості ОК відіграють їх прискорені випробування на надійність [3, 4, 10, 140 – 142], при яких якість елементів ОК, головним чином, контролюється за конструктивними, механічними і оптичними характеристиками відповідно до нормативно-технічної документації [23 – 28].

Як відзначалося раніше, контроль якості елементів ОК, установлений міжнародними стандартами, ГОСТ, ДСТУ або ТУ, зберігає в даному випадку всі свої функції, але є більш розширеним, оскільки перевіряє не тільки необхідні характеристики в даний момент часу, але також і їх відхилення у часі. При впровадженні ОК, що не пройшли перевірки якості в процесі тривалої експлуатації, випробування їх надійності, тобто придатності для тривалої експлуатації, є абсолютно необхідними [12, 131, 143 – 150].

3.7 Аналіз основних порушень технології будівництва ВОЛЗ та рекомендації з їх недопущення

Як відомо, будь-яке порушення технології під час будівництва ВОЛЗ може привести до появи додаткових матеріальних витрат при її експлуатації. Основна проблема в такому випадку полягає в тому, що низка порушень, які допускаються, наприклад, при виконанні монтажних робіт навіть досвідченими спеціалістами, не виявляється одразу при виконанні приймально-здавальних вимірювань. Тому при побудові надійної волоконно-оптичної мережі, що, крім цього, розвивається та розширюється, згадані порушення є неприпустимими. Наприклад, категорично недопустимим, але часто таким, що зустрічається, є порушення технології монтажу ВОЛЗ, коли виконується монтаж муфт без контрольних вимірів якості стику ОВ. При цьому дуже швидко та зручно будівельникам монтувати муфти в будь-якій послідовності залежно від того, де прокладено ОК, і не потрібен спеціаліст з оптичним рефлектометром на кінцевому пункті. В такому випадку можуть виникнути два недоліки. Перший з'являється при зварці ОВ з підвищеною деформацією, що в більшості випадків можливо виявити при приймально-здавальних вимірах. Другий – коли всі загасання на стиках ОВ є нульовими (0 дБ), що можливо при монтажі двох будівельних ділянок з одного барабана, а відстань до муфти в паспорті на ОК вказується приблизно. Цей недолік не виявляється при приймально-здавальних вимірюваннях. У даному випадку при подальшій експлуатації ОК під час аварійного ремонту додатковий час витрачається на визначення місця його пошкодження на місцевості. Інколи також витрачається додатковий ОК на аварійну вставку, тобто знижується рівень технічного обслуговування та, відповідно, надійність мережі ВОЛЗ [153].

Саме тому робота з будівництва ВОЛЗ вимагає від фахівців навичок як лінійника так й вимірювача-аналітика, який би зміг виконувати професійно якісно та вірно вимірювання параметрів лінійного тракту з одночасним врахуванням усіх особливостей для подальшого правильного ведення технічного

експлуатації.

Одним із рішень не кваліфікованості фахівців з точки зору виконання вимірювань на ВОЛЗ та знаходження особливостей або порушень в роботі, монтажу, прокладання кабелю та інших її елементів є створення інституту зовнішніх незалежних експертів з оцінювання якості будівництва ВОЛЗ та залучення їх до комплексу заходів при здачі лінії в експлуатацію. Це є особливо актуальним для організацій, що експлуатують мережу ВОЛЗ, проте не мають своїх кваліфікованих фахівців у галузі волоконної оптики.

Тому, якість виконаних робіт при будівництві лінійних споруд ВОЛЗ є важливим етапом, який може вплинути на показники її надійності. Цей вплив може проявитися не одразу після здачі ВОЛЗ до експлуатації [151]. Порушення технологій будівництва ВОЛЗ та її елементів в цілому може привести до пошкоджень під час експлуатації, а це знижує надійність лінії на мережі зв'язку.

На етапі будівництва ВОЛЗ виконуються такі основні роботи, які можливо згідно до [3, 25, 131] умовно поділити на:

- 1) вибір та розмітка траси магістралі з визначенням місць кабельних майданчиків;
- 2) вхідний контроль ОК на кабельному майданчику;
- 3) прокладання ОК;
- 4) монтаж оптичних муфт;
- 5) монтаж оптичного кабелю на вхідному обладнанні НРП (НПП) та ОРП (ОПП) волоконно-оптичної системи передавання;
- 6) вимірювання під час монтажу лінійного ОК;
- 7) вимірювання після прокладання та монтажу ОК;
- 8) приймально-здавальні вимірювання на регенераційних (підсилювальних) ділянках ВОСП.

Основні порушення технології будівництва ВОЛЗ складаються із похибок при:

- проведенні вхідного контролю усіх компонентів;
- виборі та реалізації методів прокладання кабелю, організації переходів

через природні та штучні перешкоди, забезпечення захисту ВОЛЗ від зовнішніх електромагнітних впливів згідно з положеннями:

а) ГБН В.2.2-34620942-002:2015. Лінійно-кабельні споруди телекомунікацій. Проектування [23];

б) КНД 45-136-99. Інструкція по захисту волоконно-оптичних кабелів зв'язку від ударів блискавки та електромагнітних впливів [26];

в) КНД 45-141-99. Керівництво щодо будівництва лінійних споруд волоконно-оптичних ліній зв'язку [25];

г) КНД 45-188-2002. Інструкція з електрохімічного захисту підземних споруд зв'язку [27];

– розробці підготовчих заходів до будівництва;

– прокладанні та монтажу ОК;

– приймально-здавальних роботах на регенераційних (підсилювальних) ділянках ВОСП.

Однією з рекомендацій із недопущення порушень при будівництві траси лінії є обов'язкове дотримання положень та рішень проектної документації лінії і, в першу чергу, мінімально допустимих відстаней до інших споруд (будівель, трамвайних та залізничних колій, ЛЕП та інше) згідно [25], приведених в Додатку В, табл. В.3.

На ділянках траси ВОЛЗ із зближенням з ЛЕП, електрифікованими залізницями, в районах з підвищеною блискавкодіяльністю, кабелі з металевими елементами рекомендується прокладати в захисних трубах для унеможливлення пробіїв захисного шлангу ОК. У таких районах ефективніше прокладення ОК без металевих елементів (але з гідрофобним заповненням). Такі ОК, незважаючи на хімічні домішки проти гризунів в зовнішній оболонці є слабозахищеними від них. Тому в районах траси магістралі з гризунами одним із способів захисту ОК від їх дії є трамбування катками засипаної траншеї після прокладання кабелю. Але при підземному прокладенні кабелів без металевих елементів виникають проблеми їх пошуку.

Досвід обліку основних порушень технологій будівництва ВОЛЗ

регіональних центрів технічної експлуатації транспортної телекомунікаційної мережі (РЦТЕТТМ) в Київській, Харківській, Полтавській, Вінницькій, Сумській областях, а також наслідки, до яких вони привели (табл. 3.7) дозволив розробити рекомендації з їх недопущення, приведені в підрозділах даного розділу.

3.7.1 Порушення технології вхідного контролю ОК на кабельному майданчику

Виконання вхідного контролю ОК на кабельному майданчику є обов'язковим заходом технології будівництва ВОЛЗ. При реалізації цього заходу виконують зовнішній огляд барабану з кабелем, його обшивки, наявність супровідної документації. Після цього розмотують кінці кабелю та перевіряють рівномірність намотування кабелю на барабані, герметизацію кінців, наявність метражних позначок на кінцях і їх відповідність паспортним даним. Подальший етап саме виконання оптичних та електричних вимірювань кабелю.

Причини основних порушень технології вхідного контролю ОК при вимірі на барабані полягають у наступному.

1. Порушення технології вимірів оптичних параметрів ОВ будівельних довжин кабелю на наявність неоднорідностей і мікротріщин та визначення загасання і довжини волокна викликаються, як правило, типовими недоліками в роботі будівельників. При цьому типові порушення при виконанні вхідного контролю ОК є проведення його без буферної котушки ОВ або відсутність самого контролю.

Основні рекомендації з недопущення порушень виконання вимірювань оптичних параметрів ОВ полягають в необхідності вмикання буферної котушки між кабелем та оптичним рефлектометром. Довжина ОВ котушки повинна бути більша довжини мертвої зони оптичного рефлектометра. В такому випадку за рефлектограмою (рис. 3.9) на лінійній ділянці можливо визначити оптичну довжину ОВ в кабелі та наявність неоднорідностей, обриву волокна, тощо.

Таблиця 3.7 – Основні порушення технології будівництва ВОЛЗ та їх наслідки

Види основних робіт при будівництві ВОЛЗ	Порушення технології виконання робіт	Можливі недоліки, викликані порушенням технології виконання робіт	Наслідки, викликані порушенням технології виконання робіт	Можливі негаразди при експлуатації ВОЛЗ
1	2	3	4	5
1. Вибір та розмітка траси ВОЛЗ	Недотримання положень та рішень проєктної документації лінії	Недотримання мінімальної відстані від ділянок траси ВОЛЗ до інших споруд	Додаткові затрати на реалізацію робіт з: – прокладання кабелю; – механізації переходів через перешкоди; – забезпечення захисту лінії від електромагнітних впливів;	Виконання додаткових робіт з ліквідації недоліків
2. Вхідний контроль ОК на кабельному майданчику	Виконання виміру: – оптичних параметрів будівельної довжини ОК без буферної котушки;	Невизначення розривів або неоднорідностей ОВ	– оцінка вимірних оптичних параметрів без урахування температури на кабельному майданчику;	Виконання додаткових робіт з ліквідації невиконання гарантійних

Продовження табл. 3.7

1	2	3	4	5
	– електричних параметрів будівельної довжини ОК без калібрування вимірювальних приладів		– невизначення опору ізоляції ЖДЖ, захисних покривів ОК та інше; – оцінка вимірних електричних параметрів кабелю без урахування температури на кабельному майданчику; – затрати на реалізацію додаткових вставок ОК	зобов'язань виробником ОК
3. Прокладання ОК	1. Недотримання положень інструкції з завантаження/розвантаження барабанів з ОК;	Допущення: – розривів або тріщин ОВ;	Затрати на реалізацію: – додаткових вставок ОК;	Додаткові затрати на поточний ремонт і зниження надійності ВОЛЗ

Продовження табл. 3.7

1	2	3	4	5
	2. Недотримання положень та рішень проєктної документації лінії з: – прокладання ОК без групування будівельних довжин; – зменшення допустимих радіусів вигину, глибини прокладання кабелю та відстані від ОК до інших споруд; – реалізації захисту від зовнішніх електромагнітних впливів	– невдалого підбору будівельних довжин ОК для переходів через перешкоди; – можливого пошкодження кабелю за рахунок: а) зменшення радіусу вигину кабелю та глибини його прокладання; б) зменшення допустимих відстаней від ОК до інших споруд; в) технології реалізації засобів захисту ділянок лінії від зовнішніх електромагнітних впливів	– модернізацію засобів захисту лінії від зовнішніх електромагнітних впливів;	

Продовження табл. 3.7

1	2	3	4	5
4. Монтаж лінійного ОК та кабелю на вхідному/вихідному обладнанні НРП (НПП) та ОРП (ОПП) волоконно-оптичних систем передавання	Недотримання технології монтажу: 1. Оптичних муфт;	Допущення: – відсутності контролю можливих порушень технології прокладання кабелю; – обривів або підвищення загасання ОВ в муфті;	Затрати на: – ремонт оптичних муфт; – повторне вимірювання оптичних параметрів та переоформлення документації;	Додаткові затрати: – на аварійний або поточний ремонт оптичних муфт; – часу, матеріалів при аварійному ремонті ВОЛЗ;
	2. Кінцевих пристроїв (вузли введення/виведення, кріплення, комутації та інше).	– відсутності контролю можливих порушень технології улаштування кінцевих пристроїв; – обривів або підвищення загасання ОК (пігтейлів, патчкордів); – порушення технології улаштування інших складових кінцевих пристроїв.	– ремонт складових кінцевих пристроїв; – повторне вимірювання електричних параметрів та переоформлення документації.	– на аварійний або поточний ремонт складових кінцевих пристроїв; – часу, матеріалів при аварійному ремонті ВОЛЗ в НРП (НПП) або ОРП (ОПП);

Закінчення табл. 3.7

1	2	3	4	5
5. Приймально-здавальні роботи	Допущення: – будівельними організаціями недостовірної інформації у виконаній документації на лінійні споруди ВОЛЗ; – робочими комісіями без перевірки відповідності виконаної документації на комплектність, повноту змісту та якість будівельних робіт на відповідність будівельним нормам, правилам та інструкціям для передачі державній приймальній комісії; – до експлуатації лінійних споруд або їх частин, які не прийняті державною приймальною комісією.	Недостатність або недостовірність даних в приймально-здавальній документації	Затрати на: – повторні виміри параметрів ВОЛЗ; – переоформлення документації;	Додаткові затрати на аварійний або поточний ремонт лінійних споруд ВОЛЗ

Якщо довжина світловодного шнура значна, необхідно враховувати значення її параметрів при вимірюваннях. Якщо це не виконується, то вимірювання приводить до похибок в значеннях оптичних параметрів барабану кабелю. Оптична довжина ОК визначається як різниця між сплесками на рефлектограмі. Перший сплеск відповідає точці з'єднання світловодного шнура з ОВ, другий – кінцю ОВ (рис. 3.9).

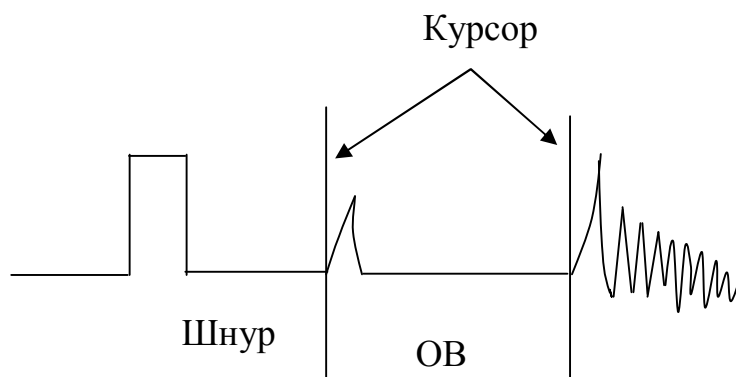


Рисунок 3.9 – Рефлектограма визначення оптичної довжини ОВ

При допущенні порушень під час входного контролю або його відсутність можлива наявність невиявлених неоднорідностей в ОВ або навіть його обриви. Це може привести до необхідності застосувати додаткову кабельну вставку на ВОЛЗ під час здачі в експлуатацію.

2. Порушення технології вимірів електричних параметрів будівельних довжин кабелю на цілісність ЖДЖ, електричних контактів між ними, опору ЖДЖ та їх ізоляції і опору захисного шлангу, а також випробування напругою між пучком ЖДЖ та рештою металевих елементів. При цьому, типові порушення при входному контролі опору ЖДЖ та їх ізоляції є порівняння їх значень з паспортних даними без урахування температури навколишнього середовища.

Результати вимірювань зводяться до кілометричних значень з урахуванням температурного коефіцієнта, порівнюються з нормами та робиться висновок щодо придатності до роботи барабану кабелю, що приймається.

Рекомендацією з недопущення похибок при оцінці, наприклад, опору

шлейфа пари ЖДЖ є його обчислення за температури 20 °С за вимірним значенням $R_{\text{шл}t}$ проводиться згідно [130, 131] за виразом:

$$R_{\text{шл}20} = \frac{R_{\text{шл}t}}{1 + \alpha_R(t - 20)}, \quad (3.19)$$

де $R_{\text{шл}20}$ – опір шлейфу ЖДЖ за температури 20 °С, Ом/км; $R_{\text{шл}t}$ – опір шлейфу ЖДЖ за температури навколишнього середовища t , °С, в Ом/км; t – температура середовища, °С; α_R – температурний коефіцієнт опору жил.

Обчислення опору ізоляції ЖДЖ кабелю за $t = 20$ °С проводиться згідно [130 – 134] за виразом:

$$R_{\text{із}20} = \frac{R_{\text{із}t}}{1 + \alpha_{R_{\text{із}}}(t - 20)}, \quad (3.20)$$

де $R_{\text{із}20}$ – опір ізоляції ЖДЖ за $t = 20$ °С, в Ом·км; $R_{\text{із}t}$ – опір ізоляції ЖДЖ за температури t , °С, в Ом·км; t – температура середовища, °С; $\alpha_{R_{\text{із}}}$ – температурний коефіцієнт опору ізоляції. Для поліетилену $\alpha_{R_{\text{із}}} = 0,001$.

Крім того, для недопущення порушень виміру опору ізоляції ЖДЖ та захисного шлангу кабелю приладом ПКП-5 є обов'язковим виконання його калібрування перед кожним виміром.

3.7.2 Порушення технології прокладання оптичних кабелів

Для будівництва ВОЛЗ використовуються різноманітні машини та механізми. Основними з них є транспортні машини, трактори, кабелеукладачі, тягові лебідки, машини й механізми для безтраншейної прокладки трубопроводів і таке інше.

Під час прокладання ОК будівництво ВОЛЗ ведеться за технологічною послідовністю і точною відповідністю виконання робіт проєктним рішенням, керівництву, будівельним нормам і правилам при виконанні конкретних видів робіт. До цих видів робіт відносяться:

- прокладання кабелю і підземних захисних споруд;
- обладнання контурів заземлення;

– установка засобів і приладів захисту від зовнішніх електромагнітних впливів і корозії та інші.

Згідно до [131] основні причини порушень технології прокладання ОК можуть виникати при недоброякісному їх виконанні:

– вхідного контролю кабелю, матеріалів, виробів та іншого устаткування;
 – розбиття траси ВОЛЗ у відповідності до робочих креслень;
 – розчищення просік та планування траси, що порушує заглиблення ножа кабелеукладача, а також якість попереднього пропороювання ґрунту, передбаченого проєктом;

– правильного підбору будівельних довжин для певних місць прокладання кабелю;

– заглиблення кабелю особливо на перетинах доріг, водо- нафто-, та газопроводів і інше;

– недоцільного прокладання кабелю, яке може привести до збільшення числа муфт, утворення «петлі», відхилень від прямолінійності траси;

– прокладання кабелю поряд з діючою ВОЛЗ за рахунок відхилень від вимог інструкції по проведенню робіт в охоронних зонах елементарної кабельної ділянки;

– контролю глибини відритої траншеї перед прокладанням кабелю;

– контролю за прокладанням кабелю в пластмасових трубах для ВОЛЗ, в кабельній каналізації і ґрунті;

– контролю прокладання захисних дротів або тросів про відповідність рішенням проєкту на: тип матеріалу, поперечний переріз, їх число, глибину укладання, розташування відносно кабелю, спосіб і якість їх з'єднання;

– контролю при прокладанні кабелю через водойми із залученням водолазів:

а) глибини підводної траншеї до і після прокладання кабелю, засипки траншеї;

б) глибини прокладання кабелю у береговій зоні, виконання берегоукріплюючих засобів та установку створених знаків;

- контролю облаштування переходів через автомобільні та залізничні мости: глибини залягання труб, довжини і їх якості, способу і якості з'єднання стиків труб, прохідності каналів, закладення кінців ОК у зайняті та резервні канали;
- дотримання нормативних габаритів на переходах через водо-, нафто- та газопроводи, підземні силові кабелі, кабельні лінії зв'язку та радіофікації та інше;
- будівництва кабельної каналізації та перевірки глибини траншеї, нахилу трубопроводів, розташування труб і їх стиків, якості стиків та гідроізоляції труб, прохідності каналів;
- будівництва кабельних колодязів та введів у будівлі;
- перевірки облаштувань фундаментів і кріплень кабельних колодязів та НРП (НПП), стану захисних покривів їх конструкцій, якості герметизації ввідних патрубків, захист введів кабелів та інше;
- перевірки відповідності рішень проєктної документації реалізованих засобів захисту від зовнішніх електромагнітних впливів;
- контролю використання неякісних або непередбачених проєктом матеріалів.

Таким чином, прокладання кабелю і підземних захисних споруд вимагає недопущення порушень технологій будівництва ВОЛЗ.

3.7.3 Порушення технології монтажу ОК та компонентів лінійного тракту волоконно-оптичних ліній зв'язку

У даному підрозділі розглянуто основні вимоги до ОК та компонентів лінійного тракту ВОЛЗ на прикладі, оптичних волокон, з'єднувальних муфт та кросового обладнання. На основі цього розглянуто причини основних порушень при будівництві ВОЛЗ, в першу чергу, при монтажу ОК і компонентів лінійного тракту.

При будівництві ВОЛЗ для зрощування окремих будівельних довжин ОК

та його підключення до апаратури виконують відповідні монтажні роботи.

Монтаж ОК необхідно розпочинати одразу після закінчення прокладання всіх будівельних довжин кабелю на ділянці регенерації (підсилення) або більшої її частини. На міських мережах зв'язку після прокладання абонентських ліній монтаж можливо починати тільки після обов'язкового проведення контрольних вимірювань.

Під час приймання оптичного кабелю до монтажу перевіряється:

- 1) відповідність довжин регенераційних (підсилювальних) ділянок їх довжинам згідно до проєктної документації;
- 2) правильність групування будівельних довжин на регенераційних (підсилювальних) ділянках;
- 3) достатність технологічного запасу кінців ОК для монтажу муфт (з'єднувальних та кінцевих);
- 4) викладання ОК у колодязях кабельної каналізації;
- 5) глибина залягання ОК у ґрунті в місцях стику будівельних довжин;
- 6) наявність замірних стовпчиків або тимчасових знаків;
- 7) опір ізоляції покриття ОК (за наявності в ньому металевих елементів);
- 8) цілісність броньових покривів ОК;
- 9) цілісність та коефіцієнт загасання ОВ в кабелі.

Зрощування окремих будівельних довжин ОК полягає в з'єднанні конструктивних елементів кабелю із захистом з'єднання захисною муфтою.

Результати цих вимірювань виявляють причини основних порушень технології, допущених при прокладанні ОК, та дають можливість їх ліквідації.

Монтаж муфт має проводитися згідно з технологічною картою на монтаж даного типу муфти з урахуванням конструктивних особливостей кабелю.

Основні вимоги до оптичних муфт:

- монтаж ОК різних конструкцій і конструктивних розмірів;
- монтаж ОК, які прокладаються в різних умовах;
- захист з'єднань ОВ та конструктивних елементів ОК від зовнішніх впливових факторів;

– зручність монтажу.

Муфти також не повинні зменшувати опір ізоляції та випробувальну напругу захисного шланга і інших металевих елементів ОК. Вони повинні бути стійкими до дії корозійного середовища (нафтопродукти, поверхнево-активні матеріали, тощо), сонячного випромінювання, виключати проникання води всередину муфту в разі пошкодження захисних покривів кабелю, не вимагати технічного обслуговування впродовж дії часу використання. В Додатку В табл. В.4 представлені основні характеристики оптичних муфт.

Таким чином, після монтажу кабельних муфт для проведення заходів з метою виявлення і усунення відхилень оптичних і електричних параметрів лінійних споруд від таких порушень проводяться виміри та випробування: оптичних та електричних параметрів кабелю [152]; опору заземлень; електричних параметрів, що визначаються при захисті лінійних споруд від електромагнітних впливів і корозії; броньових покривів кабелю; глибини залягання кабелів (по трасі на довжинах регенераційної ділянки (РД) або підсилювальної ділянки (ПД), на спусках, підйомах, в ярах та інших небезпечних місцях).

При цьому основні причини порушення технології монтажу ОК за рахунок якості муфт, складаються, в першу чергу, із зменшення: у захисному покриві кабелю опору ізоляції захисного шлангу та ЖДЖ; пробивної напруги захисного покриву кабелю та ізоляції ЖДЖ.

При цьому опір ізоляції захисного покриву кабелю повинен бути не менше 5 МОм·км, а пробивна напруга (кіл: «захисний шланг-земля», «захисний шланг-броня», «броня-земля») повинна бути не менше 2000 В.

При цьому певна увага приділяється визначенню цілісності грозозахисних тросів (дротів) і перехідного опору (трос-земля) в залежності від конкретних умов траси магістралі (зсуви, вібрація, підвищена грозова діяльність і т.п.).

Оптичне кросове обладнання включає в себе ряд пристроїв, до складу яких входять вузли введення, кріплення, комутації, кінцевого кріплення лінійних оптичних кабелів, та подальшого їх підключення до апаратури ВОСП і

забезпечення контролю характеристик ОК в процесі експлуатації. Більшість видів кросового обладнання різних фірм і заводів можливо поділяються на дві основні групи:

- 1) традиційна конструкція (коли не потрібно часто змінювати конфігурацію з'єднань оптичних волокон в процесі експлуатації);
- 2) конструкція з доступом до кожного окремого ОВ (забезпечує можливість швидкої зміни конфігурації схеми їх з'єднань при експлуатації).

На сучасних лініях в багатьох країнах найчастіше використовується кросове обладнання першої групи, обладнання другої групи використовується, в основному, на оптичних мережах великої ємності, там де є необхідність працювати з окремими волокнами.

Сучасне оптичне кросове обладнання (ODF – Optical Distribution Frame – оптичний розподільний пристрій) виконане, в основному, в формі блока, шафи, стійки, та призначене, переважно, для використання в приміщеннях. Але може бути встановлене в ґрунтових контейнерах разом з обладнанням НРП (НПП). Одним із його елементів є станційний кабель (одноволоконний оптичний шнур) pigtail або patchcord.

Кросове обладнання повинно забезпечувати ряд функціональних вимог [131]:

- кінцеве підключення ОК, яке не знижує його параметрів передавання та надійність;
- закріплення силових елементів лінійного ОК;
- викладка запасів довжин ОВ з радіусом вигину не менше 30 мм;
- закріплення (фіксацію) захисних гільз з'єднання ОВ;
- ідентифікацію волокон та їх перемонтаж в разі необхідності;
- можливість монтажу і перемонтажу кабелів при доступі до них тільки з однієї (фронтальної) сторони;
- розміщення адаптерів оптичних з'єднувачів (типу "гніздо-гніздо") на панелях або стінках кросового обладнання з можливістю доступу до них з обох сторін;

- ідентифікацію та переключення оптичних з'єднувачів;
- встановлення оптичних з'єднувачів типу FC, SC, ST та інших;
- механічний захист та ідентифікація оптичних з'єднувачів та оптичних шнурів, що до них підключаються;
- виконання внутрішніх комутацій ОВ (шлейфів) лінійного ОК, який вводить в кросове обладнання.

Кросове обладнання включає:

- елементи вводу лінійного кабелю;
- касети та конструктивні елементи для розміщення стиків ОВ і запасів довжини лінійного ОК та pigtail;
- панель комутації з адаптерами оптичних з'єднувачів для з'єднання оптичних шнурів типів pigtail і patchcord;
- конструктивні елементи для розміщення запасів довжин одноволоконних оптичних шнурів типу patchcord.

3.7.4 Порухення технології приймально-здавальних робіт в експлуатацію лінійних споруд ВОЛЗ

При закінченні будівництва лінійні споруди ВОЛЗ приймаються в експлуатацію Державними приймальними комісіями згідно до [151].

До початку їх роботи, лінійні споруди ВОЛЗ повинні бути перевірені та прийняті призначеними замовником робочими комісіями, які встановлюють ступінь їх готовності до прийому в експлуатацію. Підрядна будівельна та її субпідрядні організації повинні подати робочим комісіям виконавчу документацію на лінійні споруди ВОЛЗ, затверджену її керівником та підписану особами, відповідальними за достовірність наведених у документації даних.

Виконавча документація на лінійні споруди, наприклад, міжміських ВОЛЗ має складатися з:

- 1) титульного аркуша виконавчої документації;
- 2) паспорта траси у складі:

- титульного аркуша паспорта;
- робочої документації проєкту в повному обсязі, одержаної від замовника робіт, скоригованої у відповідальності з роботами, виконаними в дійсності;

3) паспорта на РД (ПД) у складі:

- протоколу оптичних вимірювань;
- протоколу вимірювань потенціалів на металевій оболонці кабелю (якщо вони передбачені в її конструкції) за необхідності захисту від корозії, передбаченої проєктом;

- протоколу електричних вимірів ЖДЖ (за їх наявності в конструкції ОК);

4) монтажної документації у складі:

- титульного аркуша;
- паспортів на змонтовані муфти;
- двосторонніх актів на додаткові муфти з обґрунтуванням причин їх установки;

5) робочої документації у складі:

- титульного аркуша;
- заводських паспортів на будівельні довжини ОК;
- протоколів вхідного контролю будівельних довжин ОК;
- укладальних відомостей будівельних довжин ОК;
- актів на приховані роботи (прокладання ОК, захисних тросів, улаштування переходів через автошляхи, залізниці та водні перешкоди, будівництво НРП (НПП), улаштування заземлення, будівництво кабельної каналізації).

Робочі комісії повинні:

1) перевіряти:

а) виконавчу документацію на комплектність, повноту змісту та якість виконання;

б) відповідність об'єктів проєктам;

в) відповідність виконання будівельно-монтажних робіт вимогам

відповідних будівельних норм, правил, інструкцій тощо;

г) підготовленість об'єктів до експлуатації, враховуючи заходи щодо забезпечення умов праці у відповідності з вимогами правил охорони праці і виробничої санітарії, захисту навколишнього середовища;

2) провести:

а) вимірювання загасання ОВ ОК на збудованих ВОЛЗ для підтвердження даних, які вказані в його паспортах. Вимірювання здійснюється будівельною організацією спільно з представниками замовника (або групи з експлуатації ВОЛЗ) [152];

б) вибіркову перевірку (за бажанням робочої комісії) коефіцієнта загасання та витрат на зварних з'єднаннях ОВ;

в) вимірювання електричного опору та електричної міцності ізоляції ЖДЖ та опору ізоляції захисних покриттів ОК (за наявності металевих елементів в кабелі).

При своєчасному виявленні та ліквідації порушень технології на різних етапах будівництва лінійних споруд ВОЛЗ роботи, що при цьому виконані з відхиленням від проєкту або неузгоджені замовником і проєктною документацією, а також з відхиленням від вимог НД, можуть бути прийняті робочою комісією лише за умов, що вказані відхилення не зменшують надійності і строку служби лінійних споруд ВОЛЗ.

У випадках, коли проєктом будівництва ВОЛЗ передбачається перемикання існуючих ліній зв'язку на ВОЛЗ, що вводиться в експлуатацію, це дозволяється виконувати лише після затвердження акта прийому робіт по побудованій ВОЛЗ. При цьому в акті Державної приймальної комісії має бути встановлено строк перемикання.

У разі не прийняття робіт Державна приймальна комісія має скласти обґрунтований висновок із зазначенням причин відмови від прийому та подати його органам, які призначили цю комісію [151].

Експлуатація споруд (або їх частин), які не прийняті Державною приймальною комісією, не дозволяється.

3.7.5 Порушення під час вимірювань параметрів ОК та ВОЛЗ при будівництві та експлуатації

Склад вимірів на ВОЛЗ. З метою контролю якості об'єкту в процесі будівництва та експлуатації ВОЛЗ проводиться такий комплекс вимірювань для визначення стану ОК, лінійних споруд, якості функціонування станційної апаратури та апаратури лінійного тракту [11, 25, 131]:

- вхідний контроль ОК;
- вимірювання після прокладання ОК;
- вимірювання під час монтажу ОК;
- приймально-здавальні вимірювання елементарної кабельної ділянки та установки елементів фіксації траси, засобів захисту від зовнішніх електромагнітних впливів тощо.

Цей комплекс вимірів передбачає в основному контроль тих же параметрів, що і для традиційних цифрових кабельних систем: середньої відносної потужності сигналу, який вводиться в лінію, загасання сигналу в лінії, частота електромагнітного випромінювання, яке вводиться в лінію, хроматична дисперсія імпульсу в тракті, чутливість системи передачі при заданому коефіцієнті помилок, коефіцієнт помилок, око-діаграма, а також параметри, що визначають стан броні і ізолюючих покриттів кабелю, стан грозотросів та інше. Причому ряд параметрів, таких як джиттер, око-діаграма, коефіцієнт помилок, характеристики зовнішніх покриттів кабелю і грозотросів вимірюються тими ж засобами, що і на усіх кабельних лініях передачі. Для контролю характеристик лінійного тракту, оптичних сигналів в силу специфіки роботи в оптичному діапазоні застосовуються установлені в нормативній документації (НД) засоби вимірів. Крім того, ВОСП характеризуються рядом специфічних властивих тільки їм параметрів. Це зокрема, ширина спектральної лінії оптичного випромінювання, поляризаційна модова дисперсія, поляризаційні модові втрати, а також, вимірювані методами брілюєнівської рефлектометрії механічна напруга у волокні та надійність лінії.

В процесі будівництва ВОЛЗ виміри виконуються при вхідному контролі кабелю і устаткування, при виконанні монтажних робіт і налаштуванні обладнання, при проведенні приймально-здавальних випробувань. Параметри і характеристики ОК та апаратури ВОСП, що приведені у паспортних даних, повинні відповідати діючим нормам ГОСТів і ТУ. Перевірка на вказану відповідність виконується при вхідному контролі перед початком будівництва. На етапах монтажу, налаштування і приймально-здавальних випробувань оптичних систем прямого детектування з модуляцією по інтенсивності, виконують виміри коефіцієнта загасання волокон, загасання волокон на змонтованих ЕКД, втрат і загасання відбиття в з'єднаннях, рівнів потужності оптичного випромінювання, чутливості приймальних оптоелектронних модулів, коефіцієнта помилок, джиттера, око-діаграми, параметрів зовнішніх покривів кабелю.

Вимірювання проводяться оптичним рефлектометром, наприклад, типу РТВ 200 фірми ЕХБО, приладами ПКП-5, а для виміру опору заземлення – Fluke 1625-1 (США).

Похибки вимірювань при вхідному контролі ОК. При вхідному контролі ОК проводиться вимірювання оптичних параметрів будівельних довжин на кабельному майданчику, перед початком будівельно-монтажних робіт.

Знімається рефлектограма, за допомогою якої проводиться перевірка ОВ на наявність неоднорідностей і мікротріщин та вимірюється загасання і довжина ОВ. Виміряні значення порівнюються з паспортними даними.

Якщо при такому вимірі виявлено обрив ОВ або завищення коефіцієнта загасання відносно його паспортних даних більш, ніж на 0,05 дБ/км, що вказує на неможливість подальшого використання будівельної довжини кабелю.

Якщо при такому вимірюванні значення коефіцієнта загасання в ОВ є похибки, що приведуть до невірної оцінки стану ОК, це приведе до збільшення матеріальних витрат подальшого будівництва ВОЛЗ.

Вимірювання після прокладання ОК. Перед монтажем ОК вимірюються такі параметри [123]: коефіцієнт загасання та довжина ОВ, електричний опір

ізоляції захисного шлангу, ЖДЖ, цілісність броньових покривів кабелю (при їх наявності).

У разі виявлення завищення кілометричного загасання ОВ на прокладеній будівельній довжині ОК більше, ніж на 0,05 дБ/км, порівняно з вимірним значенням при входному контролі або в разі виникнення різних неоднорідностей, мікротріщин в ОВ складається ситуація, яка приводить до порушень положень проєктної документації та технології будівництва на ЕКД.

Таким чином, якщо не проведення вимірів після прокладання ОК або поява похибки в вищепроведених вимірах параметрів не будуть своєчасно виявлені, то це також приведе до унеможливлення прийняття заходів до відновлення можливості використання будівельної довжини кабелю [131].

Якщо виміряні значення електричного опору ізоляції пластмасового захисного покриву ОК або ЖДЖ нижче від норми, то необхідно визначити місце заниження електричного опору ізоляції, наприклад методом градієнта потенціалів, за допомогою приладів типу ІМПІ (індикатор місця пошкодження ізоляції) та трасопошуковими приладами чи мостовим методом – за допомогою високовольтного моста Р 41270, разом із джерелом напруги постійного струму типу П4110. Пошкодження усувається методом заварювання за допомогою липкого поліізобутиленового компаунду.

При виявленні порушення цілісності броньового покриву після встановлення його місця на трасі ВОЛЗ проводиться установка додаткової кабельної муфти, де реалізується його з'єднання.

Вимірювання під час монтажу ОК. Контрольні вимірювання оптичних втрат у місці з'єднання ОВ під час монтажу ОК виконуються рефлектометром з двох боків [3], і дійсне значення загасання в місці з'єднання ОВ визначається як середньоарифметичне значень. Це пояснюється тим, що в деяких випадках на рефлектограмі можливі плюсові «стрибки» в місці з'єднання ОВ внаслідок допустимих відхилень їх оптичних та геометричних параметрів.

Втрати в місці з'єднання ОВ мають відповідати допустимим нормам. У разі, коли загасання в місці з'єднання ОВ перевищує встановлену норму,

проводиться через'єднання ОВ.

Приймально-здавальні вимірювання при будівництві та технічній експлуатації. Цей вид вимірювань проводиться в об'ємі усіх оптичних, електричних вимірювань параметрів ОК та лінійних споруд ВОЛЗ. При цьому їх похибки, як правило, співпадають з похибками, допущеними при попередніх видах вимірювань (на кабельному майданчику, при монтажу ОК та інше). Приймально-здавальні вимірювання при будівництві ВОЛЗ можуть проводитися в об'ємі, установленому робочою або Державною приймальною комісією. Об'єм вимірювань при аварійно-відновлювальних роботах на ВОЛЗ встановлюється нормативно-технічними документами об'єкта технічної експлуатації лінії.

3.8 Висновки до третього розділу

В даному розділі з розвитку теорії забезпечення надійності ВОЛЗ на етапах виробництва оптичних кабелів та її будівництва проведено ряд досліджень, в рамках яких було:

А. Виконано:

– оцінку термомеханічного впливу на ОВ в трубці ОМ на етапах виготовлення ОК, будівництва ВОЛЗ і її експлуатації, в рамках якої визначено:

а) величини абсолютного видовження ОВ та трубки ОМ в залежності від зміни температури навколишнього середовища ($\Delta L_{ОВ}$, $\Delta L_{ТОМ}$);

б) величини абсолютної зміни довжини ОВ ($\epsilon_{ОВ}$) та трубки ОМ ($\epsilon_{ТОМ}$) в залежності від зміни температури (ΔT);

в) величини допустимої відносної зміни довжини ОВ від довжини трубки ОМ ($\epsilon_{ОВ, ТОМ}$) в залежності від зміни температури (ΔT);

г) величини сили розтягування ОВ ($P_{ОВ}$) в залежності від зміни температури (ΔT);

д) характер стану (видовження або скорочення) волокна в трубці ОМ при зміні температури середовища у відповідності до його початкової (контрольної) довжини при t_0 .

– розробку методу оцінки термомеханічного впливу умов експлуатації ВОЛЗ на геометричні розміри елементів та конструктивні параметри одноповивної конструкції ОК. На основі якого отримана оцінка 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;

– аналіз основних порушень технології виробництва ОК та будівництва ВОЛЗ і розробку рекомендацій з їх недопущення.

Б. Встановлено, що:

– при термомеханічному впливі на кварцові ОВ з усадкою трьох матеріалів трубки ОМ на виході з ванни охолодження обладнання з виготовлення оптичного модуля:

а) при зміні температури від значення температури плавлення матеріалів трубки ОМ до температури цеху приводить до розташування ОВ або їх пучка по гелікоїді. Ця гелікоїда складає (від 0,014 до 0,032) % відносно базової довжини волокна при $t = 35 \text{ }^{\circ}\text{C} / 308 \text{ K}$ та матеріалі трубки ОМ із полібутилентерефталату;

б) при зменшенні температури цеху до $15 \text{ }^{\circ}\text{C} / 288 \text{ K}$ гелікоїда зростає на 8,5 %, що відповідає її довжині в 10 см на базовій довжині $L_{\text{ОВ}} = 35 \text{ м}$ та матеріалу трубки ОМ із полібутилентерефталату;

в) такий вплив на етапі виробництва та експлуатації ОК буде практично мало впливати на зміну довжини волокна;

– при термомеханічному впливі на кварцові ОВ, які розташовані в трубці ОМ із різних матеріалів (полібутилентерефталата, поліаміда, полікарбоната):

а) при температурі вище (від 20 до 60) $^{\circ}\text{C} /$ (від 293 до 333) K сила розтягування ОВ викликає його абсолютну зміну довжини (від 0 до 0,0022) % і допустимої відносної зміни довжини ОВ відносно довжини трубки ОМ (від 0 до мінус 0,6) %, а при температурах нижче (від 20 до мінус 40) $^{\circ}\text{C} /$ (від 293 до 233) K – стискання (від 0 до мінус 0,0033) % для абсолютної зміни довжини і (від 0 до 0,9) % для допустимої відносної зміни довжини ОВ відносно довжини трубки ОМ, відповідно;

б) зміни $\varepsilon_{\text{ОВ}}$ і $\varepsilon_{\text{ОВ,ТОМ}}$ вказують, що таке видовження не приводить до створення в структурі матеріалу волокна мікротріщин, а стискання – до

макровигинів волокна в трубці ОМ;

в) допустима відносна зміна довжини ОВ відносно довжини трубки ОМ практично не залежить від типу матеріалу трубки, тому виготовлення трубки ОМ на підприємстві виробнику кабелю залежить від його обладнання, прийнятої технології виробництва та вартості матеріалу;

г) встановлена величина термомеханічного впливу на ОВ в трубці ОМ не впливає на максимально допустиме видовження кабелю при його конструюванні.

– на основі досліджень допустимої відносної зміни довжини ОВ відносно довжини трубки ОМ при виробництві кабелю та відносно довжини ОК в умовах експлуатації:

а) через менше значення ТКЛР матеріалу оптичні волокна із-за гелікоїдального розташування в трубці ОМ стають довшими за неї. Це дає технологічний запас ОВ та збільшення $F_{\text{мк}}$ конструкції кабелю;

б) дія підвищення температури на готову конструкцію ОК також не приводить до появи надмірних розтягувальних зусиль ОВ, що спричиняють ініціювання мікротріщин або навіть розривів волокна. Це не потребує необхідності врахування та створення певної надлишкової довжини волокна при його інтеграції в трубку ОМ при виробництві.

– на основі методу оцінки температурного впливу умов експлуатації ОК встановлено, що для зміни:

а) розмірів конструктивних елементів осердя ОК при дії температури вказують на те, що значення $\epsilon_{\text{дк}}(t)$ збільшується (зменшується) при збільшенні (зменшенні) температури відносно 20 °С / 293 К, а також на те, що застосування полікарбонату в якості матеріалу трубки ОМ, в якому розташовані кварцові ОВ, забезпечить менші зміни $\epsilon_{\text{дк}}(t)$ в межах (від мінус 4,3...+3,5) % при зміні температури відносно 20 °С;

б) допустимого розтягувального зусилля ОК, що забезпечується ЦСЕ, при дії температури вказують на те, що значення $F_{\text{дкЦСЕ}}(t)$ також збільшується (зменшується) при збільшенні (зменшенні) температури відносно 20 °С / 293 К, а

також на те, що застосування полікарбонату – забезпечить менші зміни $F_{\text{дкЦСЕ}}(t)$ в межах (від мінус 1,8...+1,2) % при зміні температури відносно 20 °С;

- порушення технології виробництва ОК на підприємстві-виробнику можливе за рахунок недотримання в певній мірі конструктивно-виробничих процесів, а також відсутності або неналежної організації контролю якості, а також надійності компонентів ВОЛЗ;

- аналіз основних порушень технологій будівництва показав, що за рахунок неналежного або неякісного виконання різних видів будівельних робіт (прокладання ОК, монтаж, влаштування складових лінійних споруд та вимірювань) відповідно до нормативно-технічної документації, відсутності або неналежного контролю конструктивних, механічних і оптичних характеристик ОК може привести до недоліків та негараздів при експлуатації лінії.

В. Рекомендовано:

- заводам-виробникам використовувати:

- а) результати оцінки термомеханічних впливів на ОВ і трубки ОМ із різних матеріалів в 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 табл. 3.7 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, приведені в підрозділі 3.7;

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

РОЗДІЛ 4

РОЗВИТОК ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ПІДХОДІВ ДО ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ ВОЛЗ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАВАННЯ

4.1 Оцінки надійності волоконно-оптичних ліній зв'язку

4.1.1 Загальні положення

Для оцінки надійності ВОЛЗ транспортної електронної комунікаційної мережі зв'язку використовуються такі основні характеристики [4, 9, 141, 154 – 156]: інтенсивність відмов, параметр потоку відмов, середній час між відмовами, середній час відновлення зв'язку, коефіцієнт готовності.

В окремих випадках можуть визначатися вірогідність безвідмовної роботи за проміжок часу, який викликає інтерес, та коефіцієнт простою.

Однією з особливостей проєктування сучасних ВОЛЗ є те, що серед критеріїв, за якими проводиться оптимізація схеми організації зв'язку (вибору варіанта проєкту), на перше місце виходить величина комплексного показника надійності, що вимагається, чи допустима величина коефіцієнта простою, тобто якість функціонування ВОЛЗ, що вимагається [157, 158].

Це обумовлено, по-перше, більш жорсткими діючими нормами на параметри цифрових каналів трактів, які організовуються на сучасних засобах електрозв'язку, а, по-друге, потенційно великою пропускну здатністю транспортної мережі, що організується на основі ВОСП СЦІ.

Тому для визначення цих коефіцієнтів при проєктуванні ВОСП враховується те, що вона складається із послідовно з'єднаних компонентів (наприклад, ділянок ВОЛЗ та окремих видів обладнання). В залежності від точної конфігурації комбінація захищеного мультимплексного і термінального обладнання ВОСП може мати коефіцієнт готовності 0,99999 [4].

У зв'язку з цим надійність ВОСП найбільшою мірою визначається надійністю ВОЛЗ [4]. Тому що ймовірність відмови сучасної апаратури низька, вона ремонтпридатна та гарантована виробником і має незначний час відновлення.

Порівняльна оцінка надійності різних ВОЛЗ або різних магістралей за наведеними вище показниками повинна проводитися на певну довжину траси лінії в 100 км. Оцінка надійності ВОЛЗ або окремих напрямків, в залежності від потреби, може проводитися на будь-яку довжину траси.

4.1.2 Експлуатаційні показники якості роботи та кількісні характеристики надійності ВОЛЗ

Експлуатаційні показники якості роботи ВОЛЗ. Для кількісної оцінки надійності кабельних ВОЛЗ на практиці користуються основними і додатковими показниками якості роботи лінії.

Основними показниками якості роботи ліній, що знаходяться в експлуатації є [4, 14, 16, 154 – 161]: щільність відмов з перервою зв'язку, потік відмов на 100 км траси на рік і середній час відновлення зв'язку.

Під щільністю відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку розуміють кількість відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку на лінії певної довжини L , що приведена до 100 км траси на рік [4, 133], а щільність відмов при цьому та при її приведенні до 100 км траси на рік будуть визначатися за виразами:

$$m_L = \frac{N}{K \cdot L} \cdot 100, \quad m = \frac{N}{K} \cdot 100 \quad (4.1)$$

де m_L – щільність відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку на лінії довжиною L , 1/рік; m – щільність відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку, що приведена до 100 км траси на рік; N – кількість відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку на усій 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, що приведена до 100 км траси, на яку визначається щільність відмов, км.

Середній час відновлення зв'язку визначається [4, 159]:

$$t_{\text{счвз}}^{\Pi} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{\text{вi}} \quad (4.2)$$

де $t_{\text{счвз}}^{\Pi}$ – середній час відновлення зв'язку, год; $t_{\text{вi}}$ – час відновлення зв'язку за i -ої відмови (пошкодження), год, i – номер відмови; N – кількість відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку.

Додатковими показниками якості роботи ліній зв'язку, що знаходяться в експлуатації, є: щільність відмов без перерви зв'язку, середній час повного усунення пошкоджень, тобто відновлення ВОЛЗ до її нормального стану.

Щільність відмов без перерви зв'язку слугує показником наявності несправностей на ВОЛЗ. Наявність цих відмов свідчить про необхідність проведення профілактичних заходів. Аналіз причин і характеру відмов підвищує ефективність планових профілактичних робіт.

Щільність відмов (пошкоджень без перерви) зв'язку по аналогії з виразом (4.1) можливо представити у виді [4, 154, 160]:

$$M_L = \frac{H}{K \cdot L} \cdot 100, \quad M = \frac{H}{K} \cdot 100, \quad (4.3)$$

де M_L – щільність відмов (пошкоджень без перерви) зв'язку протягом року на лінії довжиною L , 1/рік; M – щільність відмов (пошкоджень без перерви) зв'язку протягом року, що приведена на 100 км траси; H – кількість пошкоджень без перерви зв'язку на всій лінії зв'язку; K – кількість років (заданого проміжку часу), за які виникло H відмов, рік; L – довжина ВОЛЗ, км; 100 – довжина лінії зв'язку, на яку визначається щільність відмов, км.

Середній час повного усунення пошкоджень (з перервою та без перерви) зв'язку визначається [4, 158, 160]:

$$t_{\text{счп}} = \frac{\sum_{i=1}^Q t_{\text{пi}}}{Q}, \quad (4.4)$$

де $t_{\text{счп}}$ – середній час повного усунення пошкодження, год; i – номер пошкодження; $t_{\text{пi}}$ – час повного усунення i -го пошкодження, год; Q – загальна

кількість пошкоджень (з перервою та без перерви) зв'язку.

Облік та аналіз повного часу усунення пошкоджень дозволяє виявити причини, що спричиняють труднощі з ліквідації пошкоджень та намітити заходи до їх усунення.

Кількісні характеристики надійності ВОЛЗ. Як параметри для кількісної оцінки надійності ВОЛЗ використовуються: інтенсивність відмов, параметр потоку відмов, середній час між відмовами, середній час відновлення зв'язку, коефіцієнт готовності.

В окремих випадках можуть визначатися ймовірність безвідмовної роботи за проміжок часу, який викликає інтерес, та коефіцієнт простою.

Інтенсивність відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку на ВОЛЗ визначається відношенням кількості відмов до одиниці часу [4]:

$$\lambda = \frac{N}{\Delta t}, \quad (4.5)$$

де λ – інтенсивність відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку ВОЛЗ, 1/год;
 N – кількість відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку за вибраний відрізок часу;
 Δt – вибрана одиниця часу, год.

Якщо λ визначається із щільності відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку на 1 км ВОЛЗ за 1 годину, то її визначають за формулою [4]:

$$\lambda = \frac{m}{8760 \cdot 100}, \quad (4.6)$$

де λ – інтенсивність відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку на 1 км ВОЛЗ за 1 год, 1/год; m – щільність відмов (з перервою) зв'язку, 1/рік; 8760 – кількість годин протягом року; 100 – довжина лінії зв'язку в км, на якій визначається щільність відмов.

Параметр потоку відмов визначається на всю довжину лінії L для однотипної ВОЛЗ за виразом [4]:

$$\Lambda = \lambda \cdot L, \quad (4.7)$$

де Λ – параметр потоку відмов однотипної ВОЛЗ на всю довжину лінії, км/год;
 λ – інтенсивність відмов для даного типу лінії, 1/год; L – довжина лінії зв'язку, км;

Параметр потоку відмов ВОЛЗ, яка складається із ділянок з різними типами кабелів або із ділянок з різними місцевими умовами, визначається за виразом [4, 160, 161]:

$$\Lambda = \sum_{i=1}^N \lambda_i \cdot L_i, \quad (4.8)$$

де Λ – параметр потоку відмов з різними типами кабелів або із ділянок з різними місцевими умовами, км/год; i – номер ділянки; N – кількість ділянок; λ_i – інтенсивність відмов i -ої однорідної ділянки лінії, 1/год, L_i – довжина i -ої однорідної ділянки лінії в км з відповідною інтенсивністю відмов.

Середній час між відмовами (напрацювання на відмову) являє собою середнє число годин справної роботи ВОЛЗ між двома сусідніми відмовами, взятими за певний календарний термін експлуатації [4, 161]:

$$T_{0p} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}, \quad (4.9)$$

де T_{0p} – середній час між відмовами – число годин справної роботи ВОЛЗ (напрацювання на відмову), год; n – кількість відмов за визначений календарний термін часу; t_i – час між відмовами (справної роботи між сусідніми відмовами), год.

Середній час відновлення нормальної роботи визначається [161]:

$$t_{счвн} = \frac{\sum_{i=1}^N t_{внi}}{N}, \quad (4.10)$$

де $t_{счвн}$ – середній час відновлення нормальної роботи ВОЛЗ, год; $t_{внi}$ – час відновлення нормальної роботи за i -ої відмови (пошкоджень з перервою та без перерви) зв'язку, год; i – номер відмови; N – кількість відмов (пошкоджень з перервою та без перерви) зв'язку.

За необхідності може визначитися середньоквартальний або середньомісячний час відновлення зв'язку. У цьому випадку приймається N , що дорівнює кількості відмов, відповідно, протягом кварталу або місяця.

Коефіцієнт готовності визначається як відношення сумарного часу справної роботи до загального сумарного часу справної роботи та часу відновлення за один і той самий період експлуатації [4]:

$$K_{\Gamma} = \frac{T_p}{T_p + T_{\text{вуп}}} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{\sum_{i=1}^n t_i + \sum_{i=1}^n t_{\text{вуп}i}}, \quad (4.11)$$

де K_{Γ} – коефіцієнт готовності ВОЛЗ; T_p – загальний час справної роботи лінії, год; $T_{\text{вуп}}$ – загальний час, затрачений на виявлення і усунення усіх пошкоджень, год; i – номер відмови; n – кількість відмов лінії; t_i – час справної роботи до відмови (пошкодження), год; $t_{\text{вуп}i}$ – час виявлення та усунення i -ої відмови (пошкодження), год.

Досвід роботи об'єктів технічної експлуатації, тобто систем довготривалого використання, показує, що зміна їх інтенсивності відмов у часі відбувається в більшості випадків за типовою кривою [4], що зображена на рис. 1.4.

При приблизно рівних значеннях інтенсивності відмов постійній величині в період нормальної експлуатації ВОЛЗ ймовірність безвідмовної роботи з числом відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку за прийнятий проміжок часу відповідає експоненціальному закону, згідно якого ця ймовірність буде визначатися [4, 162]:

$$P(t) = e^{-\Lambda t}, \quad (4.12)$$

де $P(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи за прийнятий проміжок часу; Λ – параметр потоку відмов, 1/год; t – проміжок часу, для якого визначається ймовірність безвідмовної роботи, год.

В свою чергу, коефіцієнт простою ВОЛЗ визначається із виразу [4, 159]:

$$K_{\Pi} = 1 - K_{\Gamma}, \quad (4.13)$$

де K_{Π} – коефіцієнт простою ВОЛЗ; K_{Γ} – коефіцієнт готовності ВОЛЗ.

4.1.3 Взаємозв'язок окремих кількісних характеристик надійності та оцінка їхньої ймовірності

Розглянуті у п. 4.1.2 кількісні характеристики надійності ВОЛЗ взаємопов'язані між собою, що дозволяє при визначенні значення однієї визначити значення іншої. Для розрахунку надійності ВОЛЗ за даними експлуатаційної статистики можливо використати відомості про щільність відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку та середній час тривалості відмов (середній час відновлення) [4].

Середньостатистичне напрацювання на відмову (середній час між відмовами) протягом року на ВОЛЗ довжиною 100 км визначається за виразом [4, 159]:

$$T_{0p} = \frac{8760 - m \cdot t_{свчз}^п}{m}, \quad (4.14)$$

де T_{0p} – середній час між відмовами (пошкодженнями з перервою) зв'язку, год; 8760 – кількість годин в році, год; m – щільність відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку, 1/рік; $t_{свчз}^п$ – середній час відновлення зв'язку, год.

Середньостатистичне напрацювання на відмову (середній час між відмовами) протягом року на кабельній лінії довжиною L км визначається за виразом [4]:

$$T_{0pL} = \frac{8760 \cdot 100 - m \cdot L \cdot t_{счвз}^п}{m \cdot L}, \quad (4.15)$$

де T_{0pL} – середньостатистичне напрацювання на відмову на всій довжині траси L (км), год; 8760 – кількість годин в році, год; 100 – довжина ВОЛЗ, до якої віднесено T_{0pL} , км; m – щільність відмов протягом року, 1/рік; L – довжина ВОЛЗ, км; $t_{счвз}^п$ – середній час відновлення зв'язку, год.

Якщо як одиницю часу прийнято рік та віднесено цю характеристику до лінії довжиною 100 км, щільність відмов буде дорівнювати інтенсивності відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку за рік, тобто [4]:

$$\lambda = m, \quad (4.16)$$

де λ – інтенсивність відмов в рік та довжині лінії 100 км, 1/рік; m – щільність відмов за 1 рік на лінії довжиною 100 км, 1/рік.

Параметр потоку відмов (пошкоджень з перервою та без перерви) зв'язку на усій довжині лінії за певний проміжок часу може бути визначеним із [4] за виразом:

$$\Lambda = \frac{N'}{\Delta t}, \quad (4.17)$$

де Λ – параметр потоку відмов, 1/год; N' – число відмов (пошкоджень з перервою та без перерви) зв'язку на усій довжині лінії за певний проміжок часу (календарний термін); Δt – величина проміжку часу, год.

Маючи на увазі, що час справної роботи ВОЛЗ значно більший порівняно з загальним часом простою, який використовується на відновлення зв'язку, з достатнім наближенням Λ можна розрахувати із виразу [4]:

$$\Lambda \approx \frac{1}{T_{0pL}}, \quad (4.18)$$

де Λ – параметр потоку відмов (пошкоджень з перервою та без перерви) зв'язку, 1/год; T_{0pL} – час між відмовами (пошкодженнями з перервою) зв'язку – напрацювання на відмову на довжині L ВОЛЗ, год.

За експоненціального закону ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$ і напрацювання на відмову, виходячи із формул (4.9) і (4.12), можуть бути пов'язані відношенням [4, 162]:

$$P(t) = e^{-\frac{t}{T_{0pL}}}, \quad (4.19)$$

де $P(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи за прийнятий проміжок часу; t – проміжок часу, для якого визначається ймовірність безвідмовної роботи ВОЛЗ, год; T_{0pL} – середній час напрацювання на відмову на довжині L (км) ВОЛЗ, год.

Коефіцієнт готовності, віднесений до одного року експлуатації на довжині траси в 100 км, через експлуатаційні показники якості роботи ВОЛЗ може бути вираженим [4, 159]:

$$K_r = \frac{8760 - m \cdot t_{\text{счвз}}}{8760}, \quad (4.20)$$

де K_r – коефіцієнт готовності на довжині траси в 100 км, віднесений до року експлуатації; 8760 – кількість годин в році, год; m – щільність відмов на довжині лінії 100 км, 1/рік; $t_{\text{счвз}}$ – середній час відновлення зв'язку, год.

Коефіцієнт готовності може бути визначеним також через напрацювання на відмову та середній час відновлення на усю довжину траси ВОЛЗ [4]:

$$K_r = \frac{T_{0pL}}{T_{0pL} + t_{\text{счвз}}}, \quad (4.21)$$

де K_r – коефіцієнт готовності на усю довжину траси L , віднесеного до одного року експлуатації; T_{0pL} – середньостатистичне напрацювання на відмову при довжині лінії L (км), год; $t_{\text{счвз}}$ – середній час відновлення зв'язку, год.

Кількісні характеристики надійності визначаються як середні статистичні значення за той або інший проміжок часу. Обмеженість даних призводить до неможливості указати точне, вірогідне значення будь-якого з параметрів. Тому дійсні значення параметра можуть відрізнятися як у більший, так і в менший бік. Межі можливих відхилень середніх значень називаються межами надійності, а їх вірогідність ймовірністю надійності.

Ймовірність кількісних характеристик надійності збільшується зі збільшенням кількості статистичних даних, на основі яких вони розраховуються. Верхня (X_B) і нижня (X_H) надійні межі розрахованих середніх статистичних характеристик визначається за виразами [4]:

$$X_B = \alpha_1 \cdot X_{\text{сер}}; \quad X_H = \alpha_2 \cdot X_{\text{сер}}, \quad (4.22)$$

де α_1, α_2 – коефіцієнти, відповідно, верхньої та нижньої надійних меж (табл. 4.1); $X_{\text{сер}}$ – середнє значення кількісної характеристики надійності.

Наведені в табл. 4.1 коефіцієнти надійних меж можуть бути використані при визначенні верхніх і нижніх меж часу безвідмовної роботи (T_{0pB} та T_{0pH}) і часу відновлення зв'язку ($t_{\text{чвзB}}$ та $t_{\text{чвзH}}$). Знаючи межі T_{0pB} , T_{0pH} , $t_{\text{чвзB}}$, $t_{\text{чвзH}}$ за виразами (4.19) і (4.21), можна визначити верхні та нижні межі $P(t)$ і K_r , для

цього слід у ці формули підставити замість T_{0p} і $t_{чвз}$ відповідно $T_{0рв}$, $T_{0рн}$, $t_{чвзв}$, $t_{чвзн}$.

Таблиця 4.1 – Значення коефіцієнтів верхньої та нижньої надійної межі в залежності від надійної ймовірності γ

Кількість відмов	Значення коефіцієнтів α_1 / α_2 за надійної ймовірності γ					
	0,999	0,990	0,975	0,950	0,900	0,800
1	1000,00/0,11	100,00/0,15	40,00/0,18	19,50/0,21	9,50/0,26	4,48/0,33
2	44,00/0,18	13,50/0,24	8,26/0,28	5,68/0,32	3,77/0,38	2,42/0,47
3	15,70/0,23	6,88/0,30	4,84/0,34	3,66/0,39	2,73/0,45	1,95/0,55
4	9,33/0,27	4,85/0,35	3,67/0,39	2,93/0,44	2,29/0,50	1,74/0,60
5	6,76/0,30	3,91/0,38	3,08/0,43	2,54/0,48	2,05/0,54	1,62/0,63
6	5,43/0,33	3,36/0,41	2,73/0,46	2,29/0,51	1,90/0,57	1,54/0,66
8	4,06/0,38	2,75/0,46	2,31/0,51	2,01/0,55	1,72/0,62	1,43/0,70
10	3,38/0,41	2,42/0,50	2,08/0,54	1,83/0,59	1,61/0,65	1,37/0,73
15	2,59/0,48	2,01/0,56	1,78/0,60	1,62/0,65	1,46/0,70	1,28/0,78
20	2,23/0,56	1,81/0,60	1,64/0,65	1,51/0,69	1,37/0,74	1,24/0,81
25	2,02/0,56	1,68/0,64	1,55/0,68	1,44/0,72	1,33/0,76	1,21/0,83
30	1,89/0,59	1,60/0,66	1,48/0,70	1,39/0,74	1,29/0,78	1,18/0,84
40	1,72/0,63	1,50/0,70	1,40/0,73	1,32/0,77	1,24/0,81	1,16/0,87
50	1,61/0,66	1,43/0,73	1,35/0,76	1,28/0,79	1,21/0,83	1,14/0,88
60	1,56/0,69	1,38/0,75	1,31/0,78	1,25/0,81	1,19/0,84	1,12/0,89
80	1,47/0,72	1,32/0,78	1,26/0,80	1,21/0,83	1,16/0,86	1,10/0,90
100	1,40/0,74	1,28/0,80	1,23/0,82	1,19/0,85	1,14/0,88	1,09/0,91

4.2 Дослідження реальних експлуатаційних показників якості роботи ВОЛЗ Донецької та Луганської областей

Як відмічалось у розділах 1 та 3, задача забезпечення надійності кабельної техніки включає в себе надто широке коло питань, пов'язаних з проектуванням,

будівництвом та технічною експлуатацією, в першу чергу, волоконно-оптичних ліній зв'язку, а також розробкою та виробництвом їх елементів.

Необхідність розрахунку надійності ВОЛЗ виникає за різних причин: для визначення надійності роботи кабельної магістралі з метою виявлення її відповідності пред'явленим до неї вимогам, для порівняльної оцінки якості роботи окремих магістралей, якості роботи різних типів оптичних кабелів в певних умовах, для виявлення очікуваної надійності проєктованих магістралей та інше [160].

Розрахунок параметрів надійності діючих або проєктованих ВОЛЗ стає можливим на основі збору та обробки експлуатаційних статистичних даних про час, тривалість, кількість, характер та причини їх пошкоджень. Як відмічалось раніше, ці дані дозволяють встановити середньостатистичні експлуатаційні показники якості роботи ВОЛЗ: щільність та інтенсивність відмов, середній час відновлення зв'язку та середній час повного усунення пошкодження [154].

Наразі в низці робіт, наприклад [154, 160], приведені та обґрунтовані підходи до визначення статистичних показників якості роботи ВОЛЗ. В роботі [154] приведені статистичні дані характеристик надійності (m , λ , $t_{\text{счп}}$, $t_{\text{счвз}}$) за п'ятирічний термін експлуатації підземних ВОЛЗ на базі броньованих та неброньованих оптичних кабелів ТЕКМ зв'язку Донецької та Луганської областей з 2001 року по 2005 рік. В [154] вказано, що ці дані можливо використовувати у першому наближенні для розрахунку експлуатаційних показників якості роботи підземних ВОЛЗ цих областей разом із даними інших областей країни в цілому.

Проте, достовірність цих статистичних експлуатаційних показників якості роботи, що характеризують надійність ВОЛЗ, не є остаточною, оскільки потребує збору та аналізу статистичних даних про кількість, причини та характер пошкоджень ТЕКМ зв'язку та мережі абонентських ліній зв'язку за адміністративними областями України, та за більш тривалий термін їх експлуатації. Крім того, в дійсній час в технічній та науковій літературі відсутні вихідні матеріали для розрахунку експлуатаційних показників якості роботи

ВОЛЗ країни.

Тому, метою досліджень даного підрозділу є отримання більш достовірних вихідних даних для розрахунку експлуатаційних показників якості роботи підземних ВОЛЗ на основі обробки статистичних даних експлуатації ТЕКМ зв'язку, наприкладі, Донецької та Луганської областей за більший період часу, а саме за (2001...2013) роки.

Для чисельного вираження надійності ВОЛЗ доводиться використовувати різноманітні характеристики, сукупність яких дозволяє найбільш повно оцінити її надійність як системи або оптичного кабелю як виробу. Надійність кабельної лінії, що буде в експлуатації, залежить не тільки від якості кабелю, але також від якості усіх інших пристроїв та елементів, що входять до її складу [154, 160].

Різноманітні умови місцевості проходження траси ВОЛЗ приводять до необхідності застосування на окремих її ділянках різних конструкцій оптичного кабелю та різних методів його прокладання. Як правило, за межами населених пунктів прокладається броньований кабель безпосередньо у ґрунті або неброньований (полегшеної конструкції) кабель в поліетиленовій трубі (субканалі). В населених пунктах є можливим застосування як броньованих кабелів для прокладання в ґрунті або в кабельній каналізації, так і неброньованих кабелів для прокладання в кабельній каналізації.

Для однієї й тієї ж місцевості умови роботи підземних кабелів суттєво залежать від пори року, що вносить помітну нерівномірність розподілу пошкоджень протягом року, з чим слід рахуватися при оцінці їх надійності [135, 154, 160]. Тому, при оцінці надійності ОК в залежності від місця прокладання їх групують за типами: броньовані, що прокладаються безпосередньо в ґрунті або в кабельній каналізації, та неброньовані, що прокладаються в субканалі кабельної каналізації [135].

Згідно до [154, 160, 161] інтенсивність відмов при пошкодженнях або аваріях ВОЛЗ на 1 кілометр траси за 1 годину визначається із виразу (4.6).

В цілому, щільність відмов згідно до [4, 154, 160, 161] можливо у виразі (4.6) представити у вигляді:

$$m = \frac{N}{L} \cdot 100, \quad (4.23)$$

де m – щільність відмов або аварій ВОЛЗ, що приходяться на 100 км траси на 1 рік; N – кількість відмов або аварій на ВОЛЗ протягом року; L – довжина лінії, км.

З урахуванням (4.6) та (4.23) інтенсивність відмов на 1 км траси ВОЛЗ за 1 годину тоді представиться у виді [4, 160]:

$$\lambda = \frac{N}{8760 \cdot L}, \quad (4.24)$$

де λ – інтенсивність відмов або аварій на 1 км траси ВОЛЗ за 1 год, 1/год; N – кількість відмов або аварій на ВОЛЗ протягом року; 8760 – кількість годин в році, год; L – довжина лінії, км.

Середній час відновлення зв'язку ВОЛЗ визначається за виразом (4.2). Середній час повного усунення пошкодження $t_{\text{счп}}$ визначається аналогічно з виразу (4.4).

Як відмічалось раніше, спостереження показують, що кількість пошкоджень на кабельних лініях значно залежить від пори року та кліматичних умов місцевості, по якій вона проходить. Як правило, найбільше число пошкоджень випадає на весняно-літній період. Це пояснюється великою кількістю земляних робіт, що виконуються в зонах прокладання лінії, струмами блискавки, розмивами ґрунту, тощо [160, 161]. В осінньо-зимовий період число таких робіт природньо зменшується [160].

Враховуючи [154, 160], проведемо аналіз статистичних даних кількості відмов транспортної електронної комунікаційної мережі Донецької та Луганської областей по місяцям за період з 2001 року по 2013 рік. Результати розподілу відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку трас електронної комунікаційної мережі Донецької та Луганської областей за місяцями за ці роки приведені в табл. 4.2 та табл. 4.3.

Результати розподілу відмов в цих областях по місяцям показали, що за (2001...2005) роки число відмов у весняно-літній період разом складає – 11, а у

осінньо-зимовий – 7, а за (2001...2013) роки – 47 та 21, відповідно. Тобто, за період з 2006 по 2013 роки кількість пошкоджень порівняно з (2001...2005) роками збільшилось у весняно-літній період в 3,18 рази, а у осінньо-зимовий період – в 2,00 рази [160].

Таблиця 4.2 – Розподіл відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку ТЕКМ в Донецькій області по місяцям за (2001...2013) роки

Рік	Кількість відмов із перервою зв'язку по місяцям												Сума відмов
	Січень	Лютий	Березень	Квітень	Травень	Червень	Липень	Серпень	Вересень	Жовтень	Листопад	Грудень	
2001	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	по
2002	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	рокам
2003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
2004	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	1
2005	-	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	2
2006	-	-	-	1	-	-	1	-	-	-	-	-	2
2007	-	-	-	-	-	-	2	3	-	-	-	-	5
2008	-	-	-	-	-	-	1	1	-	1	-	-	3
2009	-	-	-	-	-	2	-	1	1	-	-	-	4
2010	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1	-	3
2011	-	-	-	-	1	-	1	1	-	-	-	-	3
2012	-	-	-	-	-	1	-	1	-	1	-	-	3
2013	-	-	-	2	-	-	1	-	1	-	-	-	4
Сума відмов по місяцям	0	0	0	4	1	3	8	8	4	3	1	0	32

Загальна уява про питому вагу відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку на ВОЛЗ з різних причин у відсотках від загального числа відмов та аварій на транспортній електронній комунікаційній мережі зв'язку країни ще не визначена повною мірою. Таке положення в значній мірі пояснюється, з однієї сторони, порівняно пізнім розвитком в Україні ВОЛЗ транспортної електронної комунікаційної мережі та швидким темпом її зростання, а з іншої сторони, трудомісткістю робіт по збору, обробці і аналізу експлуатаційних статистичних даних [154].

Таблиця 4.3 – Розподіл відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку ТЕКМ в Луганській області по місяцям за (2001...2013) роки

Рік	Кількість відмов із перервою зв'язку по місяцям												Сума відмов в по роках
	Січень	Лютий	Березень	Квітень	Травень	Червень	Липень	Серпень	Вересень	Жовтень	Листопад	Грудень	
2001	-	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	3
2002	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	2
2003	-	-	-	1	-	2	-	-	-	1	-	-	4
2004	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-	1	3
2005	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1
2006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
2007	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
2008	-	-	-	-	-	1	1	-	-	1	-	-	3
2009	-	-	2	-	1	-	-	-	1	1	-	-	5
2010	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	2	-	3
2011	-	-	1	-	2	-	-	-	1	-	-	-	4
2012	-	-	-	1	-	1	-	-	-	-	1	-	3
2013	-	-	-	-	2	-	-	-	1	-	1	-	4
Сума відмов по місяцям	1	1	5	4	5	5	2	0	3	3	6	1	36

Попереднє спостереження за питомою вагою відмов підземних ВОЛЗ ТЕКМ зв'язку цих областей з 2001 року по 2005 рік та з 2001 року по 2013 рік показало, що найбільше число відмов спостерігається за рахунок пошкоджень та аварій внаслідок дії зловмисників (рис. 4.1) [160].

На основі статистичних даних, отриманих за роки експлуатації з 2001 по 2013 роки, на рис. 4.2 та в табл. 4.4 представлені одержані за виразами (4.1), (4.2), (4.4) значення щільності відмов, середнього часу відновлення зв'язку та середнього часу повного усунення пошкоджень ТЕКМ зв'язку, реалізованої на кабелях ОКЛБг та ОКЛ в Донецькій та Луганській областях. Відсоткове співвідношення кількості відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку ВОЛЗ ТЕКМ зв'язку цих областей за типами ОК та умовами їх прокладання в період (2001...2005) роки та (2001...2013) роки показано на рис. 4.2.

Як видно в обох областях відсоткове співвідношення відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку броньованих кабелів в ґрунті за період з 2001 по 2013 рік знизилося (з 40 до 27) % у Донецькій області, (з 86 до 68) % у Луганській області порівняно з такими ж відмовами з 2001 по 2005 роки, а відсоткове співвідношення відмов кабелів, прокладених в субканалах або в кабельній каналізації, збільшилося.

Розрахунок щільності відмов на 100 км траси показує, що за період з 2001 по 2013 рік порівняно з 2001 по 2005 роки значення m_L зменшилося на 19,3 %, що може свідчити про, наприклад, покращення охоронно-роз'яснювальної роботи, а середній час повного відновлення зв'язку також зменшився на 39,3 %, що може свідчити, наприклад, про підвищення швидкості оперативної роботи аварійно-відновлювальних бригад.

В табл. 4.5 представлені середні, максимальні та мінімальні значення інтенсивності відмов на 1 км траси та середнього часу відновлення зв'язку для броньованих та неброньованих підземних ОК в залежності від умов їх прокладання, що одержані на базі обробки статистичних даних про пошкодження ТЕКМ зв'язку Донецької та Луганської областей за період експлуатації з 2001 по 2013 роки.

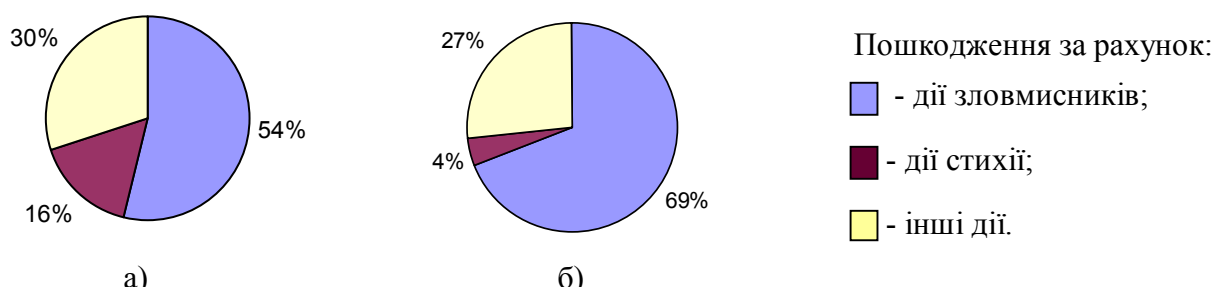


Рисунок 4.1 – Розподіл питомої ваги відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку ВОЛЗ транспортної телекомунікаційної первинної мережі зв'язку Донецької та Луганської областей, що сталися: а) з 2001 року по 2005 рік;
б) з 2001 року по 2013 рік

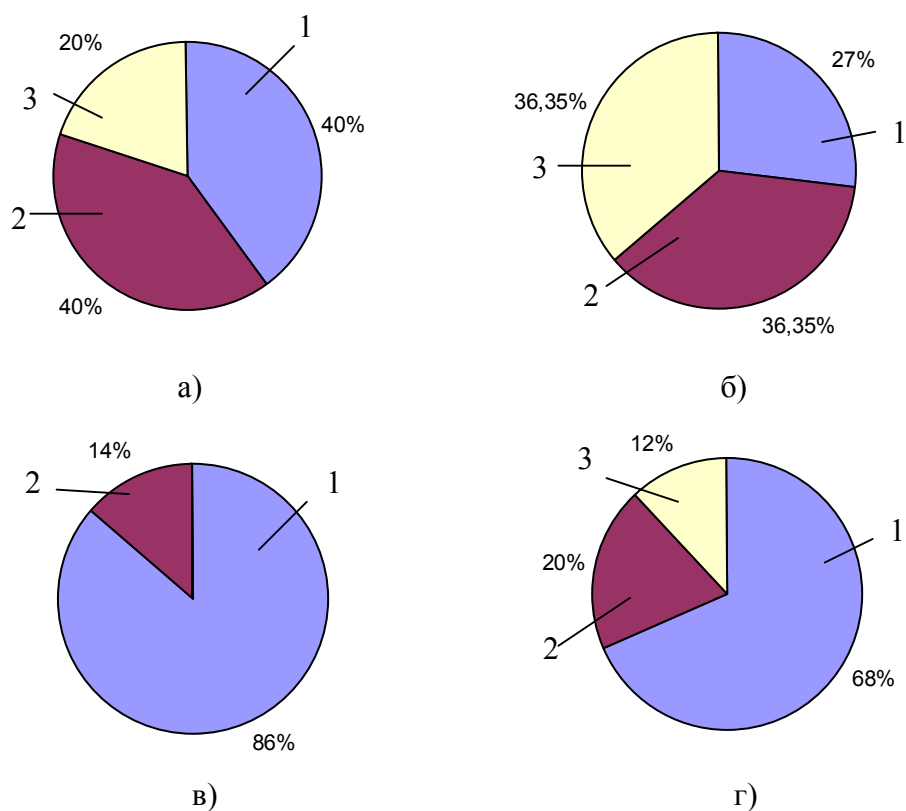


Рисунок 4.2 – Відсоткове співвідношення кількості відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку ВОЛЗ транспортної мережі Донецької (а, б) та Луганської (в, г) областей за періоди: а), в) з 2001 по 2005 роки; б), г) з 2001 по 2013 роки:
1 – для броньованого кабелю в ґрунті; 2 – броньованого кабелю в кабельній каналізації; 3 – неброньованого кабелю в кабельній каналізації або субканалі

Таблиця 4.4 – Експлуатаційні показники якості роботи ВОЛЗ (m_L , $t_{счвз}^п$, $t_{счп}^п$) транспортної електронної комунікаційної мережі зв'язку в Донецькій та Луганській областях за (2001...2013) роки

Роки	Статистичні характеристики надійності		
	Щільність відмов m_L , 1/рік	Середній час відновлення зв'язку, $t_{счвз}^п$, год	Середній час повного усунення пошкоджень, $t_{счп}^п$, год
2001	1,67	3,13	17,71
2002	1,40	2,82	17,40
2003	2,35	2,87	24,98
2004	1,44	3,17	16,50
2005	17,76	4,48	4,66
Середні значення за (2001...2005) роки	4,92	3,29	16,25
2006	2,96	4,49	4,49
2007	3,06	3,13	6,55
2008	2,81	3,52	4,75
2009	3,57	3,09	8,36
2010	2,95	4,09	5,32
2011	2,88	3,42	5,02
2012	3,10	3,85	6,31
2013	2,85	3,73	6,13
Середні значення за (2006 ...2013) роки	3,02	3,67	5,87
Середні значення за (2001 ...2013) роки	3,97	3,52	9,86

Дані цієї таблиці створюють можливість для розрахунку експлуатаційних показників якості роботи кабельних ліній не тільки згідно з середньорічними, але й згідно з максимальними та мінімальними показниками λ .

За виразом (4.6) виконані розрахунки середньорічної, максимальної та мінімальної інтенсивностей відмов на основі обробки статистичних даних пошкоджень ТЕКМ зв'язку Донецької та Луганської областей за 13-річний термін з 2001 року по 2013 рік. В цій таблиці, крім того, наведені значення цих показників за періоди експлуатації ВОЛЗ з 2001 по 2005 роки та з 2006 по 2013 роки окремо для броньованих кабелів (без поділу за типами броні), що прокладені у ґрунті й кабельній каналізації та неброньованих кабелів, прокладених у кабельній каналізації або у субканалі.

Таким чином, результати розрахунків основних експлуатаційних показників якості роботи ВОЛЗ (m_L , $t_{счвз}^n$, $t_{счп}^n$) в цих областях за 2001...2005 роки, 2006...2013 роки та 2001...2013 роки представлені на рис. 4.3. Дані, представлені на цьому рисунку, показали, що: щільність відмов зменшилась на 19,3 %, середній час відновлення зв'язку збільшився на 7 %, а середній час повного усунення пошкоджень зменшився на 39,3 %.

Згідно даних табл. 4.5, інтенсивність відмов броньованих кабелів, що прокладаються безпосередньо в ґрунті, за період з 2006 по 2013 роки збільшилася на 79 %, що вказує на збільшення відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку ОК на 1 км траси за 1 годину. Це пояснюється збільшенням відсотка зловмисних пошкоджень ОК (рис. 4.1) та за рахунок виконання неузгоджених земляних робіт в охоронній зоні кабелю.

Таким чином, отримані в даному підрозділі експлуатаційні показники якості роботи ВОЛЗ транспортної електронної комунікаційної мережі зв'язку Донецької та Луганської областей дозволяють виконувати орієнтовні розрахунки надійності кабельних ліній, визначати якість роботи, порівнювати якість роботи різних типів оптичних кабелів поміж собою та інше.

Таблиця 4.5 – Середні, максимальні та мінімальні значення інтенсивності відмов на 1 км траси та середнього часу відновлення зв'язку для броньованих та неброньованих підземних ОК ТЕКМ зв'язку Донецької та Луганської областей

Роки	Інтенсивність відмов на 1 км траси ($\lambda \cdot 10^{-7}$, 1/год) та середній час відновлення зв'язку, год, для:											
	броньованого кабелю у ґрунті				броньованого кабелю у кабельній каналізації				неброньованого кабелю в кабельній каналізації або субканалі			
	$\lambda_{\text{сер}}$	$\lambda_{\text{макс}}$	$\lambda_{\text{мін}}$	$t_{\text{счвз}}$	$\lambda_{\text{сер}}$	$\lambda_{\text{макс}}$	$\lambda_{\text{мін}}$	$t_{\text{счвз}}$	$\lambda_{\text{сер}}$	$\lambda_{\text{макс}}$	$\lambda_{\text{мін}}$	$t_{\text{счвз}}$
2001... 2005	15,48	20,58	10,38	2,97	109,57	202,70	16,44	3,77	43,43	66,30	20,56	3,13
2006... 2013	27,73	39,15	16,32	4,53	41,37	45,54	37,21	2,13	34,24	52,16	16,32	4,59
2001... 2013	21,55	39,15	10,38	3,75	75,47	202,70	16,44	2,95	38,84	66,30	16,32	3,86

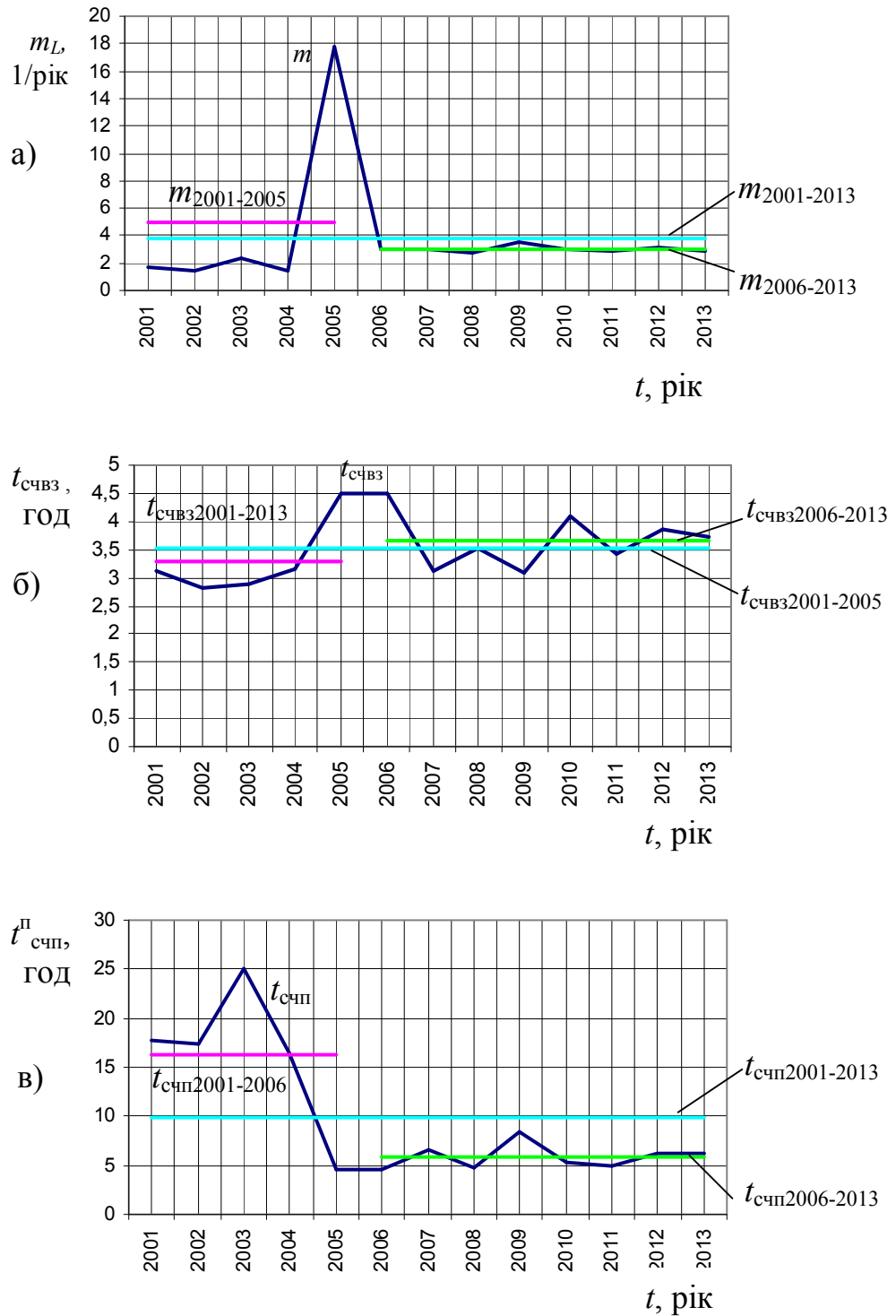


Рисунок 4.3 – Значення експлуатаційних показників якості роботи ТЕКМ зв'язку Донецької та Луганської областей: а) щільності відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку; б) середнього часу відновлення зв'язку; в) середнього часу повного усунення відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку

У разі виявлення необхідності підвищення надійності ВОЛЗ це дає можливість намітити відповідні заходи до її підвищення за рахунок розробки практичних рекомендацій щодо мінімізації ризику пошкоджень та забезпечення норм показників надійності.

Виконані дослідження експлуатаційних показників якості роботи ВОЛЗ ТЕКМ зв'язку в Донецькій та Луганській областях дозволили встановити:

1. Статистичні дані про кількість, причину і характер пошкоджень та розраховані експлуатаційні показники якості роботи ВОЛЗ в цих областях за період з 2001 по 2013 роки, а також виконано порівняння цих значень зі значеннями аналогічних показників з 2001 по 2005 роки.

2. Результати аналізу основних експлуатаційних показників якості роботи ВОЛЗ (щільність та інтенсивність відмов, середній час відновлення зв'язку та середній час повного відновлення зв'язку) показали, що за період з 2001 по 2013 рік порівняно з періодом з 2001 по 2005 рік їх значення дещо змінилися: щільність відмов m_L зменшилася на 19,3 %, що може свідчити про покращення охоронно-роз'яснювальної роботи, середній час відновлення зв'язку збільшився на 7 %, а середній час повного відновлення зв'язку зменшився на 39,3 %, що може свідчити про підвищення ефективності та оперативності роботи аварійно-відновлювальних бригад. Така зміна значень експлуатаційних показників пояснюється врахуванням більшої кількості статистичних даних про пошкодження ВОЛЗ, а отже й підвищення точності даних розрахунків.

Проте, розрахунки інтенсивності відмов ТЕКМ зв'язку Донецької та Луганської областей показали, що для броньованих кабелів, які прокладаються безпосередньо в ґрунті, цей параметр за період з 2001 по 2013 роки порівняно з періодом з 2001 по 2005 роки збільшився на 39 %, що пояснюється збільшенням відсотка зловмисних пошкоджень ОК (54 % з 2001 по 2005 роки проти 69 % з 2001 по 2013 роки) та за рахунок виконання неузгоджених земляних робіт в охоронній зоні кабелю. Для ОК з іншими способами прокладання спостерігається недостатня кількість статистичних даних про пошкодження, що може свідчити про неточність одержаних результатів інтенсивності відмов.

3. Приведені розраховані значення середніх експлуатаційних показників якості роботи λ , $t_{\text{счвз}}$, $t_{\text{счп}}^{\text{п}}$ кабелів ТЕКМ зв'язку створюють можливість для підвищення точності визначення показників надійності ВОЛЗ цих областей, як відмічалось раніше, та розробки практичних рекомендацій, щодо мінімізації ризику пошкоджень і забезпечення норм показників надійності.

4.3 Дослідження реальних експлуатаційних показників якості роботи ВОЛЗ в різних кліматичних районах

Забезпечення надійності та безперервності роботи волоконно-оптичних систем передачі є безсумнівно актуальним і вимагає визначення параметрів (критеріїв) надійності її складових елементів. До одного з таких важливих складових елементів відносяться ВОЛЗ, які вносять до 95 % усіх пошкоджень у ВОСП [4, 161]. У свою чергу, ВОЛЗ перебувають у різноманітних кліматичних умовах місцевості, що приводить до необхідності застосування на окремих її ділянках різних конструкцій оптичних кабелів, кабельних муфт, нерознімних з'єднань оптичних волокон та інших елементів лінійних споруд. Тобто, надійність волоконно-оптичних ліній зв'язку залежить не тільки від якості їх елементів, методів проектування, будівництва, монтажу, але й від кліматичних умов місцевості експлуатації [4, 154, 160, 161].

Саме тому, для кількісної оцінки надійності ВОЛЗ доводиться використовувати різноманітні характеристики, сукупність яких дозволяє найбільш повно визначити її надійність як системи або, наприклад, оптичного кабелю як виробу. Як правило, на практиці визначають не всі параметри надійності, а лише ті, що визначаються для умов експлуатації.

Розрахунок параметрів надійності діючих або проєктованих волоконно-оптичних ліній зв'язку стає можливим на основі збирання та оброблення експлуатаційних статистичних даних про час, тривалість, кількість, характер та причини їх пошкоджень. Ці дані дозволяють встановити, у першу чергу, середньостатистичні кількісні показники надійності ВОЛЗ [4, 154, 161, 163–166]:

1. У випадку перерви зв'язку: щільність відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку, середній час відновлення зв'язку та середній час повного усунення пошкодження.

2. У випадку пошкоджень без перерви зв'язку (несправність): щільність відмов (M_L) та середній час повного усунення пошкодження ($t_{счп}^6$).

Використовуючи вищенаведені показники надійності ВОЛЗ можливо визначити інші кількісні показники надійності, зокрема: інтенсивність відмов λ , час напрацювання на відмову T_{0p} та коефіцієнт готовності K_r .

Наразі в низці робіт, наприклад [154, 160, 161], наведені та обґрунтовані підходи до визначення статистичних показників якості роботи ВОЛЗ. В роботах [4, 154] наведені експлуатаційні показники якості роботи m_L , $t_{счвз}$, $t_{счп}^n$, λ за п'ятирічний термін експлуатації з 2001 року по 2005 рік підземних ВОЛЗ на базі броньованих та неброньованих оптичних кабелів, що прокладені в Донецькій та Луганській областях. В підрозділі 4.2 та [4, 154] вказано, що ці дані можливо використовувати у першому наближенні для розрахунку кількісних показників надійності підземних ВОЛЗ цих областей. Проте також вказано, що достовірність цих кількісних характеристик, що характеризують надійність ВОЛЗ, не є остаточною, оскільки потребує збирання та аналізу статистичних даних про кількість, причини та характер пошкоджень ВОЛЗ за більш тривалий час.

Останнє має велике значення, тому що на сьогодні у технічній та науковій літературі відсутні вихідні матеріали з інтенсивності відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку, часу напрацювання на відмову для розрахунку кількісних показників надійності ВОЛЗ у різних кліматичних умовах експлуатації.

В даному підрозділі проведені дослідження реальних експлуатаційних показників якості роботи ВОЛЗ в різних кліматичних районах країни (гірському, рівнинному та причорноморському). Це має велике значення, тому що на сьогодні у технічній та науковій літературі відсутні в повній мірі вихідні матеріали із щільності та інтенсивності відмов, середнього часу відновлення зв'язку та середнього часу повного усунення відмов на ВОЛЗ.

Розрахунок реальних експлуатаційних показників якості роботи ліній з перервою та без перерви зв'язку проводиться аналогічно розрахунку цих показників у підрозділі 4.2.

Таким чином, визначення m_L , λ , $t_{счвз}$ та $t_{счп}^{п(б)}$ проводяться на основі оброблення статистичних даних пошкоджень транспортної електронної комунікаційної мережі зв'язку країни в Львівській, Донецькій та Одеській областях, які відносяться до гірських, рівнинних та причорноморських районів.

Результати розрахунку цих показників за 13-річний термін створюють можливість отримання більш достовірних значень експлуатаційних показників якості роботи підземних ВОЛЗ для приведених кліматичних районів.

Значення цих показників у вибраних областях приведені в табл. 4.6.

На рис. 4.4 представлено графіки інтенсивності відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку, середнього часу відновлення зв'язку ВОЛЗ цих областей за періоди з 2001 по 2005 роки та з 2001 по 2013 роки.

Як видно з табл. 4.6 і з рис. 4.4, у випадку наявності відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку ВОЛЗ значення інтенсивності відмов та середнього часу відновлення зв'язку, отриманих за період з 2001 по 2005 роки відрізняються від значень аналогічних параметрів за період з 2001 по 2013 роки. Так, інтенсивність відмов зменшилася у гірських районах – на 56,6 %, у рівнинних районах – на 2,5 % та у причорноморських районах – на 33,3 %. Значення середнього часу відновлення (пошкоджень з перервою) зв'язку зменшилися у гірських районах – на 14,4 %, у рівнинних районах – на 5,4 % та у причорноморських районах – на 11,4 %. Значення середнього часу повного усунення відмов (пошкодження з перервою) зв'язку зменшилися у гірських районах – на 40,2 %, у рівнинних районах – на 20,3 % та у причорноморських районах – на 25,6 %.

На основі реальних експлуатаційних показників якості роботи оптичних ліній ТЕКМ зв'язку в цих областях за 13-річний термін (табл. 4.6) та даних пошкоджень за місяцями, отримано середнє значення λ , $\lambda_{\text{макс}}$, $\lambda_{\text{мін}}$ та $t_{счвз}$ для броньованих та неброньованих оптичних кабелів та їх середнє значення для

Таблиця 4.6 – Реальні експлуатаційні показники якості роботи ВОЛЗ ТЕКМ зв'язку в Львівській, Донецькій та Одеській областях за (2001...2005) роки та (2001...2013) роки

Тип захисних покривів ОК та місце його експлуатації	Реальні показники якості роботи ВОЛЗ за областями за періоди з (2001...2005) роки / (2001...2013) роки при пошкодженні:					
	з перервою зв'язку				без перерви зв'язку	
	щільність відмов, m_L , 1/рік	інтенсивність відмов, $\lambda \cdot 10^{-7}$, 1/год	середній час відновлення зв'язку, $t_{счвз}$, год	середній час повного усунення пошкодження $t_{счп}^п$, год	щільність відмов, M_L , 1/рік	середній час повного усунення пошкодження, $t_{счп}^б$, год
1	2	3	4	5	6	7
Львівська (гірські райони)						
Броньований кабель у ґрунті	1,70 0,74	19,4 8,42	3,96 4,48	6,56 5,47	— 0,42	— 0,83
Броньований кабель у кабельній каналізації	<u>1,93</u> 0,62	<u>22,03</u> 7,08	<u>4,23</u> 4,10	<u>8,22</u> 4,5	—	—
Неброньований кабель в кабельній каналізації або субканалі	<u>1,47</u> 0,86	<u>16,78</u> 9,82	<u>3,69</u> 1,59	<u>5,50</u> 2,15	—	—
Середнє значення показника по області	<u>1,70</u> 0,74	<u>19,4</u> 8,42	<u>3,96</u> 3,39	<u>6,76</u> 4,04	— 0,42	— 0,83

підземних ОК без поділу кабелів за конструктивними особливостями, приведені в табл. 4.7.

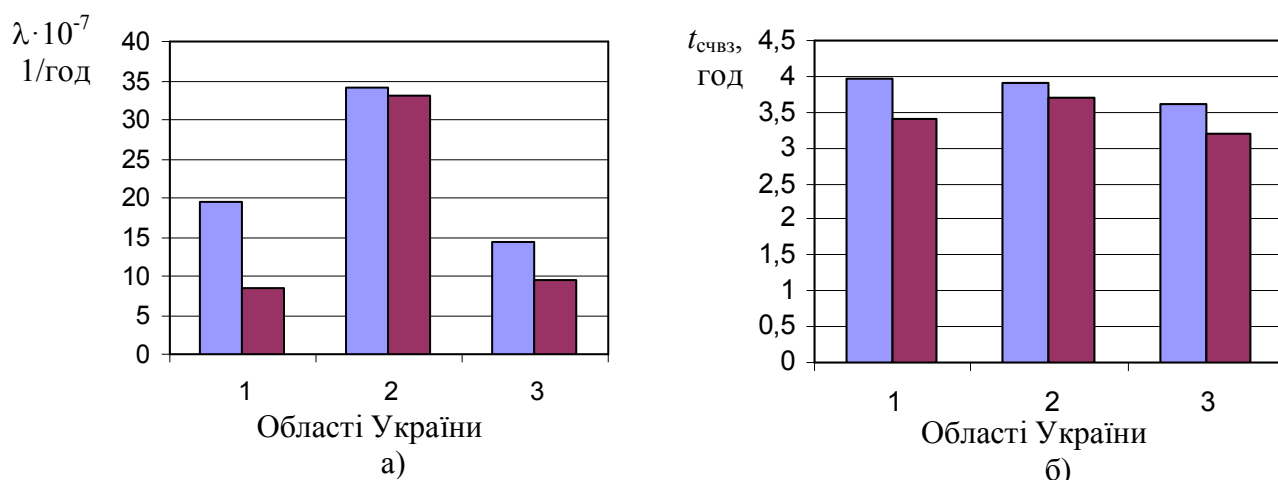


Рисунок 4.4 – Графіки інтенсивності відмов λ (а), середнього часу відновлення зв'язку $t_{счвз}$ (б) ВОЛЗ: 1 – Львівської, 2 – Донецької, 3 – Одеської областей за періоди (2001...2005) роки (■) та (2001...2013) роки (■)

Різниця отриманих значень цих показників дає підстави стверджувати про необхідність визначення їх значень для оптичних ліній ТЕКМ зв'язку різних областей і показала, що:

- значення кількісних показників надійності ВОЛЗ цих областей за період з 2001 по 2013 рік значно відрізняються від відповідних значень показників за період з 2001 по 2005 рік, що вказує на значний вплив обсягу статистичних даних за більший термін про пошкодження та аварії мереж зв'язку на достовірність результатів їх показників надійності;

- значення кількісних показників надійності ВОЛЗ на базі різних типів ОК залежать від умов експлуатації, не можуть бути узагальнені та потребують індивідуальних розрахунків для конкретної місцевості;

- серед ВОЛЗ досліджуваних мереж трьох областей лише в Донецькій області спостерігаються пошкодження оптичних кабелів, які прокладені в субканалах кабельної каналізації. Останнє обумовлене зловмисними пошкодженнями;

Таблиця 4.7 – 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 ($t_{\text{счвз}}$, год) на базі							
	броньованого ОК				неброньованого ОК			
	λ	$\lambda_{\text{макс}}$	$\lambda_{\text{мін}}$	$t_{\text{счвз}}$	λ	$\lambda_{\text{макс}}$	$\lambda_{\text{мін}}$	$t_{\text{счвз}}$
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
Кліматичні райони	Середні значення інтенсивності відмов на 1 км траси ($\lambda \cdot 10^{-7}$, 1/год) та середнього часу відновлення зв'язку ($t_{\text{счвз}}$, год) (без поділу на броньовані та неброньовані ОК)							
	λ		$\lambda_{\text{макс}}$		$\lambda_{\text{мін}}$		$t_{\text{счвз}}$	
Гірські Карпати	33,38		76,47		10,86		4,81	
Рівнинна частина	18,34		37,27		8,07		4,70	
Узбережжя Чорного та Азовського морів	20,55		43,08		7,04		5,16	
Середнє по країні	24,09		52,27		8,66		4,89	

– відсутність статистичних даних про пошкодження оптичних ліній ТЕКМ зв'язку без перерви зв'язку в період з 2001 по 2005 рік не дає можливість оцінити кількісні показники надійності M_L та $t_{счп}^6$;

– наявність коливань значень середнього часу повного усунення пошкодження потребує необхідності його нормування.

Таким чином, отримані в даному підрозділі показники надійності ВОЛЗ транспортної електронної комунікаційної мережі зв'язку в Львівській, Донецькій та Одеській областях є більш точними, ніж отримані раніше.

Отже, визначені в даному підрозділі кількісні показники надійності ВОЛЗ ТЕКМ зв'язку країни в Львівській, Донецькій та Одеській областях дозволяють зробити такі висновки:

1. Розрахунки основних кількісних показників надійності ВОЛЗ: щільність відмов (пошкоджень з перервою та без перерви) зв'язку, інтенсивність відмов, середній час відновлення зв'язку та середній час повного усунення пошкодження дозволили встановити, що:

– кількісні показники надійності ВОЛЗ обраних областей за представлений період часу значно відрізняються від відповідних показників за період з 2001 по 2005 рік;

– аналіз розподілу щільності відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку, середнього часу відновлення зв'язку та середнього часу повного усунення пошкодження ВОЛЗ розглянутих областей за тринадцять років експлуатації не дав можливості встановити якусь їх остаточну залежність для подальшого прогнозування надійності ліній;

– наявність пошкоджень вказує на те, що значення інтенсивності відмов та середнього часу відновлення зв'язку, отриманих за період з 2001 по 2013 рік, менші, ніж значення аналогічних параметрів, отримані за період з 2001 по 2005 рік. Так, інтенсивність відмов зменшилася у гірських районах – на 56,6 %, у рівнинних районах – на 2,5 % та у причорноморських районах – на 33,3 %. Значення середнього часу відновлення з перервою зв'язку зменшилося у гірських районах – на 14,4 %, у рівнинних районах – на 5,4 % та у причорноморських

районах – на 11,4 %. Значення середнього часу повного усунення пошкодження з перервою зв'язку зменшилася у гірських районах – на 40,2 %, у рівнинних районах – на 20,3 % та у причорноморських районах – на 25,6 %.

– наявність коливань значень середнього часу повного усунення пошкодження потребує необхідності його нормування.

2. Наведені розраховані середньостатистичні значення кількісних показників надійності (m_L , $t_{\text{счвз}}$, $t_{\text{счп}}^{\text{п}}$ та λ) транспортної електронної комунікаційної мережі зв'язку в Львівській, Донецькій та Одеській областях слід вважати більш достовірними, ніж отримані раніше. Вони дають можливість визначати кількісні характеристики надійності ТЕКМ зв'язку з більш високою ймовірністю.

4.4 Обґрунтування необхідності та послідовності визначення показників надійності при проєктуванні та експлуатації ВОЛЗ або ВОСП

Необхідність визначення параметрів надійності ВОЛЗ або ВОСП. При проєктуванні кабельних магістралей виникає потреба в оцінці їх надійності. Така оцінка може бути проведена на підставі використання статистичних даних, отриманих з досвіду експлуатації аналогічних діючих магістралей. Для оцінки надійності можуть бути використані лише експлуатаційні статистичні дані аналогічних магістралей, що працюють приблизно в однакових умовах [8].

Однією з основних конструктивних особливостей кабелю в порівнянні з іншими виробами є дуже велике співвідношення між його довжиною і діаметром. Ця особливість вимагає високої однорідності окремих елементів кабелю, максимального обмеження допусків матеріалу і розмірів. Крім того, при великій довжині кабелю зменшується число муфт ВОЛЗ на магістралі.

Для оцінки надійності заданої магістралі зручніше користуватися характеристиками надійності, віднесеними до довжини підсилювальної чи регенераційної ділянки, оскільки це дозволяє найбільш просто визначити надійність всієї магістралі з урахуванням станційних пристроїв.

Надійність ВОЛЗ залежить перш за все від:

- самих компонентів лінії (будівельні довжини кабелю, муфти і кінцеві пристрої можна розглядати як окремі групи, що складаються з рівнонадійних елементів). При цьому, кабельна лінія, як правило, завжди складається з однотипного кабелю, однотипних муфт і кінцевих кабельних пристроїв; відмова будь-якого з елементів приводить до відмови всієї системи (кабельної лінії). При цьому відмови окремих складових ВОЛЗ є подіями незалежними;

- проектування (правильний вибір траси і глибина прокладання кабелю, застосування захисних пристроїв, проектування пристроїв, що дозволяють здійснювати безперервний автоматичний контроль за станом кабелю в процесі експлуатації, устаткування контрольно-вимірювальних пунктів і т. і.). При цьому, тривалу експлуатацію кабелю забезпечують підібрана конструкція кабелю, яка розрахована з відповідністю до виконання вимог ТУ, його транспортування, прокладання і монтаж, а також правильно підібраний технологічний режим експлуатації лінії;

- будівництва (висока культура виробничого процесу нерозривно пов'язана із застосуванням прогресивної технології, раціональної системи планування, організації виконання робіт, комплексної механізації, правильної організації поточного і вихідного контролю, раціонального температурного режиму і освітленості виробничих приміщень, забезпечення високих санітарно-гігієнічних умов і безпеки роботи);

- експлуатації кабельної лінії (належним чином підготовлений персонал і організація відповідних профілактичних заходів, які включають такі операції: проведення технічного нагляду за станом траси кабелю і кабельних споруд та виконання на них профілактичних робіт, що застерігають від пошкоджень; проведення планових і контрольних електричних та оптичних вимірювань; спостереження за пристроями захисту від грози, корозії, за дією різних сигналізацій, кінцевих пристроїв і т. і. На ділянках, де кабель прокладений в каналізації, необхідний контроль за станом каналізаційних споруд).

На даний час точних вихідних даних для розрахунку надійності ВОЛЗ

немає. Тому, в якості прикладу, за вихідні дані візьмемо експлуатаційні статистичні дані кількості відмов у підрозділі 4.3, одержані за 13 років експлуатації броньованих та неброньованих ОК у підрозділі експлуатації лінії в період з 2001 по 2013 рік.

Необхідність у розрахунку надійності ВОЛЗ може виникати:

- а) для визначення надійності роботи магістралей різних районів країни;
- б) при порівняльній оцінці якості роботи різних ліній передачі;
- в) при порівняльній кількісній оцінці якості роботи різних типів кабелів.

Вихідними матеріалами для розрахунку надійності діючих кабельних ліній повинні служити експлуатаційні статистичні дані кількості відмов, одержані за роки роботи цієї кабельної магістралі.

Розширення статистичних даних може бути одержане за рахунок збільшення проміжку часу, за який збираються ці дані: щільність відмов і середній час відновлення зв'язку. Проте не треба використовувати дані за перші два-три роки експлуатації, так як в цей період лінія ще знаходиться на стадії приробки, що не являється характерним для її сталої роботи.

При цьому, достовірність результатів розрахунку надійності ВОЛЗ буде збільшуватись із збільшенням кількості статистичних даних [168 – 171].

Розрахунок надійності діючих ліній вимагає визначати достовірність середніх значень характеристик з розрахунком верхніх і нижніх довірчих меж способом, який наведений у пункті 4.1.3.

Таким чином, вихідними даними для розрахунку надійності ліній, які проєктуються або експлуатуються, повинні бути статистичні показники: m_L , λ , $t_{счвз}$, $t_{счп}^п$, M та $t_{счп}^б$, які одержані з аналогічно діючих ліній. При відсутності останніх для кабелів можуть бути використані наближені середні значення інтенсивності відмов і часу відновлення зв'язку, які наведені у табл. 4.7.

Послідовність проєктування показників надійності ВОЛЗ або ВОСП.
Послідовність проєктування показників надійності ВОЛЗ або ВОСП можливо сформулювати таким чином:

- А) На основі заданих характеристик надійності окремих ВОЛЗ або ВОСП

обчислюються сумарні показники надійності усього складу ВОСП. Для цього використовуються вирази коефіцієнта простою (формула (1.13)) або коефіцієнта готовності (формула (1.12)) та середнього часу напрацювання на відмову (формула (4.9)).

Б) Виходячи із норм показників надійності ОК та обладнання лінійного тракту ВОСП на довжині L_M лінії ТЕКМ зв'язку, розраховуються значення показників надійності лінії довжиною L .

В) Показники надійності окремих каналів ВОСП, крім елементів кабельних ліній (ОК, муфт, кінцевих пристроїв), необхідно брати з їх технічних умов. Показники надійності ВОЛЗ: λ , $\lambda_{\max}$, $\lambda_{\min}$ та $t_{\text{счвз}}$ необхідно визначати на основі статистичних показників якості їх роботи (інтенсивності відмов та середнього часу відновлення при відмовах (пошкодженнях з перервою або без перерви) зв'язку, одержаних на аналогічних діючих лініях ТЕКМ зв'язку України в період з 2001 по 2013 рік (табл. 4.7). Значення λ та $t_{\text{счвз}}$, наведені в цій таблиці, є орієнтовними. Тому їх можливо використовувати тільки до тих пір, поки не будуть отримані достовірні дані, що будуть приведені в державній нормативній документації [154, 160, 161, 167, 168].

Г) Визначені значення сумарних показників надійності ВОСП або за необхідності тільки для ВОЛЗ порівнюють із значеннями параметрів надійності, що вимагаються. Якщо вони не задовольняють вимогам ТЕКМ зв'язку, то застосовуються різні заходи підвищення надійності ВОЛЗ або ВОСП у цілому:

1) замінюють їх компоненти на компоненти з кращими показниками надійності;

2) вносять зміни в структурну схему організації зв'язку по елементам або по лінійному тракту на ділянках перемикування;

3) організують експлуатацію ВОЛЗ або ВОСП за оптимальною стратегією відновлення, яка приводить до збільшення показників надійності за суттєво менші капітальні витрати.

Д) За вибраним заходом підвищення надійності ВОЛЗ або ВОСП повторюється розрахунок сумарних показників надійності та порівняння їх

значень із значеннями показників, що вимагаються.

Таким чином, представлену послідовність забезпечення вимагаємої надійності ВОЛЗ або ВОСП можливо використовувати як при проектуванні показників надійності усього комплексу ВОСП, так і при проектуванні показників надійності окремих компонентів, якщо, наприклад, частина обладнання ВОЛЗ уже визначена, а частина можливо ще не визначена із ряду пропозицій різних виробників. Тоді додатково визначається значення показників надійності на цю частину обладнання ВОЛЗ за виразами (4.21), (1.13), (1.15), (1.21) та (1.29). Якщо ці значення показників дорівнюють або перевищують значення показників надійності, що вимагаються, до вказаного додаткового обладнання ВОЛЗ, то таке обладнання доцільно використовувати при проектуванні. Тому, ці значення показників надійності обладнання за рівних умов використання будуть вирішальними критеріями при виборі обладнання нового виробника.

4.5 Приклади визначення надійності ВОЛЗ або ВОСП при їх проектуванні та експлуатації

В даному підрозділі приведені в якості зразків розрахунки параметрів надійності ВОЛЗ або ВОСП в процесі їх проектуванні або експлуатації.

В задачах № 1 та № 2 приведені розрахунки коефіцієнта готовності проєктованих підземних кабельних ліній ВОСП з використанням резервних ліній на мережах SDH при:

- паралельному з'єднанні по надійності її елементів з однаковими значеннями K_{pi} для резервування за схемою $n+m$ та технологією «точка-точка»,
- «кільцевій» топології зв'язку із інтенсивністю відмов одного елемента ВОСП $\lambda_0 = 0$ та числі робочих і резервних елементів рівних 1.

В задачах № 3 та № 4 приведені розрахунки параметрів надійності лінійних споруд ВОСП, що експлуатуються в певних кліматичних районах країни.

Задача № 1. Розрахувати коефіцієнт готовності проєктованої підземної кабельної волоконно-оптичної лінії зв'язку з використанням резервних ліній, якщо число робочих ліній дорівнює 1, а число резервних – 3 при чому: лінія проєктується на основі кабелю ОАрП в рівнинному районі; середнє значення інтенсивності відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку однієї лінії для цього оптичного кабелю дорівнює $16,62 \cdot 10^{-7}$ 1/год, а обладнання перемикачів на резерв – $1 \cdot 10^{-9}$ 1/год; коефіцієнт простою $K_{\text{п}}$ лінії довжиною 700 км повинен становити 0,005.

Розв'язання задачі. В даному прикладі коефіцієнт готовності волоконно-оптичної системи передавання з урахуванням резервування визначається із виразу (1.26), а коефіцієнт простою – із виразу (4.13). Тоді, коефіцієнт простою з резервуванням та коефіцієнт готовності з резервуванням будуть дорівнювати:

$$K_{\text{п}}^{\text{р}} = \frac{1+3}{1 \cdot (3+1) \cdot 3 \cdot 2 \cdot 1} \cdot 0,005^{3+1} + \frac{1}{1+3} \cdot \frac{1 \cdot 10^{-9}}{(1+3) \cdot 16,62 \cdot 10^{-7} + 1 \cdot 10^{-9}} =$$

$$= 0,00004;$$

$$K_{\text{г}}^{\text{р}} = 1 - 0,00004 = 0,99996.$$

Розрахуємо сумарний коефіцієнт готовності ($K_{\text{г}\Sigma}$) волоконно-оптичної системи передавання з урахуванням резервування волоконно-оптичної лінії зв'язку, якщо коефіцієнт готовності апаратури відповідає нормі на еталонну довжину лінії, тобто $K_{\text{га}}$ дорівнює 0,995. Тоді $K_{\text{г}\Sigma}$ буде дорівнювати у відповідності до (1.27):

$$K_{\text{г}\Sigma}^{\text{р}} = 0,995 \cdot 0,99996 = 0,99496.$$

Порівняємо одержане значення $K_{\text{г}\Sigma}^{\text{р}}$ волоконно-оптичної системи передавання з резервуванням із значенням коефіцієнта готовності ВОСП, що вимагається. Для цього розрахуємо значення коефіцієнта готовності, що вимагається, за виразом (1.20).

Таким чином, для лінії довжиною 700 км $K_{\text{г вим}}^{\text{р}}$ буде дорівнювати:

$$K_{\text{г вим}}^{\text{р}} = 0,985^{\frac{700}{2500}} = 0,9958.$$

Отже, сумарний коефіцієнт готовності, що вимагається, для цієї волоконно-оптичної системи передавання буде дорівнювати:

$$K_{\Gamma\Sigma}^p = 0,995 \cdot 0,9958 = 0,9908.$$

Постільки значення $K_{\Gamma\Sigma}^p > K_{\Gamma\Sigma}^{\text{вим}}$, то одержаний коефіцієнт готовності волоконно-оптичної системи передавання із схемою резервування волоконно-оптичної лінії зв'язку $n+m$ задовольняє нормі.

Задача № 2. Розрахувати коефіцієнт готовності проєктованої ВОЛЗ довжиною 600 км з використанням «кільцевої» структури зв'язку. При цьому:

- інтенсивність відмов одного елемента системи $\lambda_0 = 0$ і число робочих елементів системи (n) і резервних елементів (m) дорівнюють 1;
- робочий та резервний елементи ВОЛЗ передбачаються на базі оптичного кабелю типу ОАрБгП, що буде прокладений в землі або субканалі по території рівнинного району;
- за даними експлуатаційних показників якості роботи ВОЛЗ в районі проєктування траси середній час відновлення лінії з перервою зв'язку дорівнює 6,1 год.

Розв'язання задачі. Середня інтенсивність відмов з перервою зв'язку на 1 км траси ВОЛЗ для ОК типу ОАрБгП та середній час відновлення зв'язку згідно до табл. 4.7 дорівнюють $\lambda_p = 20,06 \cdot 10^{-7}$ 1/год, $t_{\text{счвзр}} = 4,07$ год.

Параметр потоку відмов лінійних споруд волоконно-оптичної лінії зв'язку визначається за виразом (4.8). Тоді, він буде дорівнювати:

$$\Lambda_{Lp} = 20,06 \cdot 10^{-7} \cdot 600 = 1203,6 \cdot 10^{-6} \text{ 1/год.}$$

Середній час напрацювання на відмову (пошкоджень з перервою) зв'язку на довжині лінії визначається перетворенням виразу (4.18). Тоді, T_{0pL} буде дорівнювати:

$$T_{0pL} = \frac{1}{1203,6 \cdot 10^{-6}} = 830,84 \text{ год.}$$

Коефіцієнт готовності лінійних споруд волоконно-оптичної лінії зв'язку визначається за виразом (4.21). Тоді, він буде дорівнювати:

$$K_{rL} = \frac{830,84}{830,84 + 6,1} = 0,9927.$$

Згідно до виразу (4.13) значення коефіцієнту простою волоконно-оптичної лінії зв'язку буде дорівнювати:

$$K_{nL} = 1 - 0,9927 = 0,0073.$$

Тоді, коефіцієнт простою з резервуванням за «кільцевою» структурою ВОСП буде визначатися із виразу (1.15). Тоді, він буде дорівнювати:

$$K_{nL}^p = 0,0073^2 = 0,00005.$$

В свою чергу, коефіцієнт готовності з резервуванням ВОЛЗ:

$$K_{rL}^p = 1 - 0,00005 = 0,99995.$$

Для порівняння значення K_{rL}^p із значенням $K_{rL\text{ВІМ}}^p$ знайдемо за виразом (1.21) цей коефіцієнт. Тоді,

$$K_{rL\text{ВІМ}}^p = 0,985^{\frac{600}{2500}} = 0,9964.$$

Із результатів розрахунку коефіцієнта простою з резервуванням лінії за «кільцевою» системою було встановлено, що він відповідає нормі.

Задача № 3. Розрахувати параметри надійності лінійних споруд ВОСП, якщо: ВОЛЗ проходить між містами Миколаїв – Хмельницький. Вона реалізована на основі оптичних кабелів двох марок ОАрП та ОАрБгП. Довжини цих ОК складають у відсотковому співвідношенні 15 % та 85 % відповідно від довжини траси лінії, яка дорівнює 550 км; при цьому довжини частин траси, що проходить у причорноморському районі складає 165 км, а у рівнинній – 385 км.

В задачі передбачено 5 відмов лінійних споруд з перервою зв'язку протягом року.

Розв'язання задачі. Середня інтенсивність відмов з перервою зв'язку на 1 км траси ВОЛЗ для ОК марки ОАрБгП згідно з табл. 4.7 $\lambda_{\text{пч}} = 30,03 \cdot 10^{-7}$ 1/год, $\lambda_p = 20,06 \cdot 10^{-7}$ 1/год, для ОК марки ОАрП $\lambda_{\text{пч}} = 11,07 \cdot 10^{-7}$ 1/год, $\lambda_p = 16,62 \cdot 10^{-7}$ 1/год.

Параметр потоку відмов для причорноморського та рівнинного районів визначається за виразом (4.8). Тому, параметр потоку відмов лінійних споруд

ВОЛЗ між цими містами буде дорівнювати:

$$\Lambda_{\text{пч}} = (30,03 \cdot 10^{-7} \cdot 0,85 + 11,07 \cdot 10^{-7} \cdot 0,15) \cdot 165 = 448,56 \cdot 10^{-6} \text{ 1/год};$$

$$\Lambda_{\text{р}} = (20,06 \cdot 10^{-7} \cdot 0,85 + 16,62 \cdot 10^{-7} \cdot 0,15) \cdot 385 = 752,44 \cdot 10^{-6} \text{ 1/год};$$

$$\Lambda = \Lambda_{\text{пч}} + \Lambda_{\text{р}} = 448,56 \cdot 10^{-6} + 752,44 \cdot 10^{-6} = 1201 \cdot 10^{-6} \text{ 1/год};$$

$$\Lambda_{\text{пчОАрБгП}} = 30,03 \cdot 10^{-7} \cdot 0,85 \cdot 165 = 421,17 \cdot 10^{-6} \text{ 1/год};$$

$$\Lambda_{\text{пчОАрП}} = 11,07 \cdot 10^{-7} \cdot 0,15 \cdot 165 = 27,40 \cdot 10^{-6} \text{ 1/год};$$

$$\Lambda_{\text{рОАрБгП}} = 20,06 \cdot 10^{-7} \cdot 0,85 \cdot 385 = 656,46 \cdot 10^{-6} \text{ 1/год};$$

$$\Lambda_{\text{рОАрП}} = 16,62 \cdot 10^{-7} \cdot 0,15 \cdot 385 = 959,81 \cdot 10^{-6} \text{ 1/год}.$$

Середній час напрацювання на відмову (пошкодження з перервою) зв'язку на довжині кабельної магістралі визначається, виходячи із (4.18) за виразом

$$T_{0pL} = \frac{1}{\Lambda_L}. \text{ Тоді, } T_{0pL} \text{ буде дорівнювати:}$$

$$T_{0pL} = \frac{1}{1201 \cdot 10^{-6}} = 832,6 \text{ год}.$$

Середній час відновлення (пошкоджень з перервою) зв'язку ділянки визначається за виразом (4.10). Тоді, $t_{\text{счвз}}$ буде дорівнювати:

$$t_{\text{счвз}} = \frac{421,17 \cdot 10^{-6} \cdot 5,45 + 27,40 \cdot 10^{-6} \cdot 4,86}{1201 \cdot 10^{-6}} + \frac{656,46 \cdot 10^{-6} \cdot 4,07 + 959,81 \cdot 10^{-6} \cdot 5,32}{1201 \cdot 10^{-6}} = 8,45 \text{ год}.$$

Коефіцієнт готовності лінійних споруд ВОЛЗ визначається за виразом (4.21). Тоді, $K_{\text{гЛ}}$ дорівнює:

$$K_{\text{гЛ}} = \frac{832,6}{832,6 + 8,45} = 0,9899.$$

Визначимо довірчі межі значень середнього часу напрацювання на відмову та середнього часу відновлення зв'язку.

Довірчі межі значень T_{0pL} та $t_{\text{счвз}}$ визначаються за виразом (4.22), а коефіцієнти відповідно верхньої та нижньої меж при заданій довірчій ймовірності, наприклад, $\gamma = 0,999$ з табл. 4.1. Тоді, для кількості відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку на ВОЛЗ при ($N = 5$) $\alpha_1 = 6,76$, $\alpha_2 = 0,30$.

Таким чином, значення середнього часу напрацювання на відмову

(пошкодження з перервою) зв'язку буде знаходитися у межах:

$$\left. \begin{aligned} T_{0pL}^B &= 6,76 \cdot 832,6 = 5628,4 \text{ год} \\ T_{0pL}^H &= 0,30 \cdot 832,6 = 249,8 \text{ год} \end{aligned} \right\}.$$

Значення середнього часу відновлення зв'язку буде знаходитися у межах:

$$\left. \begin{aligned} t_{счвз}^B &= 6,76 \cdot 8,45 = 57,12 \text{ год} \\ t_{счвз}^H &= 0,30 \cdot 8,45 = 2,54 \text{ год} \end{aligned} \right\}.$$

Значення середнього часу напрацювання на відмову, середнього часу відновлення зв'язку та коефіцієнта готовності лінійних споруд ВОЛЗ, що вимагається, можливо визначити із норм цих параметрів на довжині гіпотетичної лінії $L = 2500$ км. Тоді, ці параметри будуть дорівнювати:

$$T_{0pL \text{ вим}} = 340,5 \cdot \frac{2500}{550} = 1547,73 \text{ год};$$

$$t_{счвз \text{ вим}} = 5,2 \cdot \frac{2500}{550} = 23,64 \text{ год};$$

$$K_{гL \text{ вим}} = \frac{1547,73}{1547,73 + 5,2} = 0,9967.$$

Таким чином, з розрахунків видно, що значення середнього часу напрацювання на відмову, середнього часу відновлення зв'язку відповідають нормам, проте коефіцієнт готовності лінії не відповідає нормі.

Задача № 4. Розрахувати коефіцієнт готовності окремих ділянок волоконно-оптичних ліній зв'язку, реалізованих на основі оптичного кабелю типу ОКЛБг з різних числом оптичних волокон. При цьому: кількість відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку цих ділянок, що сталися за 5 років, приведені в табл. 4.8; ділянки розташовані в Донецькій та Луганській областях тобто в рівнинних районах; ділянки проходять в ненаселених пунктах в ґрунті або в субканалі, а ті, що прокладені в населених пунктах, – в ґрунті або кабельній каналізації.

За результатами розрахунків коефіцієнта готовності різних ділянок волоконно-оптичних ліній зв'язку виконати порівняльну оцінку цього коефіцієнта, що вимагається, згідно з нормами на еталонну лінію.

Розв'язання задачі. Визначимо щільність відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку за виразом (4.1).

Для кабелю типу ОКЛБГ–6 на ділянці №1 волоконно-оптичної лінії зв'язку в ненаселеному пункті при експлуатації в ґрунті при 4 пошкодженнях за 5 років буде дорівнювати:

$$m_{L1} = \frac{4}{1 \cdot 369,4} \cdot 100 = 1,08.$$

Для кабелів типу ОКЛБГ–6, ОКЛБГ–12, ОКЛБГ–18 та ОКЛБГ–24 розрахунки щільності відмов за виразом (4.1) для ділянок № 2...8 ліній розраховані аналогічно. Результати розрахунків m_{Li} зведені до табл. 4.9.

Визначимо середній час відновлення ліній з перервою зв'язку за виразом (4.10) на окремих ділянках з числом відмов на кожній ділянці $N > 1$.

Тоді, для кабелю ОКЛБГ–6, що експлуатується на ділянці волоконно-оптичної лінії зв'язку № 1 в ґрунті за 5 років експлуатації при числі відмов $N = 4$, $t_{счвз}$ буде дорівнювати:

$$t_{счвз1} = \frac{2,78 + 2,62 + 2,85 + 3,00}{4} = 2,81 \text{ год.}$$

Для кабелів на ділянках №2...8 розрахунки $t_{счвзи}$ виконані аналогічно. Результати розрахунків середнього часу відновлення зв'язку на кожній ділянці приведені в табл. 4.8.

Для порівняльної оцінки коефіцієнта готовності окремих ділянок ВОЛЗ визначимо його значення за виразом (4.20).

Тоді, для кабелю на першій ділянці $K_{Г1}$ буде дорівнювати:

$$K_{Г1} = \frac{8760 - 1,08 \cdot 2,81}{8760} = 0,9997.$$

Для решти ділянок $K_{Гi}$ розраховується аналогічно. Результати розрахунків $K_{Гi}$ також зведені до табл. 4.9.

Проведемо оцінку коефіцієнта готовності ділянки лінії, що вимагається, за виразом (1.20). Розрахуємо за цим виразом $K_{Г1\text{вим}}$:

$$K_{Г1\text{вим}} = 0,985^{\frac{369,4}{2500}} = 0,9978.$$

Таблиця 4.8 – Відомість відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку на окремих ділянках ВОЛЗ Донецької та Луганської областей на основі ОК типу ОКЛБГ за 5 років

Номер ділянки траси ВОЛЗ	Тип кабелю	Місце розташування ділянки	Довжина ділянки, км	Відомості про відмови		
				рік	кількість відмов	час відновлення зв'язку однієї відмови, год
1	2	3	4	5	6	7
1	ОКЛБг – 6	в ненаселеному пункті в ґрунті	369,4	1	1	2,78
				2	–	–
				3	2	2,62; 2,85
				4	1	3,00
				5	–	–
2	ОКЛБг – 24		352, 6	1	1	3,47
				2	–	–
				3	2	2,95; 3,25
				4	–	–
				5	1	3,75
3	ОКЛБг – 24		410,2	1	–	–
				2	2	3,28; 3,65
				3	2	3,20; 3,80
				4	–	–
				5	–	–
4	ОКЛБг – 12	в населеному пункті в ґрунті	31,4	1	–	–
				2	2	2,82; 3,25
				3	–	–
				4	3	3,55; 4,00; 2,75
				5	–	–

Закінчення табл. 4.8

1	2	3	4	5	6	7	
5	ОКЛБг – 6		369,4	1	–	–	
				2	1	3,35	
				3	–	–	
				4	3	3,17; 3,65; 3,05	
				5	–	–	
6	ОКЛБг – 18	в ненаселеном у пункті в субканалі	469,4	1	–	–	
				2	–	–	
				3	2	2,50; 2,60	
				4	–	–	
				5	1	2,95	
7	ОКЛБг – 6	в населеному пункті в кабельній каналізації	33,4	1	1	4,35	
				2	2	3,75; 4,55	
				3	–	–	
				4	–	–	
				5	1	4,82	
8	ОКЛБг – 6			26,32	1	–	–
					2	1	4,55
					3	2	3,85; 4,60
					4	–	–
					5	1	4,13

Таблиця 4.9 – Розрахункові значення параметрів надійності ділянок ВОЛЗ в Донецькій та Луганській областях за 5 років

Номер за порядком ділянки лінії	Тип кабелю	Місце розташування ділянки	Довжина ділянки, км	Параметр надійності лінії			
				m_{Li}	$t_{счвзi}$, год	коефіцієнт готовності	
						для довжини ділянки	що вимагається
1	ОКЛБГ – 6	в ненаселеному пункті в ґрунті	369,4	1,08	2,81	0,9997	0,9978
2	ОКЛБГ – 24		352,6	1,13	3,36	0,9996	0,9979
3	ОКЛБГ – 24		410,2	0,98	3,48	0,9996	0,9975
4	ОКЛБГ – 12	в населеному пункті в ґрунті	31,4	15,92	3,27	0,9941	0,9998
5	ОКЛБГ – 6		369,4	1,08	3,31	0,9996	0,9978
6	ОКЛБГ – 18	в ненаселеному пункті в субканалі	469,4	0,64	2,68	0,9998	0,9972
7	ОКЛБГ – 6	в населеному пункті в кабельній каналізації	33,4	11,97	4,37	0,9940	0,9998
8	ОКЛБГ – 6		26,32	15,20	4,28	0,9926	0,9998

Значення $K_{гiвiм}$ для інших ділянок розраховані аналогічно та зведені до табл. 4.9.

Результати розрахунків параметрів надійності окремих ділянок волоконно-оптичних ліній зв'язку в Донецькій та Луганській областях за 5 років експлуатації дозволили встановити, що:

1) значення коефіцієнта готовності волоконно-оптичних ліній зв'язку, що реалізовані на основі оптичних кабелів типу ОКЛБГ–6, ОКЛБГ–18 та ОКЛБГ–24, які експлуатуються в ненаселених пунктах в ґрунті або субканалі на ділянках №1, 2, 3, 5 та 6, відповідають нормам;

2) значення коефіцієнта готовності ВОЛЗ реалізованих на основі кабелів типу ОКЛБГ–12 та ОКЛБГ–6, що експлуатуються в населених пунктах в ґрунті та кабельній каналізації на ділянках № 4, 7 та 8 не відповідають нормам:

– тобто $K_{гLi} \leq K_{гLiвiм}$ для кабелю ОКЛБГ–12, що експлуатується в ґрунті (ділянка № 4), на 0,57 %, для кабелів ОКЛБГ–6, що експлуатуються в кабельній каналізації (ділянка № 7) – на 0,58 %, а на ділянці № 8 – 0,72 %;

– невідповідність коефіцієнта готовності нормам на цих ділянках вказує на те, що лінійний персонал, який обслуговує ВОЛЗ, повинен проаналізувати причини зниження якості технічної експлуатації та прийняти міри до ліквідації недоліків.

4.6 Висновки до четвертого розділу

В даному розділі з розвитку та обґрунтування підходів до визначення показників експлуатаційної надійності волоконно-оптичної лінії зв'язку або волоконно-оптичної системи передавання було:

А. Виконано:

Дослідження підходів до визначення показників надійності ВОЛЗ транспортної електронної комунікаційної мережі зв'язку при проєктуванні та експлуатації ВОСП, в рамках яких:

а) розглянуті експлуатаційні показники якості роботи та кількісні

характеристики надійності ВОЛЗ. Особливу увагу при цьому приділено взаємозв'язку окремих кількісних характеристик надійності та оцінці їх ймовірності;

б) проведено дослідження основних факторів, що впливають 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 місцевих умов експлуатації та пори року за 13-річний термін з 2001 по 2013 роки (m_L , $t_{счвз}$, $t_{счп}$ та середні, максимальні і 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, приведених в роботі [4];

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

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

ж) приведені приклади розрахунку коефіцієнта простою при проектуванні ВОСП з резервуванням на мережах SDH при:

– паралельному з'єднанні по надійності її елементів з однаковими значенням K_{pi} для резервування за схемою $n+m$ та топологією «точка-точка»;

– при «кільцевій» топології зв'язку з інтенсивністю відмов одного елемента ВОСП $\lambda_0 = 0$ та числі робочих та резервних елементів рівних 1.

з) приведені в якості прикладів задачі з розрахунку параметрів надійності лінійних споруд ВОСП, що проектуються або експлуатуються;

Б. Встановлено, що:

а) на базі статистичних даних про кількість, причину і характер

пошкоджень лінійних споруд волоконно-оптичних систем передавання ТЕКМ зв'язку, наприкладі, Донецької та Луганської областей за період з 2001 по 2013 рік та за період з 2001 по 2005 рік отримані:

1) розподіл питомої ваги пошкоджень ліній, які відрізняються за рахунок:

- дії зловмисників збільшується на 15 %;
- дії стихії зменшується на 12 %;
- інших дій зменшується на 3 %.

2) відсоткові співвідношення кількості пошкоджень ліній ТЕКМ зв'язку значно відрізняється для:

- броньованого кабелю у ґрунті менше на 41 %;
- броньованого кабелю в кабельній каналізації більше на 16,35 %;
- неброньованих кабелів в кабельній каналізації або субканалі менше на 24,35 %;

б) отримані середні значення кількісних показників надійності ВОЛЗ по країні за 13-річний термін експлуатації оптичних кабелів відрізняється від значень цих показників за 5-річний термін для:

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

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

в) наведені розрахункові значення λ , $\lambda_{\text{макс}}$, $\lambda_{\text{мін}}$, $t_{\text{счвз}}$ ТЕКМ зв'язку країни, отримані за 13-річний термін можливо вважати більш достовірними, ніж відповідні значення представлені в [154] за 5-річний термін. Вони дають можливість визначати кількісні характеристики надійності ВОЛЗ та ВОСП при проектуванні нових ліній та ліній, що експлуатуються, для контролю стану їх технічного обслуговування;

г) при необхідності визначення параметрів надійності ВОЛЗ або ВОСП в певному кліматичному районі в разі відсутності статистичних даних m_L та $t_{\text{счвз}}$ з аналогічних діючих систем передавання можуть бути використані їх наближені

значення λ та $t_{\text{счвз}}$ (при пошкодженнях з перервою) зв'язку, наведені в табл. 4.7;

– 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) приведені приклади № 1, 2 розрахунку параметрів надійності ВОСП за рахунок резервування ВОЛЗ на основі різних топологій організації зв'язку на етапі проектування можуть бути зразками для забезпечення норм їх надійності;

– приведені приклади № 3, 4 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.

В. Рекомендовано:

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. 4.7) являються більш достовірними, ніж їх значення, отримані в [4, 154]. Вони можуть бути використані до виходу державних стандартів з показників якості роботи оптичних ліній.

3) значення цих 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.

РОЗДІЛ 5

КОНТРОЛЬ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ЛІНІЙ ЗВ'ЯЗКУ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

5.1 Загальні положення

Надійність роботи елементів ВОЛЗ або її елементів ділянки регенерації ВОСП залежить від контролю їх технічного стану та оптимізації технічного обслуговування при експлуатації. Контроль технічного стану цих елементів потребує спостереження за параметрами якості та безвідмовності роботи лінії з врахуванням процесу їх старіння і дії екстремальних температур експлуатації. Враховуючи сказане в розділі буде вирішуватися комплекс задач, пов'язаних з: проведенням досліджень статистичних даних розподілу напрацювання на відмову лінійних споруд ВОЛЗ в різних кліматичних районах країни; розробки методу контролю ймовірнісних показників надійності лінійних споруд ВОЛЗ при початковому терміні експлуатації; розробки способу визначення 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 та інше.

5.2 Обґрунтування підходів до визначення розподілу випадкових величин

В основі більшості процесів, що ведуть до виникнення відмов лінійних споруд ВОЛЗ, лежать загальні закономірності. Тому розподіли випадкових величин, що описують реальні процеси виникнення відмов лінійних споруд ВОЛЗ, можливо наближено замінювати будь-якими відомими в теорії ймовірності розподілами. Вибір моделі відмов, тобто визначення аналітичного виразу функції розподілу, проводять на підставі аналізу: статистичних даних

напрацювання на відмову, фізичних процесів деградації, які її зумовлюють.

Обмеженість статистичних даних приводить до неможливості вказати точне і достовірне значення того або іншого параметра, доводиться вказувати лише межі можливих кількісних характеристик. Так, наприклад, якщо на підставі статистичних даних було визначено середнє статистичне значення деякого параметра $T_{x_0}^*$, який при обмеженій кількості відомостей містить в собі елемент випадковості, тобто є тим або іншим наближенням до істинного значення T_{x_0} , то виникає потреба в оцінці точності отриманих результатів. Для цього користуються методами математичної статистики. Вони дозволяють визначати межі згідно розділу 4, в яких могла бути допущена помилка.

Співвідношення, яке встановлює зв'язок між можливими значеннями випадкової величини і їх ймовірністю, носить назву закону розподілу випадкової величини. Для повної характеристики випадкової величини треба знати закон її розподілу. В тих випадках, коли не вимагається такої повної характеристики, обмежуються середнім значенням випадкової величини [172 – 176]:

$$x_{\text{сеп}} = \frac{m_1 \cdot x_1 + m_2 \cdot x_2 + \dots + m_n \cdot x_n}{n}, \quad (5.1)$$

або в іншому вигляді:

$$x_{\text{сеп}} = \frac{m_1}{n} x_1 + \frac{m_2}{n} x_2 + \frac{m_n}{n} x_n, \quad (5.2)$$

де $x_{\text{сеп}}$ – середнє значення випадкової величини; $m_1, m_2, \dots, m_n$ – числа випробувань, $m_1 + m_2 + \dots + m_n = n$; n – загальне число випробувань; $x_1, x_2, \dots, x_n$ – значення випадкової величини.

За виразами (5.1) і (5.2) можливо отримати середній результат випадкової величини шляхом досліджень, наприклад, шляхом вимірювань тих або інших характеристик ОК при різних випробуваннях. Найважливішою характеристикою випадкової величини є математичне очікування. Математичним очікуванням випадкової величини перервного типу називається межа суми нескінченно великого числа добутків всіх можливих значень цієї величини на їх ймовірність.

Статистичні середні значення величини можуть бути простими і

зваженими. Проста середня величина розраховується за наявності двох і більше незгрупованих статистичних величин, розташованих в довільному порядку за таким загальним виразом [172]:

$$\overline{X}_n = \sqrt[m]{\frac{\sum X_n^m}{N_{\text{ст}}}}, \quad (5.3)$$

де $\overline{X}_n$ – проста середня величина статистичних значень; X_n^m – значення окремої простої незгрупованої статистичної величини; $N_{\text{ст}}$ – число простих статистичних величин; m – показник ступеня.

Зважена середня величина статистичних величин розраховується за згрупованими статистичними величинами за виразом [172 – 176]:

$$\overline{X}_z = \sqrt[m]{\frac{\sum X_z^m f}{\sum f}}, \quad (5.4)$$

де $\overline{X}_z$ – значення окремої зваженої згрупованої статистичної величини; m – показник ступеня; f – число величин у групі.

Із збільшенням числа випробувань середній результат, одержуваний з досліджень, прямує до математичного очікування і при достатньо великому числі випробувань може відрізнятися скільки завгодно мало від математичного очікування випадкової величини.

На практиці часто, крім середнього значення випадкової величини, для її характеристики використовується найвірогідніше значення, яке називається мода. В окремому випадку, коли крива розподілу симетрична, мода і математичне очікування співпадають. У багатьох випадках, у тому числі і при оцінці ОК з метою виявлення практично найважливіших рис випадкових величин, знання їх середніх значень буває недостатнім, оскільки часто дуже важливим виявляється питання відхилення значень, що фактично приймаються даною випадковою величиною від її середнього значення. Тобто як сильно ці значення розсіяні, чи будуть вони здебільшого тісно згруповані навкруги середнього значення або, навпаки, більшість з них відрізнятиметься від середнього значення дуже різко.

Середнє арифметичне ймовірне відхилення випадкової величини визначається за виразом [175]:

$$\mu = \sum_{i=1}^n |x_i - x_{\text{сеп}}| P_i, \quad (5.5)$$

де μ – середнє арифметичне ймовірне відхилення випадкової величини; x_i – значення випадкової величини; $x_{\text{сеп}}$ – середнє значення (математичне очікування) випадкової величини; P_i – вірогідність i -го значення; n – число величин; i – номер величини.

У цьому виразі $|x_i - x_{\text{сеп}}|$ є абсолютним значенням відхилення величини від її середнього значення без урахування знака. Значення $x_{\text{сеп}}$ (математичне очікування) випадкової величини знаходиться за виразом [175]:

$$x_{\text{сеп}} = \sum_{i=1}^n x_i P_i, \quad (5.6)$$

де $x_{\text{сеп}}$ – середнє арифметичне значення (математичне очікування) випадкової величини; x_i – значення випадкової величини; P_i – вірогідність i -го значення; n – число величин; i – номер величини.

Мірою розсіювання величин служить також середнє квадратичне відхилення [175]:

$$\sigma = \sqrt{D(x)}, \quad (5.7)$$

де σ – середнє квадратичне відхилення; $D(x)$ – дисперсія, що представляє математичне очікування квадрат відхилення випадкової величини від її середнього значення (математичного очікування).

Дисперсія, що представляє математичне очікування, є квадрат відхилення випадкової величини від її середнього значення (математичного очікування) і визначається за виразом [175]:

$$D(x) = \sum_{i=1}^n (x_i - x_{\text{сеп}})^2 P_i, \quad (5.8)$$

де $D(x)$ – дисперсія середнього значення математичного очікування; x_i – значення випадкової величини; $x_{\text{сеп}}$ – середнє значення (математичне очікування) випадкової величини; P_i – вірогідність i -го значення випадкової величини; n –

число випадкових величин; i – номер величини.

При обробці результатів досліджень для оцінки розсіювання іноді користуються статистичним середнім арифметичним відхиленням, яке аналогічне середньому арифметичному вірогідному відхиленню та дорівнює:

$$\mu^*(n) = \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{n} |x_i - x_{\text{сеп}}|, \quad (5.9)$$

де $\mu^*(n)$ – статистичне середнє арифметичне відхилення; m_i – число випробувань з отриманими значеннями x_i ; n – загальне число випробувань (досліджень); x_i – значення величини при i -му випробуванні; $x_{\text{сеп}}$ – середнє арифметичне спостережуваних значень.

Відношення $\frac{m_i}{n}$ називається частістю або статистичною ймовірністю. Із збільшенням числа спостережень її числове значення наближається до ймовірності.

Середнє статистичне квадратичне відхилення визначається [175]:

$$\sigma^* = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{m_i}{n} (x_i - x_{\text{сеп}})^2}, \quad (5.10)$$

або за виразом:

$$\sigma^* = \sqrt{\frac{(x_1 - x_{\text{сеп}})^2 m_1 + (x_2 - x_{\text{сеп}})^2 m_2 + \dots + (x_n - x_{\text{сеп}})^2 m_n}{n}}, \quad (5.11)$$

де σ^* – середнє статистичне квадратичне відхилення; $x_1, x_2, \dots, x_n$ – окремі чисельні значення випадкової величини; $x_{\text{сеп}}$ – середнє чисельне значення випадкової величини; $m_1, m_2, \dots, m_n$ – число випробувань із значеннями $x_1, x_2, \dots, x_n$ (повторюваність значення випадкової величини); n – загальне число випробувань (досліджень).

Найуживанішою мірою розсіювання є середнє квадратичне відхилення, рідше середнє арифметичне, в якому не так сильно позначаються відхилення як у більшу, так і в меншу сторону.

Дисперсія має велике застосування в теорії ймовірності, але як міра, що характеризує розсіювання, вона не зручна через її розмірність. Зручніше

застосовувати середнє квадратичне відхилення, яке має розмірність, однакову з відхиленнями випадкових величин і їх середніми значеннями; дисперсія ж має розмірність квадрата випадкових відхилень. При малому числі дослідів для визначення середнього статистичного квадратичного відхилення σ рекомендується користуватися величиною дещо більшою, ніж та, яку дає формула (5.10), користуючись в цьому випадку виразом [172 – 176]:

$$\sigma^* = \sqrt{\frac{(x_1 - x_{\text{сеп}})^2 m_1 + (x_2 - x_{\text{сеп}})^2 m_2 + \dots + (x_n - x_{\text{сеп}})^2 m_n}{n - 1}}, \quad (5.12)$$

де σ^* – середнє статистичне квадратичне відхилення; $x_1, x_2, \dots, x_n$ – окремі чисельні значення випадкової величини; $x_{\text{сеп}}$ – середнє чисельне значення випадкової величини; $m_1, m_2, \dots, m_n$ – число випробувань із значеннями $x_1, x_2, \dots, x_n$ (повторюваність значення випадкової величини); n – загальне число випробувань (досліджень).

При великому числі досліджень середні статистичні квадратичні відхилення, обчислені за формулами (5.10) і (5.11), будуть практично однаковими, але при малому числі досліджень значення, одержувані за формулою (5.10), будуть дещо заниженими.

Як було відзначено вище, повною характеристикою випадкової величини є закон її розподілу. Найпростішою формою закону розподілу дискретної випадкової величини x може бути таблиця, що складається з двох рядків: верхній рядок містить можливі значення випадкової величини, а нижній – їх ймовірність. Таким чином, під кожним з можливих значень стоїть її ймовірність. Таку таблицю називають рядом розподілу. Для наочності ряд розподілу зображають графічно, це дозволяє швидко, не вдаючись до дослідження таблиць, охопити найважливіші риси досліджуваного закону розподілу. Відклавши у вибраному масштабі по вісі абсцис загальні значення величини x_i , а по вісі ординат – ймовірності (P_i), відповідні цим значенням, отримаємо, так званий багатокутник розподілу (рис. 5.2). Сума ймовірностей всіх можливих значень випадкової величини, як повної системи подій, завжди повинна бути рівна одиниці.

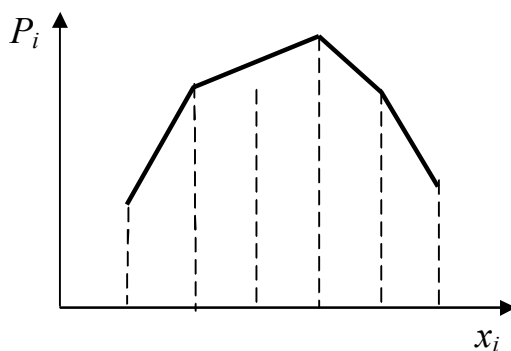


Рисунок 5.2 – Багатокутник розподілу випадкової величини

Для кількісної характеристики розподілу ймовірності неперервної величини користуються не ймовірністю події $X = x$, а ймовірністю події $X < x$, де x – поточна змінна величини. Ймовірність вказаної події є функція від x . Ця функція називається функцією розподілу випадкової величини x і визначається за виразом [174]:

$$F(x) = P(X < x), \quad (5.13)$$

де $F(x)$ – функцією розподілу випадкової величини x ; $P(X < x)$ – ймовірність вказаної події.

Інтегральна функція розподілу визначає ймовірністю того, що випадкова величина X приймає значення, які менші довільно змінного дійсного числа x . Функція розподілу є універсальною характеристикою випадкової величини (як неперервної, так і перервної). Функція розподілу неперервної випадкової величини є функцією, неперервною в усіх точках (рис. 5.3). Функція розподілу будь-якої перервної випадкової величини є розривна східчаста функція [172].

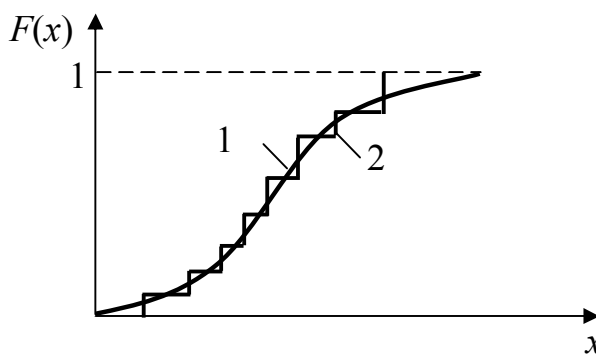


Рисунок 5.3 – Інтегральна крива розподілу неперервної 1 та перервної 2 випадкової величин

У міру збільшення числа можливих значень випадкової величини і зменшення інтервалів між ними функція розподілу перервної випадкової величини наближається до неперервної. Для характеристики випадкової величини неперервного типу використовується поняття про щільність ймовірності, яка виражає вірогідність того, що випадкова величина X прийме значення, що знаходиться між x і $x + \Delta x$, в припущенні Δx , що прямує до нуля. Таким чином, щільність ймовірності є функцією $f(x)$, що представляє похідну функцію розподілу $F(x)$, тобто:

$$f(x) = F'(x). \quad (5.14)$$

Функцію щільності розподілу (щільність ймовірності) називають також диференціальною функцією розподілу. Крива, яка зображає щільність розподілу вірогідності випадкової величини, називається диференціальною кривою розподілу (рис. 5.4).

Якщо використати щільність ймовірності випадкової величини ($f(x)$), то можливо вживати таку рівність [175]:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1. \quad (5.15)$$

де $\int_{-\infty}^{+\infty}$ – інтеграл від функції $f(x)$ від мінус ∞ до $+\infty$; $f(x)$ – щільність ймовірності випадкової величини.

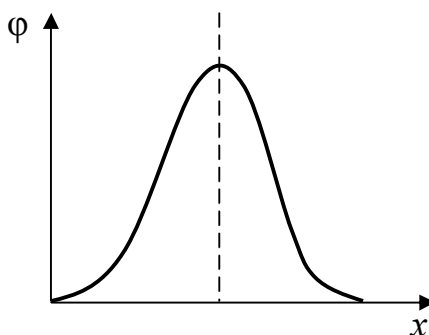


Рисунок 5.4 – Диференційна крива розподілу випадкової величини

Для визначення надійності ВОЛЗ або власне ОК слід мати можливо більше даних про кількість та причини пошкоджень на основі статистичних даних. Після

відповідної обробки цих даних одержують статистичний ряд розподілу, який представляють графічно гістограмою, виходячи з виду якої вибирають апроксимуючу функцію, відповідну тому або іншому теоретичному закону розподілу умов пошкоджень. Для оцінки правдоподібності вибраного закону розподілу умов пошкоджень лінійних споруд ВОЛЗ передбачено кілька критеріїв згоди. Найбільш вживаними є критерії Колмогорова і χ^2 Пірсона.

5.2.1 Закони розподілу дискретних випадкових величин

Закон розподілу Пуассона застосовується за умови, що події відбуваються незалежно одна від іншої з постійною середньою інтенсивністю за однакові проміжки часу. У практиці надійності до таких величин відноситься число відмов виробу за фіксований проміжок часу [175].

Випадкова величина розподілення відмов виробу за законом Пуассона, якщо ймовірність того, що вона прийме певне значення m , визначається [175]:

$$P_m = \frac{1}{m!} a^m e^{-a}, \quad (5.16)$$

де P_m – ймовірність розподілу випадкової величини, що прийме певне значення m ; $m = 0, 1, 2, \dots$ – можливі значення випадкової величини; a – додатна величина, що характеризує інтенсивність появи подій в n випробуваннях (параметр розподілу) [175].

Якщо в середньому за одиницю часу настає λ відмов і додаткова величина $a = \lambda \cdot t$, то вираз можливо представити у виді [175]:

$$P_m(t) = \frac{(\lambda \cdot t)^m}{m!} e^{-\lambda \cdot t}, \quad (5.17)$$

де $P_m(t)$ – ймовірність розподілу випадкової величини за одиницю часу; λ – середня кількість відмов за одиницю часу; $m = 0, 1, 2, \dots$ – можливі значення випадкової величини; t – одиниця часу.

В цьому випадку, якщо λ виражається через середній час безвідмовної роботи лінійних споруд ВОЛЗ вираз (5.17) можливо представити у вигляді [175]:

$$P_m(t) = \frac{1}{m!} \left(\frac{t}{T_{0pL}} \right)^m e^{-\frac{t}{T_{0p}}}, \quad (5.18)$$

де $P_m(t)$ – ймовірність появи m відмов лінійних споруд ВОЛЗ за одиницю часу t ; t – одиниця часу, для якого визначається ймовірність появи m відмов; T_{0pL} – середній час безвідмовної роботи лінійних споруд ВОЛЗ довжиною L (км), год.

На підставі цього рівняння можливо обчислити ймовірність появи пошкоджень у лінійних спорудах ВОЛЗ будь-якого числа відмов від $m = 0$ до $m = \infty$ – для значення відносного часу t/T_{0pL} .

Біноміальної розподіл – це розподіл ймовірностей можливих чисел появи події A при n незалежних випробуваннях, в кожному з яких подія A може здійснитися з однією і тією ж ймовірністю [172 – 176]:

$$P(A) = p = \text{const}, \quad (5.19)$$

де $P(A)$ – розподіл ймовірності можливих чисел появи події A при n незалежних випробуваннях; p – однакова ймовірність появи події A в незалежному випробуванні.

Крім числа подій A може статися також, що число протилежних подій (ймовірність яких P) визначається за виразом:

$$(\bar{A}) = 1 - p = q, \quad (5.20)$$

де $\bar{A}$ – число протилежних подій числу подій A ; p – ймовірність подій A ; q – ймовірність подій $\bar{A}$ та подій A , протилежних події $\bar{A}$.

Ймовірності будь-якого числа подій A , протилежних події $\bar{A}$, відповідають сумі членів розкладання бінома Ньютона в ступені, пов'язаному з числом випробувань [172 – 176]:

$$(p + q)^n = p^n + np^{n-1}q + \frac{n(n-1)}{1-2} p^{n-1}q^2 + \dots + \\ + + c_n^m p^m q^{n-m} + \dots + npq^{n-1} + q^n, \quad (5.21)$$

де p^n – ймовірність того, що при n випробуваннях подія A настане n раз; q^n – ймовірність того, що при n випробуваннях подія A не наступить жодного разу; $C_n^m p^m q^{n-m}$ – ймовірність того, що при n випробуваннях подія A настане m раз,

а подія $\bar{A}$ настане $n - m$ раз; C_n^m – число сполучень (комбінацій) появи події A і $\bar{A}$ [176].

Геометричний закон розподілу. Послідовно проводиться кілька незалежних випробувань до появи деякої події A , ймовірність якої в кожному випробуванні одна і та ж і дорівнює p .

Тоді число X проведених випробувань є дискретна випадкова величина з геометричним розподілом ймовірності. Прикладом може служити стрілянина до певної мети (першого попадання), причому ймовірність попадання при кожному пострілі не залежить від результатів попередніх пострілів і зберігає постійне значення p . Число X проведених пострілів буде випадковою величиною, можливі значення якої є всі натуральні числа. Геометричний закон розподілу випробувань визначається за виразом [176]:

$$P\{X = k\} = q^{k-1} p, \quad (5.22)$$

де $P\{X = k\}$ – геометричний закон розподілу випробувань; k – кількість проведених випробувань до появи деякої події, $k = 1, 2, \dots$; $q = 1 - p$ – ймовірність числа протилежних подій $\bar{A}$.

Характеристична функція геометричного закону розподілу випробувань задається виразом [172 – 176]:

$$\frac{p}{q} \sum_{k=1}^{\infty} (q \cdot s)^k = \frac{p \cdot s}{1 - q \cdot s}, \quad (5.23)$$

де $\frac{p}{q} \sum_{k=1}^{\infty} (q \cdot s)^k$ – характеристична функція геометричного закону розподілу випробувань; p – ймовірність появи події A ; q – ймовірність появи протилежної події $\bar{A}$; s – параметр, що використовується в генератрисній функції; k – кількість проведених випробувань до появи деякої події; i – номер події.

Основні характеристики геометричного закону розподілу подій задається виразами [176]:

$$M(X) = \frac{1}{p}; \quad D(X) = \frac{q}{p^2}, \quad (5.24)$$

де $M(X)$ – математичне очікування; p – ймовірність появи події A ; $D(X)$ – дисперсія появи події; q – ймовірність появи протилежної події $\bar{A}$

Гіпергеометричний закон розподілу. Випадкова величина X має гіпергеометричний розподіл з параметрами n_1, n_2 і $n \leq n_1 + n_2$ (n, n_1, n_2 – натуральні числа), якщо вона приймає кінцеву безліч натуральних значень $\{k_1, k_1 + 1, \dots, k_2\}$ відповідно з можливостями [176]:

$$P\{X = k\} = \frac{C_{n_1}^k C_{n_2}^{n-k}}{C_{n_1+n_2}^n}, \quad k_1 \leq k \leq k_2, \quad (5.25)$$

де $P\{X = k\}$ – гіпергеометричний закон розподілу подій випробувань; k_i – кількість проведених випробувань до появи деякої події ($k_1 = \max\{0, n-n_2\}$; $k_2 = \min\{n_1, n\}$); n, n_1, n_2 – натуральні числа; C_n^k – число сполучень (комбінацій) появи подій A і $\bar{A}$.

Цей розподіл описує здійснення ознаки у вибірці без повернення (на відміну від біноміального розподілу). На практиці до гіпергеометричного розподілу приводять завдання, де елементи лінійних споруд ВОЛЗ з партії відбирають випадково (забезпечуючи для кожного виробу рівну можливість бути відібраним), але відібрані вироби не повертають в партію. Такий відбір особливо важливий в тих завданнях, де перевірка елемента пов'язана з його руйнуванням (наприклад, перевірка виробу на термін служби).

5.2.2 Закони розподілу неперервних випадкових величин

Експоненціальний закон розподілу. Експоненціальний закон в теорії надійності знайшов широке застосування, так як ймовірність безвідмовної роботи елемента лінійних споруд ВОЛЗ (ОК, муфти і т.п.) залежить тільки від тривалості інтервалу і не залежить від часу попередньої роботи [172 – 176].

Функція надійності при експоненціальному законі описується виразом [4]:

$$P(t) = e^{-\lambda \cdot t}, \quad (5.26)$$

де $P(t)$ – функція надійності при експоненціальному законі розподілу; λ –

кількість відмов в інтервалі часу; t – тривалість інтервалу часу.

Щільність розподілу відмов визначається за виразом [4]:

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t}, \quad (5.27)$$

де $f(t)$ – щільність розподілу відмов на інтервал часу; λ – кількість відмов в інтервалі часу; t – тривалість інтервалу часу.

Інтенсивність відмов визначається за виразом [4]:

$$\lambda(t) = \text{const}, \quad (5.28)$$

де $\lambda(t)$ – інтенсивність відмов на інтервалі часу.

Графіки зміни показників надійності ($P(t)$, $f(t)$, $\Lambda(t)$) при експоненціальному законі розподілу відмов у часі наведені на рис. 5.5.

Експоненціальний розподіл відмов описує напрацювання на відмову тих елементів лінійних споруд ВОЛЗ, у яких в результаті здавальних випробувань (вихідного контролю) відсутній період припрацювання, а призначений ресурс встановлений до закінчення періоду нормальної експлуатації.

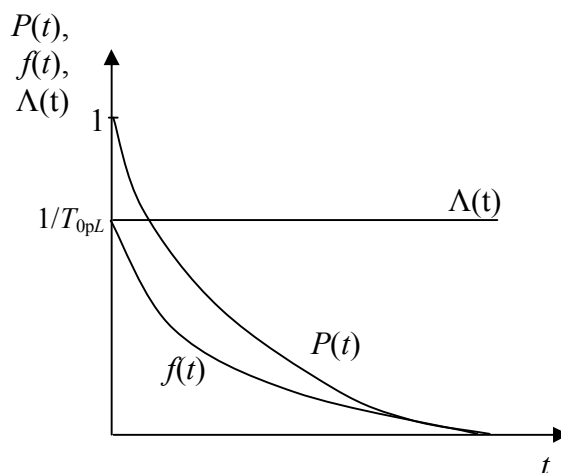


Рисунок 5.5 – Графіки зміни показників надійності ($P(t)$, $f(t)$, $\Lambda(t)$) при експоненціальному законі розподілу відмов у часі

Нормальний закон розподілу. Використовується при відмовах внаслідок зносу та старіння складових лінійних споруд ВОЛЗ [172 – 176].

Функція надійності при нормальному законі розподілу визначається [176]:

$$P(t) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_t}} \int_0^t e^{\left[-\frac{(t-m_t)^2}{2\sigma_t^2}\right]} dt, \quad (5.29)$$

де $P(t)$ – функція надійності при нормальному законі розподілу; σ_t – середнє квадратичне відхилення випадкової величини x в інтервалі часу; t – тривалість інтервалу часу; m – математичне очікування випадкової величини x .

Функція щільності розподілу відмов при цьому законі визначається [176]:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_t}} e^{-\frac{(x-m_t)^2}{2\sigma_t^2}} = N(m_t; \sigma_t^2), \quad (5.30)$$

де $f(x)$ – функція щільності розподілу при нормальному законі; m_t , σ_t – відповідно математичне очікування і середньоквадратичне відхилення випадкової величини x ; N – функція щільності розподілу в залежності від m_t і σ_t^2 ; t – тривалість інтервалу часу.

Щільність розподілу відмов може бути визначена також за виразом [176]:

$$f(x) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x}} \int_0^t e^{\left[-\frac{(x-m_t)^2}{2\sigma_x^2}\right]} dx, \quad (5.31)$$

де $f(x)$ – щільність розподілу відмов при нормальному законі; σ_x – середньоквадратичне відхилення випадкової величини x ; m_t – математичне очікування випадкової величини x ; t – тривалість інтервалу часу.

Інтенсивність відмов на інтервалі часу може бути визначена за виразом [4]:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}, \quad (5.32)$$

де $\lambda(t)$ – інтенсивність відмов на інтервалі часу t ; $f(t)$ – функція щільності розподілу відмов; $P(t)$ – функція надійності розподілу відмов в інтервалі часу.

Графіки зміни показників надійності ($P(t)$, $f(t)$, $\Lambda(t)$) при нормальному законі розподілу відмов у часі наведені на рис. 5.6.

Закон розподілу Вейбулла. Використовується [176] при описі терміну служби складових лінійних споруд ВОЛЗ, а також характеристик довговічності усіх складових ВОСП.

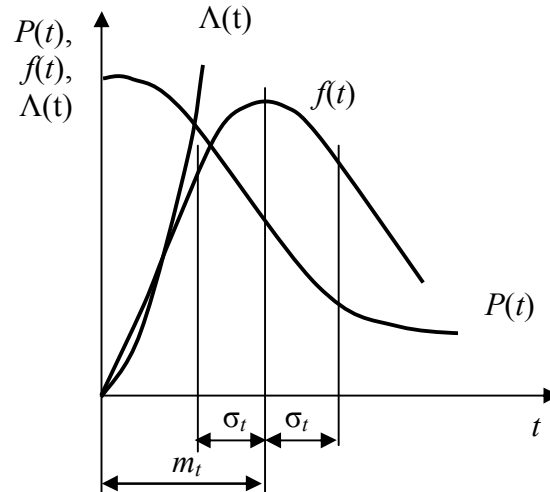


Рисунок 5.6 – Графіки зміни показників надійності ($P(t)$, $f(t)$, $\Lambda(t)$) при нормальному законі розподілу відмов у часі

Функція надійності при цьому законі розподілу відмов визначається [176]:

$$P(t) = \int_0^t e^{-\lambda(t)} dt = e^{-\lambda t^\delta}, \quad (5.33)$$

де $P(t)$ – функція надійності при законі розподілу Вейбулла; $\lambda(t)$ – кількість відмов на інтервалі часу t ; t – тривалість інтервалу часу; δ – число інтервалів часу.

Щільність розподілу відмов при цьому законі визначається за виразом [4]:

$$f(t) = \lambda \cdot \delta \cdot t^{\delta-1} e^{-\lambda t^\delta}, \quad (5.34)$$

де $f(t)$ – щільність розподілу відмов в інтервалі часу; $\lambda(t)$ – кількість відмов на інтервалі часу; δ – число інтервалів часу; t – тривалість інтервалу часу.

Інтенсивність відмов на інтервалі часу визначається за виразом [176]:

$$\lambda(t) = \lambda \cdot \delta \cdot t^{\delta-1}, \quad (5.35)$$

де $\lambda(t)$ – інтенсивність відмов на інтервалах часу t ; λ – кількість відмов; δ – число інтервалів часу; t – тривалість інтервалу часу.

Графіки зміни показників надійності ($P(t)$, $f(t)$, $\Lambda(t)$) при різних значеннях δ для даного закону приведені на рис. 5.7.

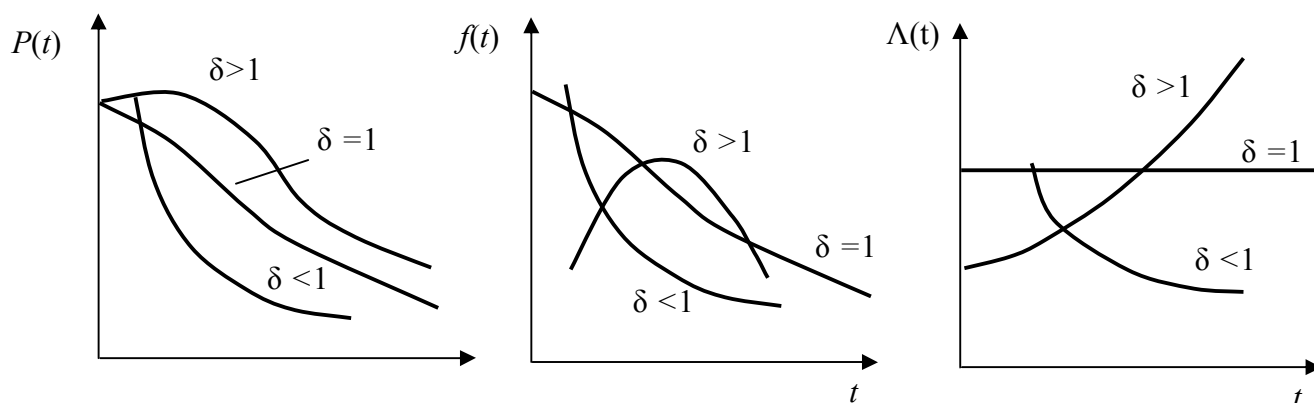


Рисунок 5.7 – Графіки зміни показників надійності при законі розподілу Вейбулла ($P(t)$, $f(t)$, $\Lambda(t)$) для різних значень δ

5.3 Критерії згоди

Однією з важливих задач при оцінці показників надійності складових лінійних споруд ВОЛЗ або ВОСП у цілому є визначення закону розподілу випадкової величини. Відомо багато статистичних критеріїв для перевірки гіпотези про тип закону розподілу відмов [177 – 179].

Для малої вибірки розроблені спеціальні критерії відповідні певним законам розподілу, які володіють найбільшою потужністю. До них відносяться критерій Шапіро і Уїлкі W для нормального закону розподілу, критерій Бартлетта B_r для експоненціального розподілу і критерій Манна S для розподілу Вейбулла, який найбільш часто використовується в теорії надійності. У зв'язку з тим, що при аналізі малої вибірки великого значення набуває чітке уявлення про фізичні причини відмови обладнання. Нагадаємо, що нормальний закон розподілу характеризує зносові відмови при процесі старіння. Закон розподілу Вейбулла використовується при припрацювальних, втомних і раптових відмовах, а експоненціальний закон – раптових відмовах. Імітаційне моделювання різних законів розподілу показує, що вибірки з одними і тими ж середніми можуть привести до значних розбіжностей шуканих величин, особливо, в крайніх значеннях розподілів, необхідних для об'єктивного оцінювання показників надійності.

Критерій згоди Пірсона (χ^2) застосовують для перевірки гіпотези про відповідність емпіричного розподілу передбачуваному теоретичному розподілу $F(x)$ за великим обсягом вибірки ($n \geq 100$). Він застосовується для різних видів функції $F(x)$, навіть за невідомих значень їх параметрів, що має місце при аналізі результатів механічних випробувань. У цьому є його універсальність [177].

Використання критерію χ^2 передбачає розбиття розмаху варіювання вибірки на інтервали і визначення числа спостережень (частоті) n_i для кожного з e інтервалів. Для зручності оцінок параметрів розподілу інтервали вибирають однакової довжини. Число інтервалів залежить від обсягу вибірки. Зазвичай приймають: при $n = 100$ $e = 10 \dots 15$, при $n = 200$ $e = 15 \dots 20$, при $n = 400$ $e = 25 \dots 30$, при $n = 1000$ $e = 35 \dots 40$. Інтервали, що містять менше п'яти спостережень, об'єднують з сусідніми. Однак, якщо число таких інтервалів становить менше 20 % від їх загальної кількості, допускаються інтервали з частістю $n_i \geq 2$.

Критерій Пірсона χ^2 за статистичними даними визначається як [177]:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^e \frac{(n_i - n \cdot p_i)^2}{n \cdot p_i}, \quad (5.37)$$

де χ^2 – критерій Пірсона за експериментальними статистичними даними; e – число інтервалів випробувань; i – номер інтервалу; n_i – число спостережень (частість для кожного інтервалу); n – число спостережень в залежності від об'єму вибірки; p_i – імовірність потрапляння досліджуваної випадкової величини в i -й інтервал, що обчислюється відповідно за гіпотетичним законом розподілу $F(x)$.

При обчисленні ймовірності p_i потрібно мати на увазі, що ліва межа першого інтервалу і права останнього повинні збігатися з межами області можливих значень випадкової величини. Наприклад, при нормальному розподілі перший інтервал простягається до мінус ∞ , а останній – до $+\infty$.

Нульову гіпотезу про відповідність вибіркового розподілу відмов теоретичному закону $F(x)$ перевіряють шляхом порівняння обчисленої за формулою (5.37) величини з критичним значенням χ_a^2 .

Для визначення ймовірності потрапляння досліджуваної випадкової величини в i -й інтервал p_i , наприклад, для нормального закону розподілу необхідно використовувати такі вирази [176 – 179]:

$$\begin{aligned} x_{\text{сеп}} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^e x_i \cdot n_i; & S &= \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^e (x_i - x_{\text{сеп}})^2 \cdot n_i}; \\ p_i^* &= \frac{n_i}{n}; & Z_i &= \frac{x_i - x_{\text{сеп}}}{S}; & p_i &= \frac{1}{2} \Phi(Z_i + 1) - \frac{1}{2} \Phi(Z_i), \end{aligned} \quad (5.38)$$

де $x_{\text{сеп}}$ – середнє арифметичне значення кількості відмов в усіх випробувальних циклах; n – загальне число відмов у вибірці; i – номер інтервалу; x_i – значення подій (відмов), що трапилося n_i разів; S – середньоквадратичне відхилення (виправлена вибіркова дисперсія); e – число інтервалів спостереження; p_i^* – частість відмов у i -му інтервалі; Z_i – аргумент функції Лапласа; p_i – теоретична ймовірність відмови в i -му інтервалі; $\Phi(Z_i)$ – функція Лапласа.

При визначенні середньоквадратичного відхилення у виразі (5.38) при малій вибірці необхідно підставляти не загальне число відмов у вибірці N , а $N - 1$ для збільшення інтервалу похибки [176].

Розподіл χ^2 не залежить від закону розподілу випадкової величини, а залежить від числа ступеня свободи [176]:

$$r = k - l, \quad (5.39)$$

де k – число розрядів; l – число зв'язків на частотях n_i .

Для нормального закону розподілу $l = 3$, для показникового закону та закону Пуассона $l = 2$.

Недоліком критерію згоди Пірсона χ^2 є втрата частини первинної інформації, пов'язана з необхідністю групування результатів спостережень в інтервали і об'єднання окремих інтервалів з малим числом спостережень. У зв'язку з цим рекомендується доповнювати перевірку відповідності розподілів за критерієм χ^2 іншими критеріями. Особливо це необхідно при порівняно малому обсязі вибірки ($n \approx 100$).

Критерій згоди Колмогорова (λ). Критерій Колмогорова–Смирнова [176 – 178] застосовують для не згрупованих або згрупованих даних в разі малої

ширини інтервалу. Він базується на розподілі максимального відхилення накопиченої вибірки, зокрема, за виразами:

$$D_n^+ = \max_{1 \leq i \leq n} \left[\frac{i}{n} - F(x_i) \right]; \quad (5.40)$$

де D_n^+ – плюсове максимальне відхилення значення в накопиченій вибірці; n , i – максимальне і мінімальне значення обсягів вибірки, відповідно; $F(x_i)$ – i -те значення функції розподілу.

Розподіл від’ємного максимального відхилення значення в накопиченій вибірці знаходиться за виразом:

$$D_n^- = \max_{1 \leq i \leq n} \left[F(x_i) - \frac{i-1}{n} \right]; \quad (5.41)$$

де D_n^- – від’ємне максимальне відхилення значення в накопиченій вибірці; $F(x_i)$ – i -те значення функції розподілу; n , i – максимальне і мінімальне значення обсягів вибірки, відповідно.

Максимальне відхилення значення в накопиченій вибірці в усьому інтервалі досліджень визначається за виразом:

$$D_n = \max [D_n^+; D_n^-], \quad (5.42)$$

де D_n – максимальне відхилення значення в накопиченій вибірці в усьому інтервалі досліджень; D_n^+ , D_n^- – плюсове, мінусове відхилення значення в накопиченій вибірці, відповідно.

Якщо виконується нерівність $1 \leq i \leq n$, то критерій згоди Колмогорова представляється у виді при $n > 35$:

$$D_n (\sqrt{n}) \leq \lambda_a, \quad (5.43)$$

де D_n – максимальне відхилення в накопиченій вибірці в усьому інтервалі; n – мінімальне значення обсягів вибірки; λ_a – критерій згоди Колмогорова.

Для невеликих обсягів вибірки ($n < 35$), критерій згоди Колмогорова представляється у виді [176]:

$$D_n(\sqrt{n} + 0,12 + \frac{0,11}{\sqrt{n}}) \leq \lambda_a, \quad (5.44)$$

де D_n – максимальне відхилення в накопиченій вибірці в усьому інтервалі; n – мінімальне значення обсягів вибірки; λ_a – критерій згоди Колмогорова.

Якщо перевіряють гіпотезу про відповідність вибірки експоненціальному закону розподілу, параметр якого по достовірним статистичним даним (D_n^+, D_n^-, D_n) визначають за виразами [176]:

$$D_n^+ = \max_{1 \leq i \leq n} \left[\frac{i}{n} - 1 + \exp\left(-\frac{x_i}{x_{\text{сеп}}}\right) \right], \quad (5.45)$$

де D_n^+ – плюсове максимальне відхилення значення в накопиченій вибірці; i, n – максимальне і мінімальне значення обсягів вибірки; $x_i, x_{\text{сеп}}$ – i -те та середнє значення контрольованого параметра складової лінійних споруд ВОЛЗ, відповідно;

$$D_n^- = \max_{1 \leq i \leq n} \left[1 - \exp\left(-\frac{x_i}{x_{\text{сеп}}}\right) - \frac{i-1}{n} \right], \quad (5.46)$$

де D_n^- – від'ємне максимальне відхилення значення в накопиченій вибірці; $x_i, x_{\text{сеп}}$ – i -те та середнє значення контрольованого параметра складової лінійних споруд ВОЛЗ, відповідно; i, n – максимальне і мінімальне значення обсягів вибірки, відповідно;

$$D_n = \max [D_n^+; D_n^-], \quad (5.47)$$

де D_n – максимальне відхилення в накопиченій вибірці в усьому інтервалі досліджень; D_n^+, D_n^- – плюсове, мінусове максимальні відхилення значення в накопиченій вибірці, відповідно.

При цьому, критерій згоди Колмогорова-Смирнова буде виражатися за виразом [176]:

$$(D_n - \frac{0,2}{n})(\sqrt{n} - 0,26 + \frac{0,5}{\sqrt{n}}) \leq \lambda_a, \quad (5.48)$$

де D_n – максимальне відхилення в накопиченій вибірці в усьому інтервалі

досліджень; n – мінімальне значення обсягів вибірки; λ_a – критерій згоди Колмогорова-Смирнова.

Основна умова використання критерію Колмогорова – досить велике число спостережень.

Вирівнювання фактичного розподілу значень контрольованого параметра по кривій при нормальному законі розподілу складається з кількох етапів:

1. Порівнюють фактичні і теоретичні частоти значень параметра.
2. За фактичними даними визначають теоретичні частоти кривої нормального розподілу при нормованому законі розподілу, яка є функцією нормованого відхилення.
3. Перевіряють на скільки розподіл ознаки відповідає нормальному.

Критерій Шаніро-Уїлкі W. Цей критерій [177] можливо застосувати при $8 \leq n \leq 50$. Малі вибірки з $n < 8$ при виявленні відхилень від нормального розподілу не дають достовірних результатів.

Критерій заснований на регресійному аналізі порядкових статистик по їх очікуваним значенням. Цей критерій типу дисперсійного аналізу для повної вибірки. Статистика критерія – відношення квадрата суми лінійної різниці вибірових порядкових статистик до звичайної оцінки дисперсії.

Критерій заснований на впорядкованих спостереженнях. Якщо серію з n незалежних спостережень, розташовану в порядку не спадання позначити символами $x_1, x_2, \dots, x_n$, то обчислюють проміжну суму S по виразу [177]:

$$S = \sum a_k [x_{(n+1-k)} - x_k], \quad (5.49)$$

де S – проміжна сума спеціальних значень для обсягу вибірки n ; a_k – коефіцієнт, який має спеціальні значення для обсягу вибірки n ; $x_{(n+1-k)}$, x_k – символ позначення серії з n незалежних спостережень, розташованих в порядку неспадання; k – індекс, що має значення від 1 до $n/2$ або від 1 до $(n-1)/2$ при парному і непарному n , відповідно [177].

В цьому випадку статистичне значення критерію W визначається у вигляді:

$$W = S^2 / (n \cdot m_2), \quad (5.50)$$

де W – статистичне значення критерію Шапіро-Уілкі; S – проміжна сума спеціальних значень для обсягу вибірки n ; n – обсяг вибірки; m_2 – вибірковий центральний момент другого порядку; $n \cdot m_2 = \sum (x_i - x_{\text{сер}})^2$; x_i , $x_{\text{сер}}$ – i -те та середнє значення контрольованого параметра складових лінійних споруд ВОЛЗ.

Якщо значення деяких спостережень рівні, впорядкована серія нумерується з повторенням рівних спостережень стільки раз, скільки вони виникають у вихідній серії.

Критерій Манна-Уїтні. U -критерій Манна-Уїтні [177] використовується для оцінки відмінностей між двома малими вибірками ($n_1, n_2 \geq 3$ або $n_1 = 2, n_2 \geq 5$) за рівнем кількісно-вимірюваної ознаки. При цьому першою вибіркою прийнято вважати ту, де значення ознаки більше [177].

Нульова гіпотеза $H_0 = \{\text{рівень ознаки в другій вибірці не нижче рівня ознаки в першій вибірці}\}$; альтернативна гіпотеза – $H_1 = \{\text{рівень ознаки в другій вибірці нижче рівня ознаки в першій вибірці}\}$.

Критерій Бартлетта B_r [177] є найбільш потужним в порівнянні з іншими існуючими критеріями для виявлення зростаючої чи спадаючої інтенсивності відмов. Він визначається за виразом [177]:

$$B_r = \frac{2r \left[\ln\left(\frac{t_r}{r}\right) + \frac{1}{r} \left(\sum_{i=1}^r \ln x_i \right) \right]}{1 + (r+1) / 6r}, \quad (5.51)$$

де B_r – критерій Бартлетта; r – число відмов, t_r – сума значень випадкових

величин, що позначає напрацювання на відмову, $t_r = \sum_{i=1}^r x_i$; x_i – випадкова

величина, що позначає напрацювання до відмови.

При допущенні розподілу по експоненціальному закону розподіл статистичних значень B_r має розподіл χ^2 з $(r-1)$ ступенями свободи, і в даному випадку має двосторонній критерій χ^2 [177].

5.4 Визначення закону розподілу пошкоджень лінійних споруд ВОЛЗ транспортної електронної комунікаційної мережі зв'язку

Як відмічалось у розділах 1 та 3 лінійні споруди ВОЛЗ представляють собою цілий комплекс активних та пасивних технічних пристроїв (оптичних кабелів, муфт, рознімних з'єднувачів, лінійне та захисне обладнання, тощо). Сумісне об'єднання яких входить до складу ВОСП.

Життєвий цикл ВОЛЗ, як окремого об'єкта, згідно з [4, 23] складається, в першу чергу, з етапів планування (висування концепції), проєктування (включаючи розробку, виробництво дослідного зразка елемента лінії, його пробні та сертифікаційні випробування), виробництва елементів і її будівництва та технічної експлуатації.

Забезпечення тривалої безперервної, якісної та надійної роботи ВОЛЗ на ТЕКМ зв'язку та на мережі абонентського доступу можливе за рахунок створення та використання технічних пристроїв з відповідним рівнем показників надійності.

Безвідмовність роботи лінійних споруд ВОЛЗ можливо забезпечити, зокрема, шляхом досліджень причини, характеру та тривалості відмов зв'язку на етапі технічної експлуатації та створення зворотного зв'язку на попередні етапи. Це – проєктування, виробництва компонентів та її будівництва – з метою оптимальної корекції параметрів відповідних компонентів і процесів та одержанні більш адекватних результатів. Це потребує, в першу чергу, обробки статистичних даних про відмови (з перервою або без перерви) зв'язку, кількість яких є дискретною випадковою величиною та визначення закону їх розподілу. Це дасть змогу прогнозувати кількість пошкоджень лінії при певній довірчій ймовірності в майбутньому. Після відповідної обробки цих даних отримують статистичний (варіаційний) ряд розподілу пошкоджень лінійних споруд ВОЛЗ, який можна представити графічно у вигляді полігону частот або багатокутнику розподілу випадкової величини. Виходячи з виду полігону частот вибирається апроксимуюча функція, яка відповідає певному

теоретичному закону розподілу випадкової величини [172 – 177]. Відповідність гіпотетичного (емпіричного) закону розподілу певному теоретичному закону перевіряється за допомогою критеріїв згоди. На сьогодні відомо багато законів розподілу дискретних та неперервних випадкових величин, проте всі вони в граничному випадку наближаються до нормального закону розподілу [176]. Проте, наразі відсутні в повній мірі наукові дослідження щодо встановлення закону розподілу пошкоджень мереж зв'язку країни, які дозволили б визначати кількісні показники надійності, ймовірність появи перерви зв'язку фрагменту мережі ВОЛЗ, тощо.

Тому метою даного підрозділу є визначення закону розподілу пошкоджень на ТЕКМ зв'язку в різних кліматичних районах – в Закарпатській (гірський), Донецькій (рівнинний) та Одеській (причорноморський) областях за роками експлуатації.

В цьому підрозділі передбачається, використовуючи наявні статистичні дані про кількість пошкоджень ВОЛЗ ТЕКМ зв'язку в певній адміністративній області країни, визначити закон розподілу за роками експлуатації ТЕКМ зв'язку за 13-річний період. Тоді, при наявності пошкоджень в кожному році експлуатації лінійних споруд ВОЛЗ об'єм вибірки буде становити 13. В якості прикладу визначено закон розподілу кількості пошкоджень лінійних споруд ВОЛЗ в цих областях. Вони охоплюють усі кліматичні райони країни. В табл. 5.1 подано розподіл кількості пошкоджень лінійних споруд ВОЛЗ областей за період спостережень [180], а в табл. 5.2 – відповідні статистичні ряди кількості пошкоджень лінійних споруд та їх відносна частість. На рис. 5.8 показано полігон частостей розподілу кількості пошкоджень лінійних споруд ВОЛЗ вказаних областей.

З рис. 5.8 видно, що отримані полігони відносних частостей розподілу кількості пошкоджень оптичних кабелів ВОЛЗ ТЕКМ зв'язку в цих областях, що є дискретними величинами, можуть відповідати теоретичному закону розподілу Пуассона. Закон Пуассона застосовується для моделювання випадкових відмов, що відбуваються незалежно одна від одної з постійною ймовірністю на одиницю

часу (рік), тобто без урахування впливу старіння елементів. Оскільки лінійні споруди ВОЛЗ на етапі тривалої технічної експлуатації характеризуються постійною інтенсивністю відмов, то такий підхід є прийнятним лише для випадкових пошкоджень. Крім того, такі пошкодження можуть бути зумовлені як відмовами самих компонентів лінійних споруд ВОЛЗ так і зовнішніми впливовими факторами (зловмисні пошкодження, удари блискавки, зсув ґрунту, тощо).

Для перевірки відповідності гіпотетичного закону розподілу теоретичному використаємо критерій Пірсона χ^2 . Для цього визначимо середню інтенсивність появи пошкодження лінійних споруд ВОЛЗ за виразом [177]:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^e (x_i \cdot n_i)}{\sum_{i=1}^e n_i}, \quad (5.52)$$

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.

За виразом (5.52) середні інтенсивності появи пошкодження лінійних споруд ВОЛЗ в досліджуваних областях будуть дорівнювати для Закарпатської області:

$$a = \frac{0 \cdot 3 + 1 \cdot 3 + 2 \cdot 5 + 3 \cdot 1 + 4 \cdot 1}{13} = \frac{20}{13} = 1,54.$$

Для Донецької та Одеської областей будуть складати 2,46 та 2,85, відповідно.

Використовуючи вираз (5.16) та отримані значення інтенсивності появи пошкодження ВОЛЗ за виразом (5.52) виконано розрахунок ймовірностей розподілу кількості пошкоджень лінійних споруд ВОЛЗ. Ці результати розрахунку для Закарпатської (гірський район) області зведемо в табл. 5.3.

Таблиця 5.1 – Розподіл кількості пошкоджень лінійних споруд ВОЛЗ трьох областей за 13 років

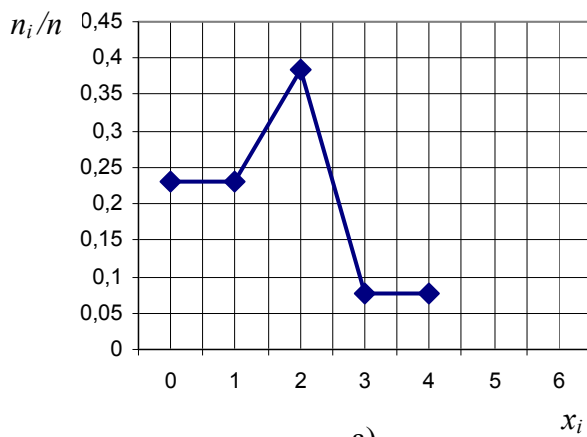
Кількість пошкоджень за роками спостережень														Загальна кількість пошкод- жень
Область	Роки спостережень													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
Закар- патська	1	0	0	2	1	2	2	0	2	4	2	1	3	20
Донецька	1	1	0	1	2	2	5	3	4	3	3	3	4	32
Одеська	1	1	2	2	1	4	2	6	6	5	3	1	3	37

Таблиця 5.2 – Статистичний ряд розподілу кількості пошкоджень лінійних споруд ВОЛЗ по областях та його характеристики за 2001...2013 роки

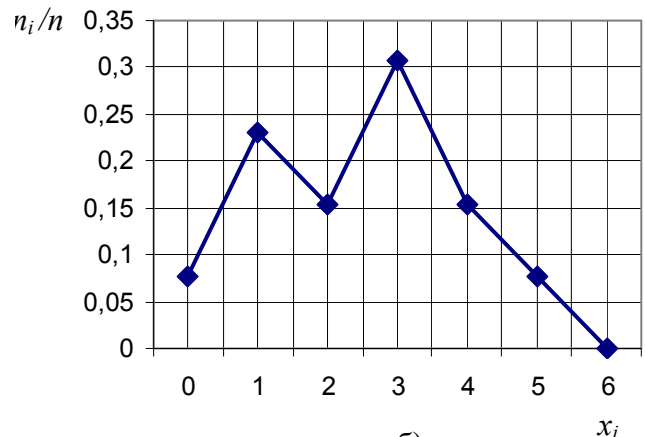
Статистичні ряди кількості пошкоджень ВОЛЗ по областях України							
Закарпатська область							
Характеристики	Значення характеристик					Суми характеристик	
Значення кількості пошкоджень ВОЛЗ, x_i	0	1	2	3	4	—	
Частість пошкоджень лінійних споруд, n_i	3	3	5	1	1	13	
Відносна частість пошкоджень лінійних споруд, n_i/n	0,23	0,23	0,38	0,08	0,08	1	
Донецька область							
Характеристики	Значення характеристик					Суми характеристик	
Значення кількості пошкоджень ВОЛЗ, x_i	0	1	2	3	4	5	—
Частість пошкоджень лінійних споруд, n_i	1	3	2	4	2	1	13

Закінчення табл. 5.2

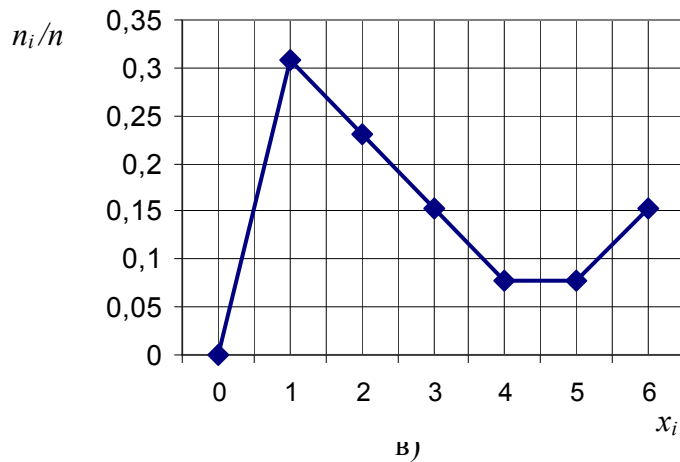
Відносна частість пошкоджень лінійних споруд, n_i/n	0,08	0,23	0,15	0,31	0,15	0,08	1
Одеська область							
Характеристики	Значення характеристик						Суми характеристик
Значення кількості пошкоджень ВОЛЗ, x_i	1	2	3	4	5	6	–
Частість пошкоджень лінійних споруд, n_i	4	3	2	1	1	2	13
Відносна частість пошкоджень ОК, n_i/n	0,31	0,23	0,15	0,08	0,08	0,15	1



а)



б)



в)

Рисунок 5.8 – Полігони відносних частостей розподілу кількості пошкоджень лінійних споруд ВОЛЗ ТЕКМ зв'язку в Закарпатській (а), Донецькій (б) та Одеській (в) областях

Результати перевірки відповідності розподілу кількості пошкоджень ВОЛЗ закону Пуассона за допомогою критерію Пірсона для цих областей приведені в табл. Г.1 Додатку Г.

Результати порівняння фактичного χ^2 та критичного $\chi^2_{\text{крит}}$ значень квантилей за критерієм Пірсона за цими областями приведено в табл. 5.4.

З таблиці видно, що $\chi^2 < \chi^2_{\text{крит}}$, тому припущення про розподіл кількості пошкоджень підземних лінійних споруд ВОЛЗ ТЕКМ зв'язку в областях, що експлуатувалися за 13-річний період, справедливе при рівні значущості 0,05, тобто підкоряються закону розподілу Пуассона.

На рис. 5.9 показані полігони відносних частот фактичних та багатокутники теоретичних розподілів кількості пошкоджень лінійних споруд ВОЛЗ ТЕКМ зв'язку за законом Пуассона в різних областях при 13-річній експлуатації.

Результати цих теоретичних досліджень показали, що статистичні дослідження відмов лінійних споруд ВОЛЗ цих областей потребують подальшого накопичення з метою визначення закону їх розподілу за більший проміжок часу.

У випадку Пуассонівського закону розподілу кількості пошкоджень лінійних споруд ВОЛЗ визначення точкових оцінок показників надійності ТЕКМ зв'язку можна виконати за виразами з табл. 5.5.

Виконані в даному підрозділі роботи дослідження дозволяють зробити висновки:

1. Обробка статистичних даних за роками про кількість пошкоджень лінійних споруд ВОЛЗ транспортної електронної комунікаційної мережі зв'язку, що експлуатуються 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 $\alpha' = 0,05$.

2. Одержані розподіли ймовірностей появи пошкоджень лінійних споруд ВОЛЗ в цих областях дозволяють визначати частість (ймовірність) виникнення певної кількості відмов та точкові оцінки показників надійності.

Таблиця 5.3 – Результати перевірки відповідності розподілу пошкоджень лінійних споруд ВОЛЗ закону Пуассона за допомогою критерію Пірсона для Закарпатської області

Можливі значення кількості пошкоджень, x_i	Кількість пошкоджень, n_i	Фактична відносна частість появи пошкоджень, n_i/n	Середня інтенсивність появи пошкоджень, a	Теоретична ймовірність появи пошкоджень, p_i	Критерій згоди Пірсона в i -ій події, χ^2
0	3	0,23	1,54	0,215	0,014
1	3	0,23		0,331	0,393
2	5	0,38		0,254	0,148
3	1	0,08		0,13	0,283
4	1	0,08		0,07	0,010
Сума	13	1,00	—	1,00	0,848

Таблиця 5.4 – Результати порівняння фактичного χ^2 та критичного $\chi^2_{\text{крит}}$ значень квантилей за критерієм Пірсона по областях

Область	Результати визначення квантилей за критерієм Пірсона		
	Число ступеня свободи k	Критичне значення квантилі $\chi^2_{\text{крит}}$ при рівні значущості $\alpha' = 0,05$	Фактичне значення квантилі χ^2
Закарпатська	3	7,815	0,848
Донецька	3	7,815	1,824
Одеська	2	5,991	0,714

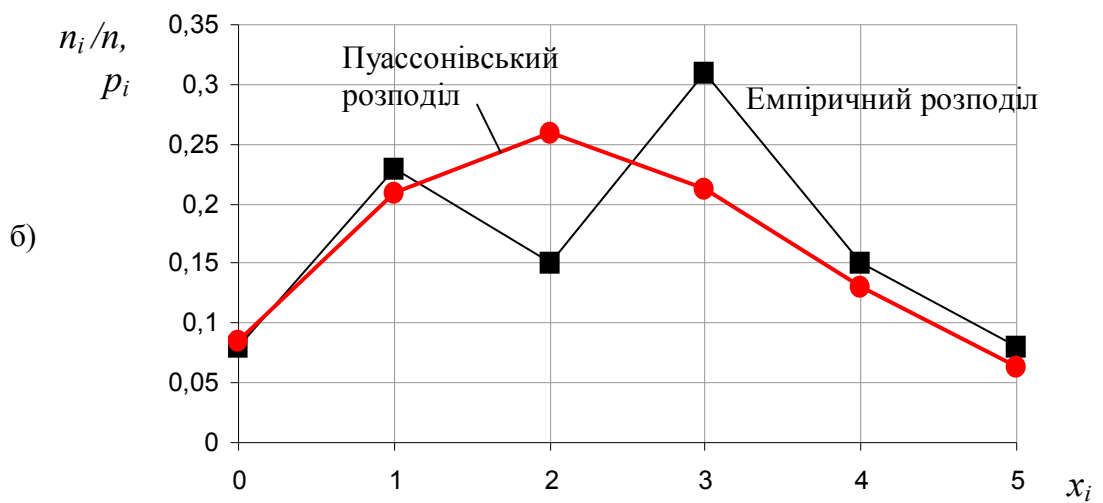
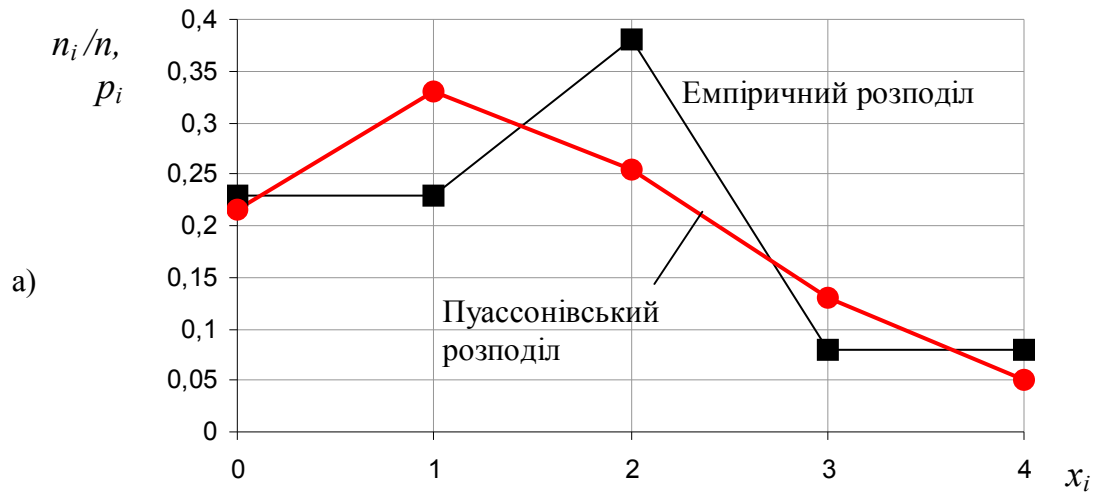


Рисунок 5.9 – Графіки фактичних відносних частотей та теоретичний багатокутник розподілу кількості пошкоджень лінійних споруд ВОЛЗ ТЕКМ зв'язку за законом Пуассона: Закарпатської (а), Донецької (б) та Одеської (в) областей

Таблиця 5.5 – Вирази для визначення точкових оцінок показників надійності у відповідності до Пуассонівського закону розподілу пошкоджень

Інтенсивність пошкоджень	Середній час напрацювання на відмову	Ймовірність безвідмовної роботи	Ймовірність виникнення k відмов протягом часу t	Ймовірність відновлення в заданий час (з урахуванням відновлення)
$\frac{k}{T}$	$\frac{T}{k} = \frac{1}{\lambda_{\text{сер}}}$	$e^{-\lambda_{\text{сер}} t}$	$\frac{(\lambda_{\text{сер}} t)^k}{k!} e^{-\lambda_{\text{сер}} t}$	$1 - e^{-\frac{t}{t_{\text{в}}}}$
Примітка: k – кількість зареєстрованих відмов; T – сумарний час спостереження; $\lambda_{\text{сер}}$ – середня інтенсивність відмов; t – заданий момент часу; $t_{\text{в}}$ – час відновлення. Позначення прийняті згідно до [7].				

5.5 Контроль технічного стану лінійних споруд ВОЛЗ за якістю та безвідмовністю роботи в різних кліматичних районах

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, в першу чергу, постійного та тривалого збору, обробки статистичних даних про їх відмови, часу напрацювання на відмову та коефіцієнту готовності лінії, визначення законів розподілу характеристик надійності з метою подальшого контролю роботи лінії в початковий час її нормальної роботи. Початковий час нормального режиму роботи ВОЛЗ має термін від 1 до 5 років.

Статистичні дані пошкоджень повинні піддаватися ретельному аналізу як з інженерної точки зору, так і з визначення характеристик надійності лінійних споруд ВОЛЗ. На практиці експлуатаційними показниками надійності лінійних споруд ВОЛЗ є: щільність відмов, середній час напрацювання на відмову (пошкоджень з перервою) зв'язку, середній час відновлення зв'язку та коефіцієнт готовності лінії.

Тому, метою даного підрозділу є: створення способу контролю якості та безперервності роботи лінійних споруд ВОЛЗ на основі статистичних даних відмов в різних кліматичних районах країни; реалізація способу викликаної необхідності в дослідженні статистичних даних розподілу напрацювань на відмову лінійних споруд ВОЛЗ та розробку методу оцінки ймовірнісних показників надійності лінії при початковому терміні експлуатації.

5.5.1 Дослідження статистичних даних розподілу часу напрацювання на відмову лінійних споруд ВОЛЗ

Як було зазначено в роботах [4, 160, 161] при нормальному режимі експлуатації лінійних споруд ВОЛЗ інтенсивність відмов майже постійна, тобто час напрацювання на відмову підкоряється експоненціальному закону розподілу. Проте в науковій літературі в повній мірі відсутні перевірка відповідності розподілу реальних статистичних даних про час напрацювання на відмову T_{opL} експоненціальному закону та визначення прогнозу ймовірнісних характеристик надійності ліній, що експлуатуються в різних кліматичних районах країни.

Знаючи час появи пошкоджень лінійних споруд ВОЛЗ (ОК, муфт або інших елементів) та їх тривалість можна визначити T_{opL} . Після відповідної обробки цих даних отримують статистичний ряд розподілу їх часу напрацювання на відмову, який можна представити графічно у вигляді гістограми розподілу (для неперервних випадкових величин). Виходячи з виду гістограми розподілу вибирається апроксимуюча функція, яка відповідає певному відомому теоретичному закону розподілу [172 – 177, 184 – 186].

Володіючи датами та точним часом появи пошкоджень лінійних споруд ВОЛЗ в зазначених областях за 13-річний період було визначено час між сусідніми відмовами (пошкодженнями з перервою) зв'язку та середній час напрацювання на відмову (табл. 5.6).

В цій таблиці наведені значення T_{opL} лінійних споруд ВОЛЗ ТЕКМ зв'язку та їх загальна кількість n .

Таблиця 5.6 – Значення часу напрацювання між сусідніми відмовами, год, лінійних споруд ВОЛЗ по областях

Час напрацювання на відмову за роками спостережень, год													Загальна	
Область	Роки спостережень													кількість
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	значень відмов
Закар- патська	1752; 3599; 9764,5; 1581; 3746,6; 7911; 503,5; 7113,4; 937; 2048; 623,5; 1342; 2985; 485; 4102; 612; 8800; 1450; 2650													20
Донецька	13413,5; 2449,7; 1698,25; 9397,2; 3752; 6313,2; 514,5; 4154,6; 1945; 1599,8; 1194; 7439,5; 3203; 6540,25; 657,3; 1802,8; 2213,4; 3548,6; 4912,1; 6197,9; 7388,7; 8641,5; 7996,2; 1497,6; 2893,5; 5631,9; 10114,3; 8702,7; 5128,8; 3924,6; 7485,2													32
Одеська	4176; 6721,2; 5599; 1129,4; 909,6; 2615; 510,75; 1662,5; 953,5; 8252,4; 2306,6; 2923,9; 350,2; 281,25; 1151; 2546,2; 74,9; 1731,8; 535,4; 1131,1; 881; 5710,3; 182,2; 1773,8; 1867,4; 44,8; 293,4; 745,7; 1559,3; 2155,7; 1920,5; 2038,1; 3422,6; 3972,2; 6239,8; 6854,9													37

Так як, T_{0pL} є неперервною випадковою величиною і може приймати різні значення, тому для зменшення обсягу даних для аналізу необхідно виконати групування їх величин в однакові інтервали часу.

Для визначення оптимальної кількості інтервалів при групуванні статистичних даних використано формулу Старджена [176]:

$$k' = 1 + 3,3 \cdot \lg(n), \quad (5.53)$$

де k' – кількість інтервалів групування статистичних даних; n – кількість відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку лінійних споруд ВОЛЗ.

Виходячи з даних табл. 5.1 та виразу (5.53) оптимальна кількість інтервалів для групування значень часу напрацювання на відмову буде дорівнювати для Закарпатської області: $k' = 1 + 3,3 \cdot \lg(20) = 6$ інтервалів.

Розрахунок кількості інтервалів групування статистичних даних для Донецької та Одеської областей також дорівнює 6 інтервалам.

Згідно до [176], ширина інтервалу, виходячи з максимального та мінімального значень часу вибірки, може бути визначена за виразом:

$$h = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{k'}, \quad (5.54)$$

де h – ширина інтервалу обчислення часу, год; $x_{\max}$, $x_{\min}$ – максимальне і мінімальне значення часу вибірки, год; k' – кількість інтервалів.

Час вибірки починаються зі значення 0, а останній інтервал закінчується значенням $x_{\max}$. В табл. 5.7 надані згруповані значення часу напрацювання на відмову з кількістю цих значень, які потрапили в розраховані інтервали, в Закарпатській області.

Таблиця 5.7 – Згруповані значення часу напрацювання на відмову лінійних споруд ВОЛЗ в Закарпатській області

Номер інтервалу	Інтервал часу напрацювання на відмову, $(x_i...x_{i+1})$	Значення часу напрацювання на відмову, що потрапили в інтервал, год	Кількість значень часу напрацювання на відмову, що потрапляють в інтервал, n_i	Відносна частість часу напрацювання на відмову, що потрапляє в інтервал, n_i/n
1	0...1627,4	1581; 503,5; 937; 623,5; 1342; 485; 612; 1450	8	0,421
2	1627,4....3258,8	1752; 2048; 2650; 2985	4	0,211
3	3258,8....4882,2	4102; 3599; 3746,6	3	0,158
4	4882,2...6509,6	–	0	0
5	6509,6...8137,0	7911; 7113,4	2	0,105
6	8137,0...9764,5	8800; 9764,5	2	0,105

Результати групування значень T_{0pL}^n між сусідніми відмовами лінійних споруд ВОЛЗ в Закарпатській області наведені в табл. 5.7, а для інших областей в табл. Г.2, табл. Г.3 Додатку Г. Кожний інтервал для Закарпатської області має ширину, яка дорівнює різниці максимального (9764,5 год) і мінімального (0 год) значень часу напрацювання на відмову поділену на кількість інтервалів, тобто 1627,4 год.

За даними табл. 5.7, табл. Г.2 та табл. Г.3 Додатку Г побудовано гістограми емпіричного розподілу часу напрацювання на відмову лінійних споруд ВОЛЗ в цих областях (рис. 5.10). З цього рисунку видно, що закон емпіричного розподілу часу напрацювання на відмову схожий на експоненціальний закон. Тому перевіримо відповідність розподілу часу напрацювання на відмову експоненціальному закону розподілу, використовуючи критерій Пірсона χ^2 . За ним перевірка зводиться до тесту, що дозволяє оцінити, чи є значуща різниця між статистичними частотами та теоретичними частотами, які отримані за допомогою експоненціального розподілу часу напрацювання на відмову.

На рис. 5.10 крім гістограм емпіричних розподілів приведені графіки теоретичних ймовірностей потрапляння в інтервали часу напрацювання на відмову лінійних споруд ВОЛЗ ТЕКМ зв'язку за експоненціальним законом в різних кліматичних районах. Середнє значення T_{0pL}^n лінійних споруд ВОЛЗ ТЕКМ зв'язку, що експлуатуються в Закарпатській області, визначається за виразом (4.9):

$$T_{0pL}^n = \frac{62005,5}{19} \approx 3263,5 \text{ год.}$$

Використовуючи цю формулу були визначені середні значення T_{0pL}^n , які надали їх значення в Донецькій області – 4914,6 год, а в Одеській області – 2361,4 год.

Маючи на увазі, що час справної роботи кабельної ВОЛЗ значно більший порівняно з загальним часом простою, середнє значення параметра потоку відмов Λ визначається за виразом (4.18). Використовуючи ці значення за

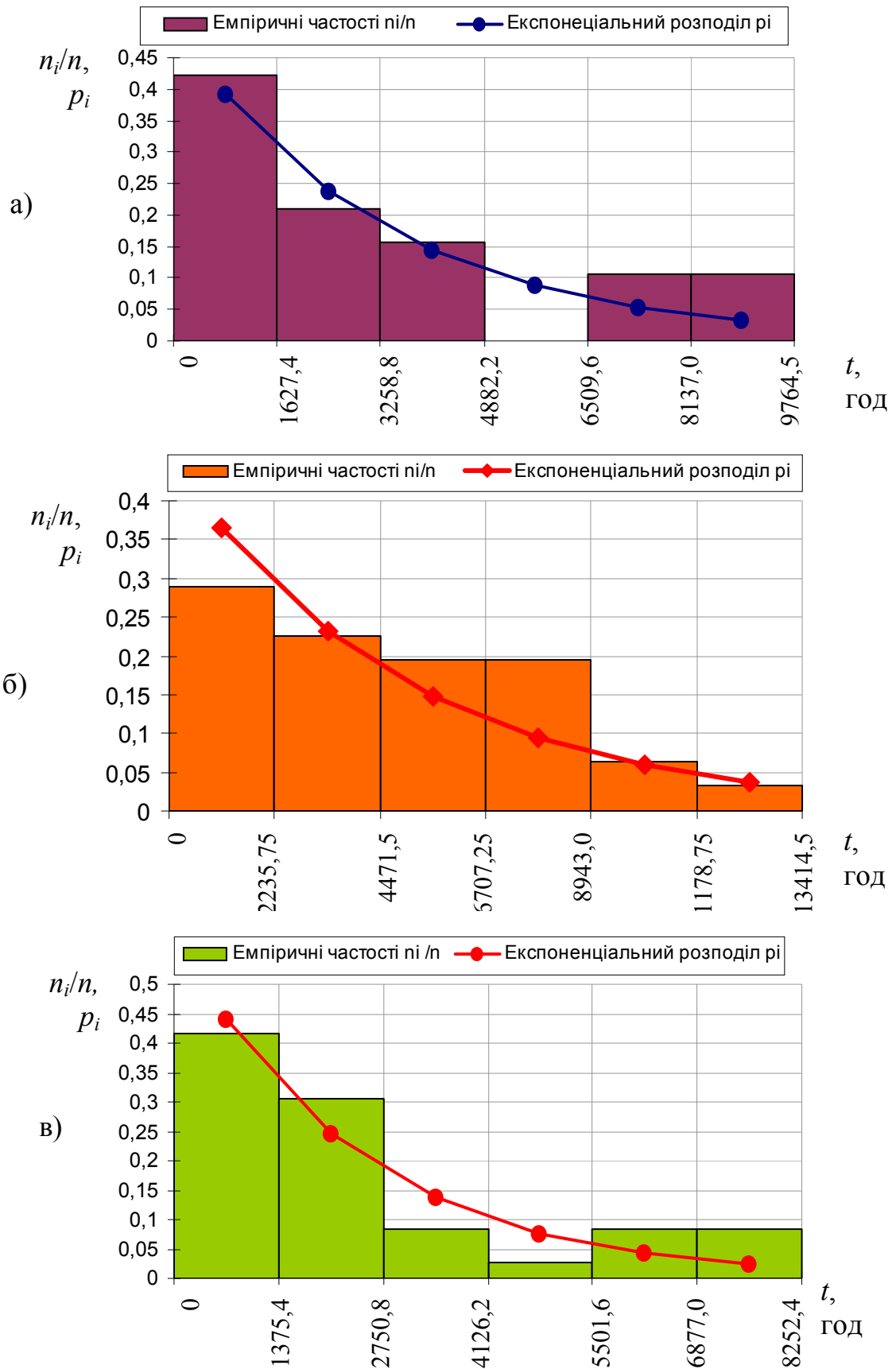


Рисунок 5.10 – Гістограми емпіричних розподілів та графіки теоретичних ймовірностей потрапляння в інтервали T_{0PL}^n лінійних споруд ВОЛЗ в Закарпатській (а), Донецькій (б) та Одеській (в) областях

виразом (4.12) було розраховано ймовірності розподілу часу напрацювання на відмову цих ВОЛЗ.

Таким чином, середнє значення параметра потоку відмов Λ для Закарпатської області буде дорівнювати:

$$\Lambda = \frac{1}{3263,5} = 3,1 \cdot 10^{-4}, \text{ 1/год.}$$

Визначення Λ для областей: Донецької – склало $\Lambda = 2,03 \cdot 10^{-4}$, 1/год, Одеської – $\Lambda = 4,23 \cdot 10^{-4}$, 1/год.

Результати розрахунку p_i для Закарпатської області (гірський кліматичний район) зведено до табл. 5.8.

Результати перевірки відповідності розподілу T_{0pL}^n лінійних споруд ВОЛЗ експоненціальному закону розподілу за допомогою критерію Пірсона для Донецької та Одеської областей приведені в табл. Г.4, табл. Г.5 Додатку Г.

Результати порівняння фактичного χ^2 та критичного $\chi_{\text{крит}}^2$ значень квантилей за критерієм Пірсона при перевірці відповідності емпіричного закону розподілу теоретичному експоненціальному приведено в табл. 5.9. З них видно, що у всіх випадках $\chi^2 < \chi_{\text{крит}}^2$, тому припущення про експоненціальний розподіл часу напрацювання на відмову лінійних споруд ВОЛЗ для цих областей за 13-річний період справедливе при рівні значущості 0,05.

Виконані в даному підрозділі дослідження дозволяють зробити висновки:

1. Обробка статистичних даних за 13 років експлуатації лінійних споруд ВОЛЗ про T_{0pL}^n в усіх кліматичних районах, використовуючи критерій згоди Пірсона, дозволила встановити, що його розподіл підкоряється експоненціальному закону при рівні значущості $\alpha' = 0,05$.

2. Одержані ймовірності розподілів T_{0pL}^n лінійних споруд ВОЛЗ по областям дозволяють визначати ймовірність напрацювання ліній на відмову в межах кліматичного району та визначати ймовірнісні показники надійності.

Таблиця 5.8 – Дані перевірки узгодження емпіричного та теоретичного розподілу T_{0pL}^n лінійних споруд ВОЛЗ

ТЕКМ зв'язку в Закарпатській області за 13-річний період експлуатації

Номер інтер-валу	Інтервал часу напрацювання на відмову, $(x_i...x_{i+1})$	Кількість значень часу напрацювання на відмову, що потрапляють в інтервал, n_i	Відносна частість часу напрацювання на відмову, що потрапляє в інтервал, n_i / n	Теоретична ймовірність:		Теоретична:		Критерій згоди в i -му інтервалі, χ_i^2
				на початку інтервалу, $p(x_i)$	в кінці інтервалу, $p(x_{i+1})$	ймовірність потрапляння в i -ий інтервал, p_i	частість, $n \cdot p_i$	
1	0...1627,4	8	0,421	1,000	0,608	0,392	7,456	0,039
2	1627,4....3258,8	4	0,211	0,608	0,369	0,239	4,540	0,011
3	3258,8....4882,2	3	0,158	0,369	0,224	0,144	2,740	
4	4882,2...6509,6	0	0	0,224	0,136	0,088	1,672	0,146
5	6509,6...8137,0	2	0,105	0,136	0,083	0,053	1,007	
6	8137,0...9764,5	2	0,105	0,083	0,050	0,033	0,627	
–	Сума	19	1,000	–	–	–	–	0,196

Таблиця 5.9 – Результати порівняння фактичного χ^2 та критичного $\chi^2_{\text{крит}}$ значень квантилей за критерієм Пірсона

Область	Результати визначення квантилей за критерієм Пірсона		
	Число ступеня свободи, k	Критичне значення квантилей, $\chi^2_{\text{крит}}$, при рівні значущості $\alpha' = 0,05$	Фактичне значення квантилей, χ^2
Закарпатська	1	3,841	0,196
Донецька	2	5,991	3,269
Одеська	2	5,991	1,990

5.5.2 Розробка методу контролю ймовірнісних показників надійності лінійних споруд ВОЛЗ при початковому терміні експлуатації

Обґрунтування необхідності методу. 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.

Верхня межа цього терміну складає 1/6 частину від нормального часу роботи лінії (30 років).

До експлуатаційних показників надійності ВОЛЗ слід віднести: щільність відмов, середній час напрацювання на відмову, середній час відновлення зв'язку та коефіцієнт готовності. Основою для їх оцінки є статистичні дані кількості відмов у кожному році, початок і кінець часу нормальної роботи між відмовами, час ліквідації пошкодження.

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

Теоретична складова методу. 1. Послідовність вирішення задач з оцінки ймовірнісних показників надійності лінійних споруд ВОЛЗ за вибраний термін експлуатації та кліматичний район їх розташування виражаються у наступному:

1) збору 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 ;
- частоті відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку, n_i ;
- відносної частоті відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку, n_i/n ;

3) визначення за виразом (5.52) середньої інтенсивності появи відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку;

4) на основі порівняння фактичних та теоретичних відносних частот розподілу кількості відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку вибирається гіпотеза закону їх розподілу;

5) визначення 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 виконується за виразами, приведеними в табл. 5.10.

2. Послідовність визначення параметрів оцінки ймовірнісних показників надійності лінійних споруд ВОЛЗ при початковому терміні експлуатації виражається у такому: оцінки значень щільності відмов m_L ; оцінки значень T_{0pL}^n та $t_{счвз}$; оцінки значень K_{rL} ; аналізу результатів оцінки ймовірнісних показників надійності лінійних споруд ВОЛЗ; надання рекомендацій з підвищення якості технічної експлуатації лінійних споруд ВОЛЗ [181 – 186].

Експериментальна складова методу. Дослідження параметрів оцінки ймовірнісних показників надійності лінійних споруд ВОЛЗ проводиться при початковому п'ятирічному терміні їх експлуатації в Одеській області. Для цього використаємо результати перевірки відповідності фактичного розподілу пошкоджень теоретичному,веденому у підрозділі 5.5.1. Згідно цього підрозділу визначеним законом розподілу пошкоджень за 13-річний термін експлуатації лінійних споруд ВОЛЗ є експоненціальний закон. Оскільки в статистичний ряд розподілу відмов за даний термін входить і розподіл відмов за

вибраний початковий термін часу (від 1 по 5) років, то це створює можливість у дослідженні параметрів оцінки ймовірнісних показників надійності за даним законом. Для вказаних досліджень були використані спрощені формули розрахунку експериментальних показників надійності, приведені в табл. 5.10. Тому, для досліджень в експериментальній складовій методу використаємо значення кількості відмов та часу напрацювання між сусідніми відмовами на ВОЛЗ довжиною 200 км за 5 років спостережень, що приведені в табл. 5.11.

В якості прикладу приведемо розрахунки значень: m_L , T_{0pL}^n , $t_{счвз}$, $K_{гЛ}$ за перший рік експлуатації лінійних споруд ВОЛЗ. Таким чином,

$$m_L = \frac{4}{1 \cdot 200} \cdot 100 = 2, \text{ 1/рік};$$

$$T_{0pLi}^n = \frac{5599 + 1129,4 + 909,6 + 2615}{4} = 2563,25, \text{ год};$$

$$t_{счвз} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{bi} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 (7 + 2,83 + 4,3 + 4) = 4,53, \text{ год};$$

$$K_{гЛ} = \frac{T_{0pL}^n}{T_{0pL}^n + t_{счвз}} = \frac{2563,25}{2563,25 + 4,53} = 0,99824.$$

Результати розрахунку значень ймовірнісних показників надійності лінійних споруд ВОЛЗ за 1, 3 та 5 років отримані аналогічно та зведені до табл. 5.12.

Аналіз результатів досліджень оцінки показників надійності лінійних споруд ВОЛЗ. Розглянемо в якості прикладу аналіз результатів оцінки ймовірнісних показників надійності лінійних споруд ВОЛЗ в Одеській області за початковий термін часу експлуатації згідно даних табл. 5.12.

Аналіз значень 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 являються незначними, але: збільшення щільності відмов та зменшення середнього часу напрацювання на відмову та коефіцієнта готовності

Таблиця 5.10 – Розрахункові вирази для визначення експлуатаційних показників надійності ВОЛЗ

Назва показника	Вираз для розрахунку	Складові виразу
1	2	3
Щільність відмов	$m_L = \frac{n}{K \cdot L} \cdot 100, \quad (4.1)$	m_L – щільність відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку на лінії довжиною L , км, що припадає на 100 км траси на рік, 1/рік; n – кількість відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку на усій лінії довжиною L протягом заданого часу; K – кількість років, за які виникло n відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку, рік; L – довжина лінії, км; 100 – довжина лінії, на яку визначається щільність відмов (пошкоджень з перервою) зв'язку, км.
Середній час між відмовами	$T_{\text{оп}L}^{\text{п}} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{n}, \quad (4.9)$	$T_{\text{оп}L}^{\text{п}}$ – середній час між відмовами (пошкодженнями з перервою) зв'язку – число годин справної роботи ВОЛЗ (напрацювання на відмову), год; n – кількість відмов за визначений термін часу; t_i – час справної роботи між сусідніми відмовами, год, наприклад $(i-1)$ та i , год; i – номер відмови; $\sum$ – символ суми складових.

Закінчення табл. 5.10

1	2	3
Середній час відновлення зв'язку	$t_{\text{счвз}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{\text{чвзи}}^{\text{п}}, \quad (4.10)$	$t_{\text{счвз}}$ – середній час відновлення зв'язку, год; $t_{\text{чвзи}}^{\text{п}}$ – час відновлення зв'язку за i -ої відмови (пошкодження з перервою) зв'язку, год, i – номер відмови; n – кількість відмов за визначений термін часу; $\sum$ – символ суми складових
Коефіцієнт готовності	$K_{\text{гЛ}} = \frac{T_{\text{0pL}}^{\text{п}}}{T_{\text{0pL}}^{\text{п}} + t_{\text{счвз}}}, \quad (4.11)$	$K_{\text{гЛ}}$ – коефіцієнт готовності на усю довжину траси L , віднесеного до заданого періоду часу; $T_{\text{0pL}}^{\text{п}}$ – середній час між відмовами (пошкодженнями з перервою) зв'язку, год; $t_{\text{счвз}}$ – середній час відновлення зв'язку, год.

Таблиця 5.11 – Значення n_i та $T_{\text{0pi}}^{\text{п}}$ лінійних споруд ВОЛЗ в Одеській області за 5 років експлуатації

Одеська область	Рік експлуатації, $T_{\text{0pL}}^{\text{п}}$ та кількість відмов				
	1	2	3	4	5
$T_{\text{0pLi}}^{\text{п}}$, год	5599; 1129,4; 909,6; 2615; 510,75; 1662,5; 953,5; 8252,4; 2306,6; 2923,9; 350,2; 281,25; 1151; 2546,2; 74,9; 1731,8; 535,4; 1131,1; 881; 5710,3; 182,2; 1773,8; 1867,4; 44,8;				
Кількість відмов за рік	4	2	6	6	5

Таблиця 5.12 – Результати визначення ймовірнісних показників надійності лінійних споруд ВОЛЗ за 1, 3, 5 років експлуатації

Ймовірнісні показники надійності	Значення ймовірнісних показників надійності та відсотки зміни за роки експлуатації					
	1 рік		3 роки		5 років	
	значення показників	відсоток зміни від початкового значення	значення показників	відсоток зміни від початкового значення	значення показників	відсоток зміни від початкового значення
m_L	2	—	2	0	2,3	+15 %
T_{0pL}^n	2623,25	—	2296,54	-12,45 %	1914,70	-27 %
$t_{счвз}$	4,53	—	4,78	+5,5 %	4,98	+9,9 %
$K_{гL}$	0,99824	—	0,99752	-0,07 %	0,99741	-0,08 %

вказують 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.

Надання рекомендацій з підвищення якості технічної експлуатації ВОЛЗ. Для оптимізації технічного обслуговування лінійних споруд ВОЛЗ на початковому етапі експлуатації з метою покращення ймовірнісних показників надійності технічному відділу організації зв'язку слід: провести аналіз чинників, які зменшують надійність лінійних споруд ВОЛЗ та, в першу чергу, виявити недоліки в їх обслуговуванні; особливу увагу приділити ремонтним, профілактичним роботам і забезпеченню надійності лінійних споруд ВОЛЗ з використанням комплектів ЗІП.

Висновки. Результати розробки методу оцінки ймовірнісних показників надійності лінійних споруд ВОЛЗ при початковому часу експлуатації дозволили: на основі обґрунтованої необхідності в методі розробити його теоретичну та експериментальну складові; оцінити ймовірнісні показники надійності на прикладі лінійних споруд ВОЛЗ в Одеській області та надати аналіз їх зміни; привести рекомендації з підвищення якості технічної експлуатації цієї лінії.

5.6 Розробка методу контролю механічного стану оптичного волокна діелектричного самоутримного оптичного кабелю при експлуатації

Обґрунтування необхідності методу. Під час експлуатації діелектричного самоутримного оптичного кабелю його оптичне волокно, як правило, знаходяться під певними локальними або розподіленими по його довжині механічними навантаженнями, що створюють механічні напруги. Механічні напруги самого ДСОК, підвішеного на опорах повітряної волоконно-оптичної лінії зв'язку, з'являються під дією механічних (вага кабелю, радіус його вигину в затисках опори) та фізико-кліматичних факторів зони експлуатації (температури, натиску вітру, поморозі, ожеледі та інше). Як відомо, зміна поздовжніх

механічних дій на кабель приводить до його натягу або стискання, тобто зміни його довжини в прольоті, стріли провису та розтягувального навантаження. Тому, при виборі конструкції ДСОК і розрахунку умов його підвішування та експлуатації необхідно враховувати постійну дію на кабель механічних та фізико-кліматичних факторів зони розташування ПВОЛЗ. При цьому, забезпечення належного технічного стану лінії на протязі передбаченого терміну служби вимагає моніторингу, в першу чергу, механічних характеристик кабелю [187].

Нормативно-технічна документація для ВОЛЗ регламентує контроль механічного стану ОК під час експлуатації, але контроль механічного стану волокна в повній мірі для забезпечення якості та надійності лінії протягом заданого терміну служби не передбачає [20, 23, 189 – 194].

Як відомо, для забезпечення надійності ОК, як правило, допустиме видовження ОВ складає $\epsilon_{\text{дОВ}} < (0,2 \dots 0,25) \%$, прийняте при конструюванні кабелю. Але при експлуатації в волокнах можлива поява багаторазових надлишкових видовжень, що перевищують ці значення. Останнє може привести до дострокового виходу із ладу ОВ [4, 53, 86, 187 – 189].

Таким чином, розробка та обґрунтування способів оцінки механічних характеристик діелектричного самоутримного оптичного кабелю (ДСОК) та методу повного контролю механічного стану оптичного волокна є необхідним.

Огляд літератури показав, що в обмеженій кількості робіт приводяться вимоги та методи оцінки і навіть моніторингу деяких механічних характеристик ОК в прольоті ПВОЛЗ. Але вони не дають повної оцінки механічного стану ДСОК та його ОВ. У зв'язку з цим розробка, обґрунтування дешевого та легкодоступного методу контролю механічного стану ОВ в ДСОК при експлуатації є необхідним.

Метою розробки методу є обґрунтування контролю механічного стану оптичних волокон підвісних ДСОК, а також оцінка умов деформації ОВ в їх осерді при розтягувальних/стискальних навантажень.

Теоретична складова методу. Особливістю експлуатації ДСОК на опорах

ПВОЛЗ порівняно з експлуатацією кабелів, що прокладені в ґрунті, в кабельній каналізації, тощо, є дія на них динамічних механічних та фізико-кліматичних навантажень. Ці навантаження спричиняють зміну довжини кабелю в прольоті між опорами лінії та появу його механічних напруг розтягування (стискання). Останнє викликає необхідність визначати стрілу провисання кабелю в прольоті та розтягувальне навантаження, якій воно відповідає.

Умови підвішування ДСОК та його механічний стан при експлуатації визначаються величинами: механічної напруги кабелю ($\sigma_{\text{кx}}$), відносних видовжень кабелю та його оптичного волокна ($\epsilon_{\text{кx}}$, $\epsilon_{\text{ОВx}}$), довжини прольоту ($L_{\text{прx}}$), стріли провисання (f_x) та розтягувального навантаження (РН) кабелю ($F_{\text{рн}}$), яке обумовлене поздовжньою деформацією ϵ . При цьому, при любых умовах експлуатації необхідно забезпечити, щоб розтягувальне зусилля кабелю $F_{\text{рнx}}$ було менше за його максимально допустиме розтягувальне навантаження $F_{\text{мрн}}$, яке вказане в технічних умовах, тобто $F_{\text{рнx}} \leq (0,65 \dots 0,70) F_{\text{мрн}}$. В свою чергу, розтягувальні навантаження, що діють на конструкцію ДСОК, дозволять визначати механічний стан ОВ в осерді кабелю та його зміни. Підвішування та монтаж кабелів мереж зв'язку проводиться в межах температури від мінус 5 °С до +50 °С, а експлуатація – від мінус 40 °С до +70 °С.

У випадку відсутності або дії зовнішніх фізико-кліматичних навантажень (ваги паморозі, ваги ожеледі) на кабель, крім того, коли на нього діє власна вага та температура середовища, можливо виконувати оцінку механічного стану конструкції ДСОК за стрілами провисання в прольоті при експлуатації. Для контролю механічного стану оптичного волокна необхідно виконати розрахунки стріли провисання f_x для розширеного діапазону температур (мінус 5...+70) °С. Оцінка значень f_x дається за даними її вимірів в прольоті спеціальним обладнанням. Виміряні значення f_x дають можливість довідатися про величину фактичної механічної напруги $\sigma_{\text{фx}}$ (або поздовжньої деформації $\epsilon_{\text{фx}}$) в ньому та визначити фактичне розтягувальне навантаження, що діє в цей момент. Це дозволить з плином часу виконувати моніторинг змін механічних характеристик кабелю задля недопущення появи надмірних РН та обриву ОВ.

Для розв'язання поставленої задачі розглядається модульна конструкція ДСОК, яка містять ЦСЕ зі склопластикових стержнів та ПСЕ з повиву арамідних ниток (рис. 2.2, в).

Еквівалентну механічну напругу σ_1 , яка з'являється в кабелі за рахунок його підвішування та дії тільки власної ваги ДСОК, можливо визначити за перетвореною формулою для визначення стріли провисання [24, 186, 193]:

$$\sigma_1 = \frac{L_{\text{пр}}^2 \gamma_1}{8f}, \quad (5.55)$$

де σ_1 – еквівалентна механічна напруга кабелю на довжині прольоту, 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 – стріла провисання кабелю в прольоті, м.

Питомі навантаження на ДСОК ($\gamma_1 \dots \gamma_7$) характеризують фізико-кліматичні навантаження на кабель умов експлуатації та включають в себе навантаження від дії його власної ваги, натиску вітру, ваги паморозі та ожеледі [24].

Питоме навантаження від власної ваги ДСОК може бути визначене за виразом [24, 187]:

$$\gamma_1 = \frac{P_{\text{к}}}{S} n, \quad (5.56)$$

де γ_1 – питоме навантаження від власної ваги кабелю, $\text{кг/(м}\cdot\text{мм}^2)$; $P_{\text{к}}$ – вага кабелю, кг/м ; S – площа поперечного перетину кабелю, мм^2 ; n – коефіцієнт перевантаження.

Визначити еквівалентну механічну напругу в ДСОК σ_x під дією фізико-кліматичних навантажень можна за допомогою рівняння стану підвішеного кабелю в прольоті за умови рівності точок підвісу [187, 198]:

$$A\sigma_x^3 + B\sigma_x^2 + C = 0, \quad (5.57)$$

де $A = (1 + \alpha_0(t_x - t)) \left(1 + \frac{L_{\text{пр}}^2 \gamma_1^2}{24\sigma_1^2} \right)$; $B = (1 + \alpha_0(t_x - t)) \left(\frac{L_{\text{пр}}^2 \gamma_1^2 E_{\text{екв}}}{24\sigma_1^2} - \frac{L_{\text{пр}}^2 \gamma_1^2}{24\sigma_1} - \sigma_1 \right) + \alpha_0 E_{\text{екв}}(t_x - t)$; $C = \frac{-L_{\text{пр}}^2 \gamma_x^2 E_{\text{екв}}}{24}$; σ_x, γ_x, t_x – еквівалентна механічна напруга, кг/мм^2 , питоме навантаження, $\text{кг/(м}\cdot\text{мм}^2)$ та температура кабелю, $^{\circ}\text{C}$, при певних умовах;

σ_1, γ_1, t_1 – те ж саме для відомих умов експлуатації кабелю; $E_{\text{екв}}$ – еквівалентний модуль Юнга ДСОК, кг/мм².

Для дослідження контролю механічного стану ДСОК та ОВ при експлуатації використано основні розрахункові вирази табл. 5.13.

За допомогою (5.57) розраховується $\epsilon_{\text{дкх}}$ та оцінюються деформаційні процеси зміни видовження/стискання в кабелі і механічний стан ОВ в ньому при дії поздовжньої механічної сили. Тому, основна задача конструкції ОК полягає в забезпеченні при експлуатації відсутності прикладання механічних напруг до його ОВ [199 – 201]. Тому, найбільшого застосування у світі набули конструкції ДСОК з вільно укладеними ОВ (loose tube cable). Вони дозволяють забезпечити його допустиме відносне видовження. Воно забезпечує додаткову довжину ОВ в трубці ОМ до початку його видовження під дією розтягувальних зусиль.

Значення цих механічних характеристик ОК дозволить оцінити фактичне видовження кабелю та механічний стан ОВ при певних кліматичних умовах.

Послідовність контролю механічного стану оптичного волокна при експлуатації кабелю. Вона розроблена за оцінкою фактичних механічних характеристик ДСОК при експлуатації та результатів експериментальних досліджень: – виміру фактичної стріли провису ДСОК в прольоті ПВОЛЗ та розрахунку її величини при дії на кабель температури $t = -5$ °С, ваги ожеледі з натиском вітру; – розрахунку фактичних механічної напруги, додаткового видовження та розтягувального навантаження кабелю на різних довжинах прольоту. Це дало можливість визначити і встановити факт наявності/відсутності дії надмірних сил розтягу на оптичне волокно в кабелі [187].

Згідно до результатів розрахунку максимально допустимого видовження кабелю (5.61), його допустимого відносного видовження – вираз (1.4) – при значеннях допустимого видовження ОВ та його надлишкової довжини в трубці ОМ за даними розробника ДСОК з'являється можливість оцінки механічного стану ОВ в кабелі марки ОКЛ-3-Д2А14. Тому, при визначеному значенню $\epsilon_{\text{мдк}}$ отримано межу, тобто максимальне видовження ДСОК, значення якого, порівнюючи із значенням видовження кабелю при певних механічних та фізико-

Таблиця 5.13 – Основні розрахункові вирази для контролю механічного стану ДСОК та ОВ при експлуатації

Назва параметру	Вирази для розрахунку		Номер виразу
	параметрів для контролю механічного стану ДСОК та ОВ	складові виразу	
1	2	3	4
Стріла провисання ДСОК	$f_x = \frac{L_{\text{пр}}^2 \gamma_x}{8\sigma_x}$	f_x – стріла провисання ДСОК, м, при відомих: $L_{\text{пр}}$ – довжині прольоту, м; γ_x – питоме навантаження від власної ваги кабелю, кг/(м·мм ²); σ_x – еквівалентна механічна напруга в кабелі, кг/мм ² .	(5.58)
Розтягувальне навантаження кабелю при певних умовах експлуатації	$F_{\text{рнх}} = \sigma_x \cdot S_{\text{СЕ}} \cdot g,$	$F_{\text{рнх}}$ – розтягувальне навантаження кабелю, Н; σ_x – еквівалентна механічна напруга в кабелі, кг/мм ² ; $S_{\text{СЕ}}$ – площа поперечного перетину усіх силових елементів кабелю, мм ² ; g – стала Галілея, Н/кг.	(5.59)
Еквівалентна механічна напруга кабелю при дії певних механічних та фізико-кліматичних факторів	$\sigma_x = \epsilon_{\text{ДКХ}} \cdot E_{\text{ЕКВ}},$	σ_x – еквівалентна механічна напруга кабелю, кг/мм ² ; $\epsilon_{\text{ДКХ}}$ – допустиме відносне видовження кабелю; $E_{\text{ЕКВ}}$ – еквівалентний модуль Юнга кабелю, кг/мм ² .	(5.60)

Закінчення табл. 5.13

1	2	3	4
Максимально допустиме відносне видовження кабелю	$\varepsilon_{\text{мдк}} = \varepsilon_{\text{дк}} + \varepsilon_{\text{надлОВ}} + \varepsilon_{\text{дов}}$	$\varepsilon_{\text{мдк}}$ – максимально допустиме відносне видовження кабелю, %; $\varepsilon_{\text{дк}}$, $\varepsilon_{\text{дов}}$ – допустимі відносні видовження кабелю та ОВ, відповідно, %; $\varepsilon_{\text{надлОВ}}$ – надлишкова довжина ОВ в трубці ОМ кабелю, %.	(5.61)
Відносне видовження кабелю	Додаткове $\varepsilon_{\text{дкх}} = \frac{\sigma_x}{E_{\text{екв}}}$; Фактичне $\varepsilon_{\text{фдкх}} = \frac{\sigma_{\text{фх}}}{E_{\text{екв}}}$	$\varepsilon_{\text{дкх}}$, $\varepsilon_{\text{фдкх}}$ – додаткове та фактичне відносні видовження кабелю; σ_x – механічна напруга в кабелі, кг/мм ² ; $\sigma_{\text{фх}}$ – фактична механічна напруга в кабелі, кг/мм ² ; $E_{\text{екв}}$ – еквівалентний модуль Юнга кабелю, кг/мм ² .	(5.62) (5.63)
Фактична механічна напруга кабелю	$\sigma_{\text{фх}} = \frac{L_{\text{пр}}^2 \cdot \gamma_1}{8 \cdot f_{\text{фх}}}$	$\sigma_{\text{фх}}$ – фактична механічна напруга кабелю, кг/мм ² , від власної ваги кабелю на довжині прольоту лінії; $L_{\text{пр}}$ – довжина прольоту ПВОЛЗ, м; γ_1 – питоме навантаження від власної ваги кабелю, кг/(м·мм ²); $f_{\text{фх}}$ – фактична стріла провисання кабелю в прольоті лінії, м.	(5.64)
Фактичне розтягувальне навантаження кабелю при дії певних кліматичних умов експлуатації	$F_{\text{фрнх}} = \sigma_{\text{фх}} \cdot S_{\text{СЕ}} \cdot g$	$F_{\text{фрнх}}$ – 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.	(5.65)

кліматичних умовах, дає можливість контролю механічного стану ОВ.

Отже, значення $\varepsilon_{\text{мдк}}$ та $\varepsilon_{\text{фдкх}}$, отримані під час експлуатації ДСОК дали можливість контролю механічного стану як кабелю так і оптичних волокон. Це дало можливість їх моніторингу та прийняття профілактичних заходів на ПВОЛЗ для забезпечення терміну її служби [187].

Значення стріли провису кабелю в прольоті ПВОЛЗ при дії температури мінус 5 °С, ожеледі з вітром (f_{70}) розраховується за параболічною кривою залежності $f_{\text{фх}}, f_{\text{фхр}}$ від питомих навантажень ($\gamma_{3\text{п}}, \gamma_{30}$ та $\gamma_{7\text{п}}$) ПВОЛЗ [187].

Дослідження теоретичного складу методу контролю механічного стану ОВ були виконані за графічною моделлю (рис. 5.11).

Експериментальна складова методу. Контроль механічного стану ОВ та ДСОК при дії поточних механічних та фізико-кліматичних умов експлуатації передбачає [186]: 1. Розрахунок питомих навантажень до ДСОК.

2. Розрахунок еквівалентної механічної напруги ДСОК.

3. Визначення: – стріли провисання ДСОК в прольоті. Порівняння отриманого значення f_x з вимірюною фактичною стрілою провисання кабелю. У випадку різниці результатів зробити відповідний аналіз причин зміни провисання кабелю від очікуваного значення та передбачити можливість виконання профілактичних заходів;

– розтягувальне навантаження, що діє на кабель, та порівняння його зі значенням МДРН ДСОК, що зазначено в його технічних характеристиках (або технічних умовах на кабель). У випадку перебільшення (65...70) % від МДРН зробити відповідний аналіз причин перевантаження кабелю задля забезпечення його механічної цілісності та передбачити можливість виконання профілактичних заходів;

– фактично діючого відносного видовження кабелю ($\varepsilon_{\text{фдкх}}$) та за його значенням по виразу (5.63) оцінити механічний стан волокна.

Як приклад, було досліджено ДСОК марки ОКЛ-3-Д2А14 виробництва ПАТ «Одескабель». В розрахунках було: – прийнято: діаметр кабелю $D_k = 13,6$ мм, питома вага кабелю $P_k = 155$ кг/км, еквівалентний ТКЛР кабелю $\alpha_0 =$

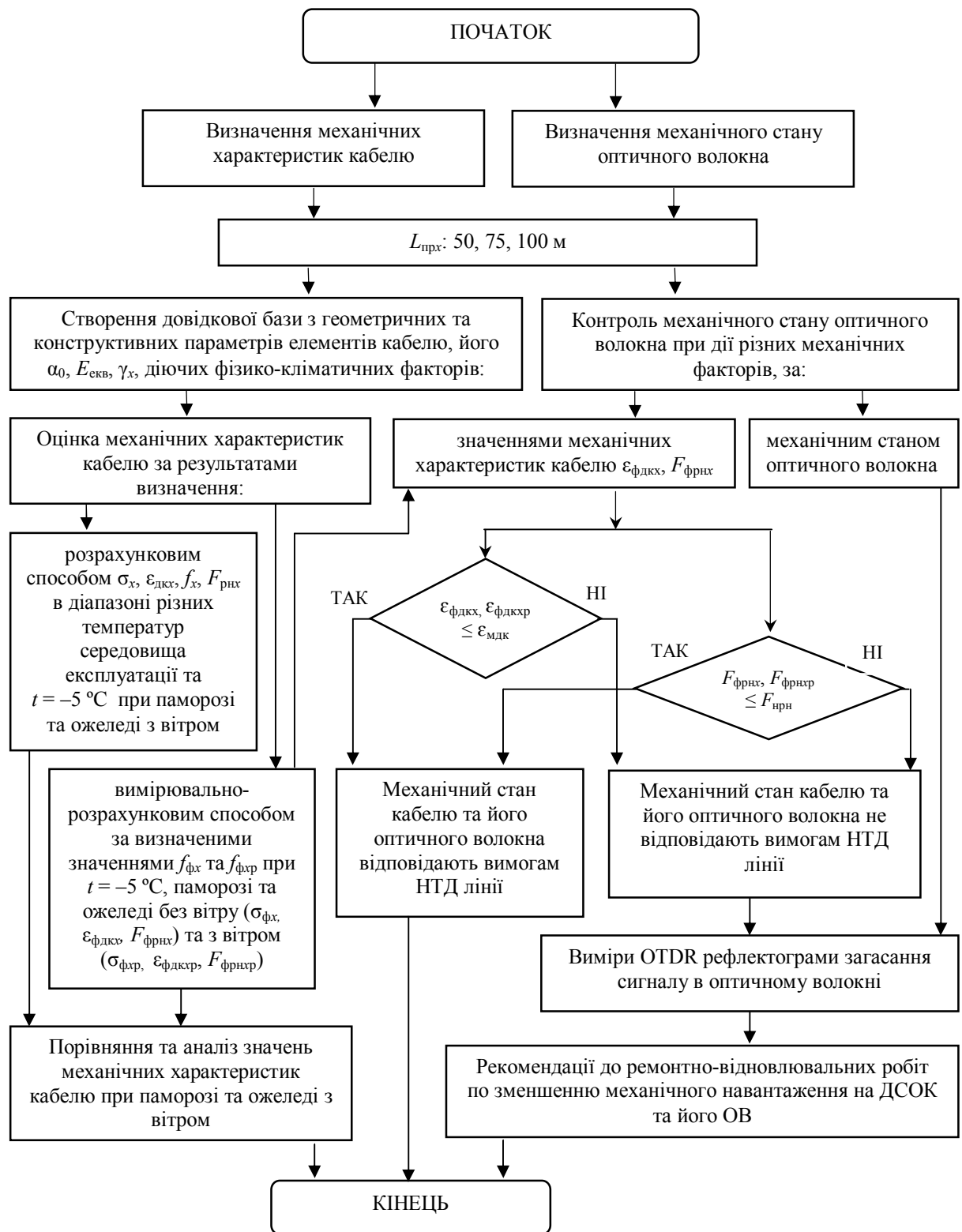


Рисунок 5.11 – Графічна модель дослідження за методом контролю механічного стану оптичного волокна в залежності від марки кабелю та кліматичної зони експлуатації

$= 6,226 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, еквівалентний модуль Юнга всього кабелю ($E_{\text{екв}} = 20010 \text{ Н/мм}^2$);

– визначено згідно до [24] умов Одеського кліматичного району (Причорноморського району) – швидкість вітру при паморозі та ожеледі $V = 28,3 \text{ м/с}$, максимальна радіальна товщина стінки паморозі на кабелі $\Delta t_{\text{п}} = 0,5 \text{ мм}$ та стінки льоду $\Delta t_{\text{л}} = 28 \text{ мм}$, початкова стріла провисання ДСОК при температурі $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ рівна 1% від довжини прольоту, довжини прольоту ПВОЛЗ 50 м , 75 м та 100 м . Як ПСЕ в розрахунках використовувалися арамідні нитки типу «Тwaron D1052 8050» з ТКЛР $\alpha_{\text{ан}} = -3 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{K}^{-1}$ та склопластиковий стержень типу «Polystal P20» з ТКЛР $\alpha_{\text{сск}} = 6,6 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{K}^{-1}$.

Результати розрахунку питомих навантажень на кабель та його механічних характеристик при експлуатації в цій кліматичній зоні за цим способом при різних довжинах прольоту та дії механічних і різних фізико-кліматичних факторів наведено в табл. 5.14 [187].

Результати розрахунку значень механічних характеристик ДСОК, які приведені в табл. 5.14, показали, що вони зростають, в першу чергу, від зміни температури від плюс $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ до мінус $28 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Їх найгірші значення з’являються при $t = -5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ в час паморозі та ожеледиці. В свою чергу, зміни значень механічних характеристик ДСОК марки ОКЛ-3-Д2А14 по абсолютній величині (табл. 5.14) приведені в табл. 5.15. Ці характеристики розраховувалася при трьох значеннях довжини прольоту лінії: 50 м , 75 м та 100 м [187].

Певні фізико-кліматичні навантаження на ДСОК викликають такі його поздовжні деформації, які призводять до видовження лише конструкції кабелю та/або його видовження разом з ОВ. Надмірне видовження ДСОК може привести до зменшення габариту лінії та перевищення норм параметрів кабелю по ТУ. Останнє при значній та довгостроковій дії впливових факторів приводить до різниці між $F_{\text{фрнх}}$ та $F_{\text{мрн}}$, що може викликати розрив ОВ та повний вихід кабелю з ладу. Таким чином, встановлено чіткий математичний інструментарій, що дозволяє проводити контроль механічного стану ОВ та механічних характеристик кабелю в цілому під дією фізико-кліматичних впливів середовища експлуатації. В якості прикладу при дослідженні механічного стану ОВ за

Таблиця 5.14 – Розрахункові значення питомих навантажень γ_x на кабель марки ОКЛ-3-Д2А14 та його механічних характеристик на різних довжинах прольоту лінії

№ з/п	γ_x , кг/(м·мм ²), в Одеській кліматичній зоні при дії різних факторів	$L_{\text{прх}}$, м	Механічні характеристики ДСОК на довжині прольоту лінії			
			σ_x , кг/мм ²	$\epsilon_{\text{дкх}}$, %	f_x , м	$F_{\text{рнх}}$, Н
1	ваги кабелю, $t = +50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\gamma_1 = 0,00130$	50	0,675	0,033	0,602	181,8
		75	1,040	0,051	0,879	280,1
		100	1,416	0,069	1,147	381,4
2	ваги кабелю, $t = +20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\gamma_1 = 0,00130$	50	0,813	0,040	0,500	218,8
		75	1,219	0,060	0,750	328,2
		100	1,625	0,080	1,000	437,6
3	ваги кабелю, $t = -28\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\gamma_1 = 0,00130$	50	1,150	0,056	0,353	309,6
		75	1,600	0,078	0,571	430,9
		100	2,037	0,100	0,798	548,5
4	ваги кабелю і паморозі, $t = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\gamma_{3\text{п}} = 0,00145$	50	1,018	0,050	0,445	274,0
		75	1,462	0,072	0,697	393,8
		100	1,896	0,093	0,956	510,5
5	натиску вітру при паморозі, $t = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\gamma_{5\text{п}} = 0,00147$	50	1,024	0,050	0,449	275,7
		75	1,470	0,072	0,703	395,9
		100	1,905	0,093	0,965	512,9

Закінчення табл. 5.14

6	ваги кабелю,	50	1,444	0,071	0,628	388,7
	паморозі і натиску	75	1,999	0,098	1,020	538,2
	вітру, $t = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\gamma_{7п} = 0,00290$	100	2,522	0,124	1,437	679,2
7	ваги кабелю і	50	5,26	0,258	1,465	1415,0
	ожеледі, $t = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$,	75	6,97	0,342	2,486	1877,0
	$\gamma_{30} = 0,02464$	100	8,52	0,417	3,617	2293,0
8	ваги кабелю,	50	6,827	0,335	1,694	1838,0
	ожеледі і натиску	75	9,026	0,442	2,882	2430,0
	вітру, $t = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\gamma_{70} = 0,03700$	100	11,005	0,540	4,203	2963,0

Таблиця 5.15 – Розрахункова зміна значень σ_x , $\epsilon_{дкx}$, f_x та $F_{рнх}$ ДСОК по абсолютній величині при температурі $t = +50\text{ }^{\circ}\text{C}$ відносно їх значень при $t = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$ при паморозі та ожеледі з вітром

№ з/п	$L_{прх}$, м	Зміна значень механічних характеристик кабелю							
		назва характеристики							
		σ_x , кг/мм ² , при:		$\epsilon_{дкx}$, %, при:		f_x , м, при:		$F_{рнх}$, кН, при:	
		паморозі	ожеледі	паморозі	ожеледі	паморозі	ожеледі	паморозі	ожеледі
1	50	0,769	6,152	0,038	0,302	0,026	1,092	0,207	1,656
2	75	0,959	7,986	0,047	0,391	0,141	2,003	0,258	2,150
3	100	1,106	9,589	0,055	0,471	0,290	3,056	0,298	2,581

виразами (5.63) – (5.65) визначено значення фактично-діючого видовження волокна та фактичного розтягувального навантаження на кабель. Значення $\varepsilon_{\text{фдкх}}$ і $F_{\text{фрнх}}$ були отримані при зміні температури від плюс 20 °С до мінус 5 °С, паморозі та ожеледі. При дослідженні цих механічних характеристик при $t = +20$ °С враховувалася власна вага кабелю, а при $t = -5$ °С його власна вага, вага паморозі й ожеледі та напір вітру. Для аналізу механічного стану ОВ при приведених вище умовах було розраховано за довідковими даними $\varepsilon_{\text{мдкх}}$. При цьому, використовуючи вираз (5.62) визначено, що для досліджуваної конструкції ДСОК допустиме відносне видовження кабелю становить 0,34 %. Тоді $\varepsilon_{\text{мдк}}$ згідно (5.61) при $\varepsilon_{\text{надлОВ}} = 0$ та $\varepsilon_{\text{дОВ}} = 0,25$ % становить – 0,59 %. Крім того, надано аналіз механічного стану оптичного волокна (табл. 5.16) для довжин прольоту лінії 50, 75 та 100 м. Результати аналізу механічного стану оптичного волокна в досліджуваний конструкції ДСОК під дією фізико-кліматичних впливів середовища експлуатації приведено в табл. 5.16 та на рис. 5.12, рис. 5.13.

Аналіз результатів контролю механічного стану оптичного волокна ДСОК при експлуатації (табл. 5.16) показав, що при: – максимально допустимому відносному видовженні ДСОК $\varepsilon_{\text{мдк}} = 0,59$ % на усіх довжинах прольоту додаткове відносне видовження кабелю менше цієї величини; – довжині прольоту ПВОЛЗ 100 м фактичне розтягувальне навантаження кабелю $F_{\text{фрнхр}} = 2,722$ кН більше норми його допустимого розтягувальне навантаження згідно до [20, 187] $F_{\text{фрн}} = 2,600$ кН, тому, кабель марки ОКЛ-3-Д2А14 в Одеській кліматичній зоні при $L_{\text{пр}} = 100$ м не може бути використовуваним на ПВОЛЗ.

Надання рекомендацій з контролю механічного стану оптичного волокна ДСОК при експлуатації. Метод можливо рекомендувати для застосування відповідними підрозділами з технічної експлуатації телекомунікаційних ліній та мереж зв'язку на базі підвісних оптичних кабелів.

Він дозволяє: – вибирати марку кабелю при проєктуванні ПВОЛЗ для підвішування на різних інженерних спорудах в заданій кліматичній зоні та довжині прольоту з однаковою висотою точок підвісу кабелю; – проводити моніторинг технічного стану лінії за результатами оцінки механічних

Таблиця 5.16 – Результати аналізу механічного стану оптичного волокна ДСОК марки ОКЛ-3-Д2А14 під дією фізико-кліматичних впливів на різних довжинах прольоту при температурі плюс 20 °С та мінус 5 °С

№ з/п	γ_x , кг/(м·мм ²), в Одеській кліматичній зоні при дії різних факторів:	Механічні характеристики ДСОК на довжині прольоту														
		$\epsilon_{\text{флк}}, \epsilon_{\text{флкпр}}, \%$, при довжині прольоту ПВОЛЗ, м						$F_{\text{фрн}}, F_{\text{фрнпр}}, N$, при довжині прольоту ПВОЛЗ, м						Механічний стан ОВ при довжині прольоту ПВОЛЗ, м		
		50		75		100		50		75		100		50	75	100
		$\epsilon_{\text{флк}},$ $\epsilon_{\text{флкпр}}$	$\epsilon_{\text{дк}}$	$\epsilon_{\text{флк}},$ $\epsilon_{\text{флкпр}}$	$\epsilon_{\text{дк}}$	$\epsilon_{\text{флк}},$ $\epsilon_{\text{флкпр}}$	$\epsilon_{\text{дк}}$	$F_{\text{фрн}},$ $F_{\text{фрнпр}}$	$F_{\text{нрн}}$	$F_{\text{фрн}},$ $F_{\text{фрнпр}}$	$F_{\text{нрн}}$	$F_{\text{фрн}},$ $F_{\text{фрнпр}}$	$F_{\text{нрн}}$			
1	$t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ і ваги кабелю, $\gamma_1 = 0,00130$	0,040 < 0,340		0,060 < 0,340		0,080 < 0,340		218,80< 2600,0		328,20 < 2600,0		437,60 < 2600,0		ОВ розпрямляється в осерді та не підлягає поздовжньому видовженню		
2	$t = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$, ваги кабелю та паморозі, $\gamma_{3\text{п}} =$ 0,00145	0,048 < 0,340		0,069 < 0,340		0,089 < 0,340		263,50 < 2600,0		378,70 < 2600,0		491,00 < 2600,0		ОВ розпрямляється в осерді та не підлягає поздовжньому видовженню		
3	$t = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$, натиску вітру при паморозі, $\gamma_{5\text{п}} =$ 0,00147	0,050 < 0,340		0,072 < 0,340		0,093 < 0,340		275,70 < 2600,0		395,90 < 2600,0		512,90 < 2600,0		ОВ розпрямляється в осерді та не підлягає поздовжньому видовженню		

Закінчення табл. 5.16

4	$t = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$, ваги кабелю, паморозі та натиску вітру, $\gamma_{7п} =$ 0,00290	0,068 < 0,340	0,097 < 0,340	0,125 < 0,340	370,90 < 2600,0	531,50 < 2600,0	685,00 < 2600,0	ОВ розпрямляється в осерді та не підлягає поздовжньому видовженню		
5	$t = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$, ваги кабелю та ожеледі, $\gamma_{3о} =$ 0,02464	0,248 < 0,340	0,329 < 0,340	0,401 > 0,340	1361,0 < 2600,0	1805,0 < 2600,0	2205,0 < 2600,0	ОВ розпрямляється в осерді та не підлягає поздовжньому видовженню		ОВ підлягає видовжен ню на 0,06 %
6	$t = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$, ваги кабелю, ожеледі та натиску вітру, $\gamma_{7о} =$ 0,03700	0,31 < 0,340	0,418 > 0,340	0,496 > 0,340	1702,0 < 2600,0	2298,0 < 2600,0	2722,0 > 2600,0	ОВ розпрямл яється в осерді кабелю	ОВ підлягає видовжен ню на 0,08 %	ОВ підлягає видовжен ню на 0,16 %

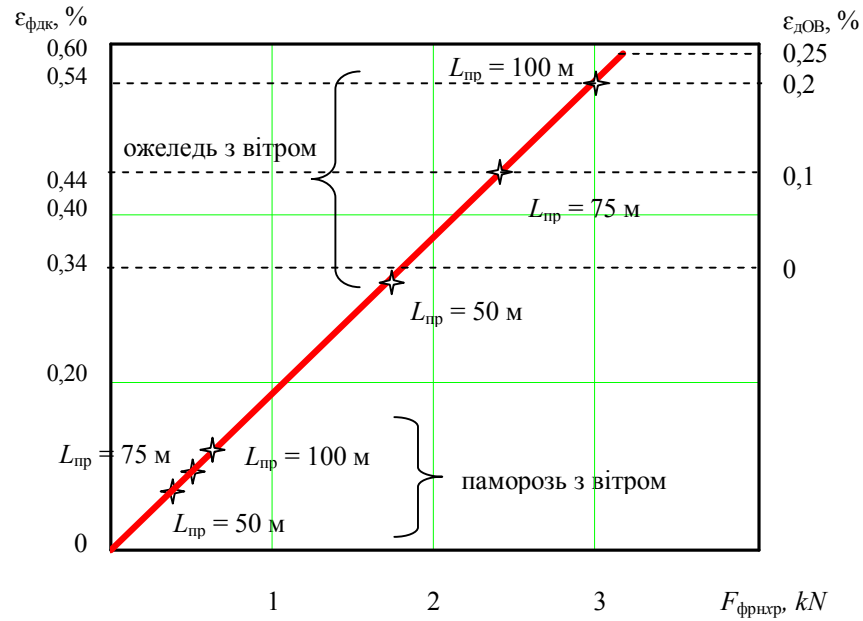


Рисунок 5.12 – Оцінка механічного стану ОВ під дією фізико-кліматичних впливів

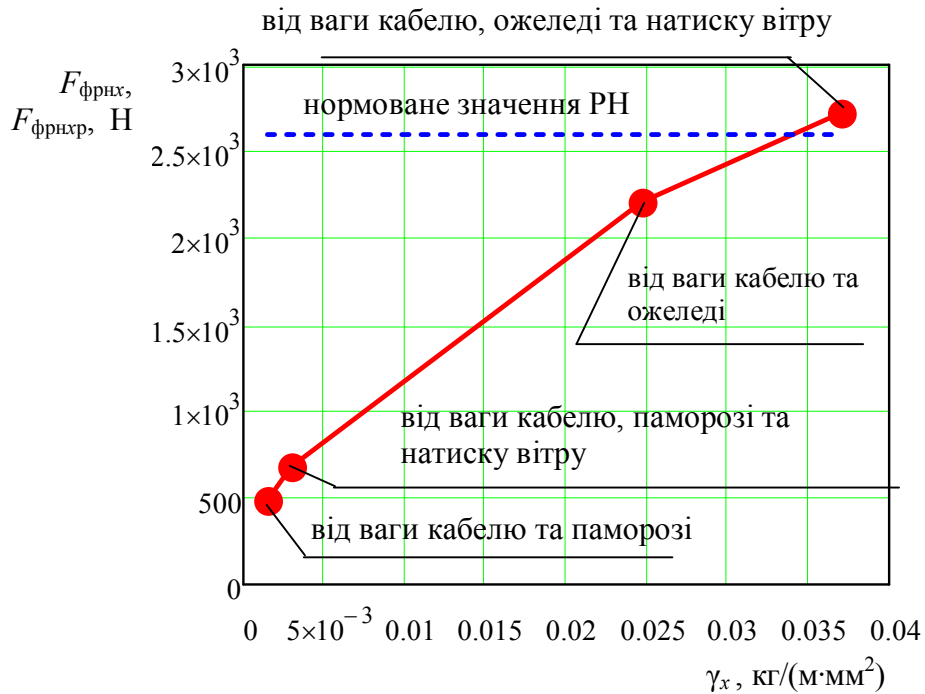


Рисунок 5.13 – Залежність розтягувального навантаження кабелю від питомих навантажень ПВОЛЗ на довжині прольоту 100 м

характеристик кабелю і контролю механічного стану оптичного волокна та вимірів його коефіцієнта загасання; – забезпечити заданий термін служби лінії при належному технічному обслуговуванні або ремонтно-відновлювальних роботах ДСОК. Тому, метод допоможе обслуговуючому персоналу ліній приймати своєчасно заходи ліквідації негараздів в механічних станах кабелю та його волокна.

Висновки. Виконані дослідження встановили, що:

1. Міжнародна та вітчизняна нормативно-технічна документація ПВОЛЗ та ряд наукових робіт регламентують контроль механічних характеристик оптичного кабелю під час експлуатації, але контроль технічного стану волокна в повній мірі для забезпечення якості та надійності лінії протягом заданого терміну служби не передбачають.

2. Зміни механічних та фізико-кліматичних навантажень умов експлуатації спричиняють різні за величиною поздовжні деформації ДСОК та ОВ в цілому, а те, що ДСОК марки ОКЛ-3-Д2А14 з заданими параметрами конструкції при довжині прольоту ПВОЛЗ 100 м за найгірших кліматичних умов забезпечує механічну цілісність ОВ при додатковому відносному видовженні 0,16 %, але за фактичним розтягувальним зусиллям не відповідає нормі – 2,6 кН.

3. Оскільки механічний стан кабелю та оптичного волокна з часом змінюються в гіршу сторону, то дуже важливо проводити їх моніторинг для того, щоб не допустити розрив волокна.

4. Запропонований метод контролю механічного стану ОВ на ДСОК ПВОЛЗ дозволяє виконувати моніторинг змін механічного стану оптичних волокон та кабелю в цілому задля недопущення додаткової появи недопустимих розтягувальних зусиль та виходу з ладу лінії зв'язку. Метод можливо використовувати для застосування підрозділами з технічної експлуатації електронних комунікаційних ліній на мережах зв'язку на базі підвісних оптичних кабелів.

5.7 Розробка способу визначення параметрів оцінки технічного стану елементів ВОЛЗ ділянки регенерації ВОСП

В даному підрозділі розроблено спосіб визначення параметрів оцінки технічного стану (ТС) елементів ВОЛЗ шляхом розподілу загального енергетичного запасу ділянки регенерації ВОСП між елементами лінії та знаходження рівнів їх параметрів-критеріїв відмови (ПКВ). Це дозволило встановити функціональний зв'язок між допустимими (номінальними) значеннями загасання сигналу (α_{hi}) в кожному елементі ВОЛЗ і гранично допустимими значеннями загасання сигналу (A) в цих елементах при їх старінні і відгуку на температурну дію навколишнього середовища. Ці значення A в кожному з елементів ВОЛЗ приймемо як параметри-критерії параметричної відмови за екстремальних значень додатної і від'ємної температур (ПКВЕТ).

За результатами розрахунку 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 встановлено, що в якості рівнів параметра-критерію відмови елементів по загасанню оптичного сигналу слід вибирати середні значення $\alpha_{ПКВетi}$ і $\alpha_{ПКВi}$, що рівні, відповідно, $\alpha_{ПКВетi} = 1,158\alpha_{hi}$ (при екстремальних температурах середовища експлуатації) та $\alpha_{ПКВi} = 1,105\alpha_{hi}$ (при температурі 20 °С). Визначені рівні ПКВ за загасанням оптичного сигналу можуть використовуватися для оцінки ТС різних елементів ВОЛЗ.

Як відомо, створення та удосконалення елементів ВОЛЗ потребує оцінки їх характеристик якості та надійності, що вимагає проведення експериментальних досліджень зразків, вибірок або зразків перших серій виробництва. Як основні технічні показники, що контролюються випробуваннями, вибирається деяка сукупність вимірюваних незалежних їх параметрів, які достатньо повно відображають найбільш суттєво зміни їх ТС.

Оцінка технічного стану лінійних елементів ВОЛЗ, насамперед, вимагає регламентації рівнів параметрів-критеріїв відмови кожного елемента. В сучасних методиках із визначення надійності елементів ВОЛЗ [4, 8, 131, 167]

відсутні обґрунтовані дані нормування граничних станів елементів за контрольованими параметрами. Останнє вказує на настійну необхідність у визначенні та оцінці ПКВ елементів ВОЛЗ для подальшої можливості включення їх значень в ДСТУ.

Тому, метою підрозділу є визначення параметрів оцінки технічного стану елементів ВОЛЗ та регламентація їх рівнів параметрів-критеріїв відмови.

Будь-який з контрольованих технічних параметрів може бути представлений у вигляді випадкової функції $r(t, \psi)$ координати ψ базового стану параметра і напруцювання t , а його критичний стан характеризує параметрична або катастрофічна відмова виробу. Для випробування дорогих виробів лінійних елементів ВОЛЗ (ОК, муфти тощо) характерні невеликі вибірки, а, часто, і окремі зразки. У цих випадках кожен зразок розглядається як представник генеральної вибірки і потрібно оцінити середні ймовірнісні характеристики $\bar{r}(t, \psi)$ для кожного контрольованого параметра. Вироби генеральної вибірки вважаються однорідними по відношенню до розгляданого контрольованого параметра, якщо однаковими в статистичному сенсі є вибіркові ймовірнісні характеристики усіх зразків.

Властивість «надійність» – елементів ВОЛЗ виявляється в процесі експлуатації або спеціальних випробувань, тому, заходи оцінки цієї властивості можуть бути одержані на базі аналізу їх роботи в натурних умовах або результатів лабораторних випробувань. Показники надійності – ймовірність безвідмовної роботи, інтенсивність відмов, середній термін служби, напруцювання до відмови, гама-відсотковий термін служби та ін. [9] мають ймовірнісний характер. Оскільки фактори, що впливають на надійність ОК є випадковими.

Як показники стану надійності, наприклад, ОК можуть сприйматися час, цикли (перемотувань, перегинів і т.п.), імпульси (напруги, світла та ін.) [4]. Як правило, кількість зразків ОК для випробування на надійність визначається:

$$N_{\text{ОК}} = \frac{N_{\text{ОВ}}}{n_{\text{ОВ}}}, \quad (5.66)$$

де N_{OK} – кількість зразків кабелю; $N_{ОВ}$ – кількість ОВ в кабелі; $n_{ОВ}$ – об'єм вибірки ОВ.

Надійність ОК визначається надійністю ОВ та інших елементів кабелю, вона оцінюється декількома етапами: оцінка конструкції ОВ на відповідність терміну його служби ($T_{слОВ}$); відбір ОВ методами руйнівального або неруйнівального контролю перед виготовленням ОК; оцінка конструкції ОК з терміном його служби ($T_{слОК}$) на відповідність $T_{слОК} = T_{слОВ}$; порівняльні випробування ОВ і ОК у випадку $T_{слОК} < T_{слОВ}$ з метою аналізу та виявлення причин одержання від'ємних результатів випробувань на надійність.

Оцінка конструкції ОВ на відповідність $T_{слОВ}$ виконується за його стійкістю до розтягу [4, 49, 131]. Термін служби інших елементів ОК оцінюється зміною хімічної або фізичної структури, міцності, діелектричних або інших властивостей їх матеріалів.

Випадковий процес напрацювання на відмову може оцінюватися параметрами: щільністю ймовірності відмов – $f(t, \varepsilon)$; ймовірністю безвідмовної роботи – $P(t, \varepsilon)$; інтенсивністю відмов – $\lambda(t, \varepsilon)$. Тут t і ε – відповідно час і режим випробувань. Всі три характеристики рівноінформаційні, оскільки між ними існують взаємооднозначні співвідношення [4]:

$$f(t, \varepsilon) = \lambda(t, \varepsilon) \exp \left\{ - \int_0^t \lambda(t, \varepsilon) dt \right\}; \quad P(t, \varepsilon) = \int_t^{\infty} f(t, \varepsilon) dt;$$

$$\lambda(t, \varepsilon) = \frac{f(t, \varepsilon)}{P(t, \varepsilon)} = - \frac{d}{dt} \ln P(t, \varepsilon). \quad (5.67)$$

Контроль ТС елементів ВОЛЗ у цілому в процесі випробувань може бути реалізований спостереженням одного параметра-критерію стану (ПКС) – скалярна задача або ансамблю таких параметрів – векторна задача.

Найбільш інформативне представлення ТС елемента ВОЛЗ багатовимірним вектором, координатами якого є показники, безпосередньо вимірювані прямими показниками елемента. Якщо безпосередньо оцінити ТС елемента ВОЛЗ за прямими показниками важко, або неможливо здійснити

вимірювання всіх, або частини прямих показників, слід вибрати непрямі показники, що характеризують їх стан.

Кожний діагностичний параметр елемента ВОЛЗ може бути оцінений декількома вимогами, а саме: обхват усіх дефектів елемента, найбільші інформативність і чутливість до дефектів, максимальні доступність, мінімальний час вимірювань і їх вартість, максимальна достовірність результатів вимірювання, наявність метрологічного забезпечення і т.д. Наприклад, для ОК від вибору контрольованих параметрів (КП) залежить тривалість і трудомісткість випробувань, витрата кабелю, комплекс необхідної вимірювальної апаратури, тривалість вимірювань і складність оброблення. Зрештою від результатів вимірів КП залежить їх цінність.

Контрольовані параметри лінійних елементів ВОЛЗ можна розділити на чотири групи: оптичні, механічні, електрофізичні, фізико-кліматичні.

Раптова відмова характеризується стрибкоподібною зміною одного або кількох вихідних параметрів об'єкта. Причина раптових відмов переважно залежить від раптової концентрації навантажень (механічних, теплових та ін.), діючих усередині та зовні об'єкта (елемента). Об'єкт відмовляє тоді, коли сумарні або одиничні навантаження на нього перевищують його міцність. Поступова відмова характеризується повільними, розтягнутими в часі змінами значень одного або кількох вихідних параметрів.

Контролювання в процесі експлуатації і лабораторних випробувань усього наведеного ансамблю параметрів зважаючи на їхню тривалість і високу вартість недоцільне. З метою скорочення числа контрольованих параметрів у кожній з перших трьох груп параметрів доцільно виділити за критерієм максимальної інформативності наступні: коефіцієнт загасання, ширина смуги пропускання (F), фазова постійна (β), стійкість до розтягувальних зусиль (F_p).

Зважаючи на значний вплив кліматичних дій на деградацію елементів ВОЛЗ усі атмосферно-кліматичні параметри слід вважати рівноважними і які підлягають контролю при випробуваннях.

При дослідженні часових залежностей і стабільності контрольованих

параметрів елементів ВОЛЗ у різних натурних і екстремальних умовах основні труднощі викликають: 1) великі витрати на випробування за рахунок високої вартості елементів і тривалості часу збирання інформації про часову зміну контрольованих параметрів зразків; 2) метрологія і точність вимірювання КП в умовах тривалих випробувань; 3) відсутність достовірних методик для оцінки КП зразків, що зменшують похибки вимірювання до допустимих меж. Наприклад, унаслідок вимірювання якості оброблення торців ОВ кабелів і відмінності умов введення і виведення оптичної випромінюваної потужності за рахунок дрейфу параметрів світлодіодів і фотодіодов (СД і ФД); 4) відсутність норм оцінки параметрів, що характеризують ТС елементів.

У підрозділі, як і в низці робіт [3, 4, 49], оцінка ТС елементів ВОЛЗ виконувалася по частині прямих показників, а саме: загасання сигналу в елементі, цілісність елемента та його захисних покривів.

У зв'язку з викладеним визначимо рівні загасання сигналу, вибраного як ПКВ для ОК, рознімних з'єднувачів і нерознімних з'єднань. Установимо залежність рівнів ПКВ за контрольованим параметром $A_{\text{ПКВ}}$ різних елементів ВОЛЗ від енергетичного запасу ВОСП на довжині регенераційної ділянки.

Згідно з [4] за ПКВ приймаються: 1) порушення механічної міцності ОВ (обрив); 2) збільшення коефіцієнта загасання сигналу ОВ у ОК вище вимог, які передбачаються в ТЗ або ТУ на кабель; 3) механічна міцність ОВ визначається його початковою (вихідною) міцністю, яка забезпечується технологією виготовлення, навантаженням і вологістю в кабелі.

Зростання $\alpha_{\text{ОВ}}$ у кабелі з'являється за експлуатації ОК унаслідок: 1) власної деформації ОВ (мікро- та макровигинів); 2) виділення водню через фізико-хімічні процеси в полімерних матеріалах ОК; 3) деформації ОВ за механічною його взаємодією з елементами ОК, які викликають додаткові мікро- і макровигини.

На основі даних положень у конструкції ОК забезпечуються необхідні умови експлуатації ОВ за рахунок підбирання матеріалів елемента кабелю та різними конструктивними рішеннями (вільним укладанням волокна і

використанням армуючих елементів).

Довжина регенераційної ділянки ($l_{рд}$) ВОСП залежить як від параметрів ОК і параметрів його з'єднувачів, так і від енергетичних характеристик приймально-передавальних пристроїв. Для забезпечення якості передавання сигналів по ВОЛЗ, згідно [4], встановлюється залежність довжини регенераційної ділянки з енергетичними співвідношеннями в лінійному тракті ВОСП за виразом:

$$l_{рд} = \frac{(P_{п} - P_{пр}) - E_3 - \alpha_{рз} + \alpha_{нз}}{\alpha_{ОК} + \alpha_{нз}/l}, \quad (5.68)$$

де $l_{рд}$ – довжина регенераційної ділянки, км; $P_{п}, P_{пр}$ – абсолютні рівні потужності на виході передавального та вході приймального пристроїв відповідно, дБм; E_3 – енергетичний запас РД (6 дБ), компенсуючий характеристики старіння елементів (3 дБ), неврахованих дестабілізуючих факторів (електроживлення, температури і т.д. – 3 дБ), а також енергетичних втрат за флуктуаціями стробувальних імпульсів, неповною модуляцією джерела випромінювання та інших, неврахованих у (5.67) факторів; $\alpha_{рз}, \alpha_{нз}$ – втрати в ОВ на рознімних з'єднувачах передавальних і приймальних пристроїв (0,3...0,5) дБ і втрати на нерознімних з'єднаннях ОК (0,1...0,3) дБ на з'єднання, дБ, відповідно; $\alpha_{ОК}$ – коефіцієнт загасання ОК, дБ/км; l – будівельна довжина ОК ((2...4) км), км.

Із складових E_3 , необхідних для компенсації погіршення характеристик елементів ВОСП, звернемо увагу на складові, що компенсують старіння елемента (E_c) і його відгук на температурну середовища ($E_{тс}$). Це дозволить визначити функціональний зв'язок між допустимими (номінальними) значеннями загасання сигналу в кожному елементі ВОЛЗ і гранично допустимими значеннями загасання сигналу в цих елементах із-за старіння і відгуку на температуру навколишнього середовища. Ці гранично допустимі значення A в кожному з елементів ВОЛЗ приймаються як параметри-критерії параметричної відмови за екстремальних значень додатної і від'ємної температури, згідно з ТУ на елемент і з довідників для середовища кліматичної

зони його експлуатації.

Виходячи з того, що складові E_3 необхідні для компенсації погіршення характеристик елементів ВОЛЗ із-за їх старіння ($E_c = 3$ дБ) і неврахованих дестабілізуювальних факторів (температури і т.д.) ($E_{dc} = 3$ дБ) є загальними для всієї сукупності її елементів [4, 131]. Розподілимо E_3 ($E_3 = E_c + E_{dc}$) між елементами. Розподіл цього запасу між ОК, рознімними з'єднувачами, нерознімними з'єднаннями та іншими елементами ВОЛЗ у даний час в літературних джерелах відсутній. Точний розподіл E_3 між елементами ВОЛЗ залежить від якості кожного елемента, і може змінюватися в широких межах, для визначення яких необхідні спеціальні дослідження.

Вважаючи, що закони старіння і відгук на теплову дію пасивних елементів ВОЛЗ носять однаковий активаційний характер, а частка E_3 , що необхідна для компенсації погіршення їх характеристик, дорівнює $E'_3 = K \cdot E_3$, де $K = \overline{0,1}$ прийmemo розподілення E'_3 між цими елементами ВОЛЗ пропорційним абсолютним величинам загасань, що вноситься кожним із них у загальне загасання тракту:

$$\alpha_{\text{заг}} = \alpha_{\text{ОК}} \cdot l_{\text{рд}} + n_{\text{нз}} \alpha_{\text{нз}} + n_{\text{рз}} \alpha_{\text{рз}}, \quad (5.69)$$

де $\alpha_{\text{заг}}$ – загальне загасання на регенераційній ділянці ВОСП, дБ; $n_{\text{нз}}$, $n_{\text{рз}}$ – кількість нерознімних і рознімних з'єднань, відповідно; $\alpha_{\text{рз}}$, $\alpha_{\text{нз}}$ – втрати на рознімні та нерознімні з'єднання, відповідно, дБ.

Розрахувавши величину енергетичного запасу РД ВОЛЗ, що припадає на кожний елемент (E_{zi}), можна одержати рівень ПКВ по загасанню сигналу елемента ВОЛЗ ($\alpha_{\text{ПКВ}i}$) з виразу [4]:

$$\alpha_{\text{ПКВ}i} = \alpha_{\text{нi}} + E'_{zi}, \quad (5.70)$$

де $\alpha_{\text{ПКВ}i}$ – загасання i -го елемента ВОЛЗ, дБ; $\alpha_{\text{нi}}$ – 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.

Для визначення в першому наближенні впливу розподілу мінімального і

максимального значень E'_{zi} на вибір рівнів параметрів-критеріїв відмови кожного елемента ВОЛЗ були виконані розрахунки розподілу при $E'_3 = 2,25$ та $6,75$ дБ ($1,5$ та $4,5$ дБ). Перше значення E'_3 відповідає розподілу двох складових E_3 , коли на компенсацію погіршення характеристик ОК, рознімних з'єднувачів і нерознімних з'єднань від загальної величини $E'_{зв} = 9$ дБ (6 дБ) виділяється 25% , а на компенсацію погіршення характеристик випромінювачів і фотоприймачів – 75% . Друге значення $E'_{зв}$ відповідає зворотному відсотковому розподілу значення енергетичного запасу E_3 між активними і пасивними елементами ВОЛЗ. Для розрахунків приймалися: чотири різні довжини регенераційної ділянки $l_{рд} = 89$ км (для СТМ-1); 128 км (для СТМ-4); 72 км (для СТМ-16) та 80 км (для СТМ-64); оптичний кабель типу ОКЛБг з ОВ з нормованим коефіцієнтом загасання $0,3$ дБ/км згідно рекомендації МСЕ G.652.C; кількість будівельних довжин ОК $n = 23, 32, 18$ та 20 , відповідно, завдовжки $l_{бд} = (4 \pm 0,2)$ км; кількість рознімних з'єднувачів $q = 2$ (для СТМ-1) та 4 (для інших рівнів СТМ); втрати на нерознімному з'єднанні $\alpha_{нз} = 0,1$ дБ і на рознімному з'єднувачі $\alpha_{рз} = 0,5$ дБ.

Результати розрахунків часток E_3 , довжини регенераційної ділянки ВОЛЗ ($E'_{заг}$), що припадає на 1 кілометр, і розподілу між елементами РД: рознімним з'єднувачем ($E'_{рз}$), нерознімним з'єднанням ($E'_{нз}$) і кілометром кабелю ($E'_{\alpha ОК}$), а також рівнів їхнього параметра-критерію відмови за загасанням сигналу $\alpha_{ПКВet}$ за екстремальних значень додатної і від'ємної температури наведені в табл. 5.17, а за температури 20°C в табл. 5.18.

Визначимо частки енергетичного запасу, що припадає на 1 кілометр довжини РД ВОЛЗ, рознімний з'єднувач, нерознімне з'єднання і кілометр ОК, а також рівня параметра-критерію відмови за загасанням сигналу при тих самих умовах, що і в попередньому випадку, але тільки з урахуванням першого члена E_3 ($E_3 = E_c$). Результати розрахунків зведемо до табл. 5.17.

Рівні ПКВ, наведені в табл. 5.17, можливо використовувати для оцінки ТС

елементів ВОЛЗ при температурі навколишнього середовища $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Це пов'язано з тим, що при визначенні даних рівнів, у розрахунках з усіх складових енергетичного запасу, необхідних для компенсації погіршення загасання сигналу ОК, рознімних з'єднувачів і нерознімних з'єднань враховувалася тільки одна складова, що компенсує старіння елементів. Відмова від обліку другої складової $E_{\text{дс}}$, що враховує компенсацію відгуку загасання елементів на температурну дію навколишнього середовища, декілька обмежує використання рівнів ПКВ $\alpha_{\text{ПКВ}i}$ (табл. 5.17) на температурах, що відрізняються від $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Останнє говорить про те, що рівні ПКВ з загасання сигналу наведені в табл. 5.17 можливо використовувати для оцінки ТС елементів ВОЛЗ, які не мають температурної дестабілізації параметрів.

Аналіз даних (табл. 5.17 та 5.18) показав, що: діапазон розподілу частки енергетичного запасу E_3 на довжині РД ВОЛЗ (від $0,25 E_3$ до $0,75 E_3$), що враховує компенсацію старіння елементів та їх відгуки на екстремальні температурні дії середовища експлуатації, визначає діапазон незначних змін рівня ПКВЕТ $\alpha_{\text{ПКВЕТ}i}$ для всіх елементів, що становить $(107,6 \dots 124,0)\%$ щодо номінальних з ТУ значень загасання сигналу; діапазон розподілу частки енергетичного запасу 3 дБ на довжині РД ВОЛЗ (від $0,25 E_3$ до $0,75 E_3$), що враховує тільки компенсацію старіння елементів, та їх відгук на температурні дії ($E_{\text{т}} = 0\text{ дБ}$) при $T_1 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, визначає також незначний діапазон змін рівня ПКВ $\alpha_{\text{ПКВ}i}$ для всіх елементів, що становить $(105,0 \dots 116,1)\%$ щодо номінальних з ТУ значень загасання сигналу; за оцінки технічного стану елементів ВОЛЗ в якості рівнів параметра-критерію відмови елементів по загасанню сигналу слід вибирати середні значення $\alpha_{\text{ПКВЕТ}i}$ і $\alpha_{\text{ПКВ}i}$, що рівні, відповідно, $\alpha_{\text{ПКВЕТ}i} = 1,158 \alpha_{\text{н}i}$ та $\alpha_{\text{ПКВ}i} = 1,105 \alpha_{\text{н}i}$. Перший рівень параметра-критерію відмови елементів повинен використовуватися за оцінки їх ТС на екстремальних температурах середовища експлуатації, другий – за температури $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Таблиця 5.17 – Значення розподілу енергетичного запасу між елементами ВОЛЗ на ділянці регенерації та рівні їх ПКВ за екстремальних значень температури

Система передавання та її довжина ділянки регенерації, км	Енергетичний запас елементів ВОЛЗ, дБ:				Рівень параметра-критерію відмови з загасанням відносно номінального значення, %:			
	– чисельник (для $E_{\text{зн}} = 2,25$ дБ); – знаменник (для $E_{\text{зв}} = 6,75$ дБ)				– чисельник (для $E_{\text{зн}} = 2,25$ дБ); – знаменник (для $E_{\text{зв}} = 6,75$ дБ)			
	загаль- ний на 1 км	на рознімні з'єднувачі	на нерознімні з'єднання	на 1 км кабелю	загаль- ний на 1 км	на рознімні з'єднувачі	на нерознімні з'єднання	на 1 км кабелю
СТМ-1, 89 км	$\frac{0,075}{0,225}$	$\frac{0,038}{0,113}$	$\frac{0,0075}{0,0225}$	$\frac{0,023}{0,068}$	$\frac{107,6}{122,5}$	$\frac{107,6}{122,6}$	$\frac{107,5}{122,5}$	$\frac{107,6}{122,6}$
СТМ-4, 128 км	$\frac{0,051}{0,153}$	$\frac{0,026}{0,077}$	$\frac{0,0051}{0,0153}$	$\frac{0,015}{0,045}$	$\frac{105,1}{115,5}$	$\frac{105,2}{115,4}$	$\frac{105,1}{115,3}$	$\frac{105,0}{115,0}$
СТМ-16, 72 км	$\frac{0,089}{0,266}$	$\frac{0,044}{0,131}$	$\frac{0,0088}{0,0265}$	$\frac{0,026}{0,077}$	$\frac{108,8}{126,1}$	$\frac{108,8}{126,2}$	$\frac{108,8}{126,5}$	$\frac{108,7}{125,7}$
СТМ-64, 80 км,	$\frac{0,080}{0,239}$	$\frac{0,039}{0,117}$	$\frac{0,0079}{0,0238}$	$\frac{0,024}{0,072}$	$\frac{107,7}{123,2}$	$\frac{107,8}{123,4}$	$\frac{107,9}{123,8}$	$\frac{108,0}{124,0}$

Таблиця 5.18 – Значення розподілу енергетичного запасу між елементами ВОЛЗ на ділянці регенерації та рівні їх ПКВ за температури 20 °С

Система передавання та її довжина ділянки регенерації, км	Енергетичний запас елементів ВОЛЗ, дБ:				Рівень параметра критерію відмови з затуханням відносно номінального значення, %:			
	– чисельник (для $E_{\text{зн}} = 1,5$ дБ); – знаменник (для $E_{\text{зв}} = 4,5$ дБ)				– чисельник (для $E_{\text{зн}} = 1,5$ дБ); – знаменник (для $E_{\text{зв}} = 4,5$ дБ)			
	загаль- ний на 1 км	на рознімні з'єднувачі	на нерознімні з'єднання	на 1 км кабелю	загаль- ний на 1 км	на рознімні з'єднувачі	на нерознімні з'єднання	на 1 км кабелю
СТМ-1, 89 км	$\frac{0,050}{0,150}$	$\frac{0,025}{0,075}$	$\frac{0,0050}{0,0150}$	$\frac{0,015}{0,045}$	$\frac{105,0}{115,0}$	$\frac{105,0}{115,0}$	$\frac{105,0}{115,0}$	$\frac{105,0}{115,0}$
СТМ-4, 128 км	$\frac{0,034}{0,103}$	$\frac{0,017}{0,051}$	$\frac{0,0034}{0,0103}$	$\frac{0,010}{0,030}$	$\frac{103,4}{110,2}$	$\frac{103,4}{110,2}$	$\frac{103,4}{110,3}$	$\frac{103,3}{110,0}$
СТМ-16, 72 км	$\frac{0,059}{0,177}$	$\frac{0,029}{0,088}$	$\frac{0,0059}{0,0177}$	$\frac{0,017}{0,051}$	$\frac{105,8}{117,6}$	$\frac{105,8}{117,6}$	$\frac{105,9}{117,7}$	$\frac{105,7}{117,0}$
СТМ-64, 80 км	$\frac{0,053}{0,161}$	$\frac{0,026}{0,080}$	$\frac{0,0053}{0,0161}$	$\frac{0,016}{0,048}$	$\frac{105,2}{116,0}$	$\frac{105,2}{116,0}$	$\frac{105,3}{116,1}$	$\frac{105,3}{116,0}$

Прийняті в даний час рівні ПКВ з загасання сигналу елементів, дорівнюють допустимим (номінальним) значенням α_{ni} цих елементів з ТУ (ТЗ) не враховують енергетичні запаси на компенсацію загасання за рахунок старіння елементів і дестабілізації температурної дії середовища їх експлуатації.

5.8 Висновки до п'ятого розділу

В даному розділі з контролю технічного стану елементів ВОЛЗ та ділянки регенерації ВОСП було:

А. Виконано:

Дослідження підходів з контролю технічного стану елементів ВОЛЗ транспортної електронної комунікаційної мережі зв'язку, в рамках яких:

- а) обґрунтовані підходи до визначення випадкових величин, які описують реальні процеси виникнення відмов лінійних споруд ВОЛЗ. При цьому показано, які процеси моделювання відмов описуються дискретними та неперервними законами і розглянуті деякі відомі критерії згоди про тип закону розподілу відмов;
- б) визначено закон розподілу пошкоджень ВОЛЗ транспортної електронної комунікаційної мережі зв'язку в різних кліматичних районах країни за 13-річний період;
- в) проведено контроль технічного стану лінійних споруд ВОЛЗ за якістю та безвідмовністю роботи в гірських, рівнинних і причорноморських районах, в рамках якого було проведено:

- 1) дослідження статистичних даних розподілу напрацювання на відмову лінійних споруд ВОЛЗ; розробку методу контролю ймовірнісних показників надійності лінійних споруд ВОЛЗ при початковому терміні експлуатації;

- 2) розробку методу контролю механічного стану оптичного волокна діелектричного самоутримного оптичного кабелю при експлуатації шляхом визначення розтягувальних/стискальних навантажень, які діють на оптичне волокно при дії на кабель механічних та фізико-кліматичних факторів зони експлуатації. Це дало змогу сформулювати послідовність контролю механічного стану оптичного волокна при експлуатації ДСОК;

3) розробку способу визначення параметрів оцінки технічного стану елементів ВОЛЗ ділянки регенерації ВОСП шляхом розподілу загального енергетичного запасу ВОСП на ділянці регенерації між елементами лінії зв'язку та рівнів їх ПКВ за екстремальних значень температури. Це дозволило встановити функціональний зв'язок між допустимими (номінальними) значеннями загасання сигналу в кожному елементі ВОЛЗ і гранично допустимими значеннями загасання сигналу в цих елементах за рахунок їхнього старіння і відгуку на температурну дію навколишнього середовища. Ці гранично допустимі значення A в кожному з елементів ВОЛЗ запропоновано прийняти як параметри-критерії параметричної відмови за екстремальних додатної і від'ємної температур.

Б. Встановлено, що:

а) на основі обробки статистичних даних про кількість, причину, характер і тривалість за роками пошкоджень лінійних споруд ВОЛЗ транспортної електронної комунікаційної мережі зв'язку в умовах Закарпатської (гірський район), Донецької (рівнинний район) та Одеської (причорноморський район) областей за 13-річний період: розподіл кількості їх пошкоджень підкоряється закону розподілу Пуассона при рівні значущості $\alpha' = 0,05$; одержані розподіли ймовірностей появи пошкоджень лінійних споруд ВОЛЗ в цих областях дозволяють визначати частість (ймовірність) виникнення певної кількості відмов та точкові оцінки показників надійності;

б) на основі обробки статистичних даних за 13 років експлуатації лінійних споруд ВОЛЗ про час напрацювання на відмову в усіх кліматичних районах, використовуючи критерій згоди Пірсона: розподіл T_{opL}^n підкоряється експоненціальному закону розподілу при рівні значущості $\alpha' = 0,05$; одержані ймовірності його розподілу лінійних споруд ВОЛЗ по областям дозволяють визначати ймовірність напрацювання ліній на відмову в межах кліматичного району та визначати ймовірнісні показники надійності;

в) використовуючи розроблений метод контролю ймовірнісних показників надійності лінійних споруд ВОЛЗ при початковому етапі експлуатації та

результати аналізу значень m_L , T_{0pL}^n , $t_{счвз}$, $K_{гЛ}$ за 5-річний термін часу експлуатації цієї лінії, відсотки їх зміни від початкових значень складають у: щільності відмов +15 %; середнього часу між відмовами мінус 27 %; середнього часу відновлення зв'язку +9,9 %; коефіцієнта готовності мінус 0,08 %. Ці зміни незначні, але вони вказують на необхідність лінійному персоналу підприємств зв'язку звернути увагу на оптимізацію своєї роботи;

г) зміни механічних та фізико-кліматичних навантажень умов експлуатації спричиняють різні за величиною поздовжні деформації ДСОК та ОВ в цілому, а марка кабелю ОКЛ-3-Д2А14 з заданими параметрами конструкції при довжині прольоту ПВОЛЗ 100 м при найгірших умовах Одеської кліматичної зони забезпечує механічну цілісність ОВ при додатковому відносному видовженні 0,16 %, але за фактичним розтягувальним зусиллям не відповідає нормі – 2,6 кН;

д) за результатами розрахунку 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 параметра-критерію відмови елементів по загасанню сигналу вибирати середні значення $\alpha_{ПКВETi}$ і $\alpha_{ПКВi}$, які дорівнюють, відповідно, $\alpha_{ПКВETi} = 1,158 \alpha_{ni}$ (за екстремальних температур середовища експлуатації) та $\alpha_{ПКВi} = 1,105 \alpha_{ni}$ (за температури 20 °C).

В. Рекомендовано:

а) приведені результати досліджень з контролю ТС лінійних споруд ВОЛЗ за якістю та безвідмовністю роботи і за визначеними рівнями ПКВ елементів ВОЛЗ ділянки регенерації ВОСП за загасанням сигналу слід вважати рекомендаційними матеріалами для лінійного персоналу підприємств зв'язку;

б) використовувати отримані розподіли p_i появи пошкоджень та T_{0pL}^n лінійних споруд ВОЛЗ в цих областях для визначення частоти (ймовірності) виникнення певної кількості відмов і часу напрацювання ліній на відмову в межах кліматичного району та їх ймовірнісних показників надійності;

в) 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;

г) використовувати для застосування відповідними підрозділами з технічної експлуатації телекомунікаційних ліній на мережах зв'язку на базі підвісних оптичних кабелів;

д) визначені рівні ПКВ елементів лінії за загасанням сигналу, значення яких подані в табл. 5.17 та табл. 5.18, можливо використовувати для контролю ТС різних елементів ВОЛЗ.

РОЗДІЛ 6

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ЛІНІЙ ЗВ'ЯЗКУ КОМПЛЕКТАМИ ЗІП

6.1 Загальні передумови та постановка задачі

Запасні частини, інструменти та приладдя – комплект, призначений для експлуатації та ремонту техніки різного призначення. До ЗІП належать складені одиниці, блоки, компоненти необхідні для підтримання та відновлення працездатності, справності техніки при технічному обслуговуванні та ремонті [4, 131, 202, 203].

Для забезпечення високої експлуатаційної надійності такого великого та складного об'єкту телекомунікаційної системи як ВОЛЗ мережі зв'язку надається система забезпечення їх працездатності, яка включає діагностичні та ремонтні засоби, комплекти запасних елементів, кошти доставки запасних елементів і т.п. Умовно сукупність всіх запасів конструктивних елементів, що входять в систему забезпечення працездатності об'єкта, називається системою запасних інструментів та приладь [204].

Запасні частини ЗІП відіграють критичну роль у забезпеченні безперебійності та надійності мереж оптичного зв'язку, допомагаючи зберегти продуктивність і доступність мережі навіть у випадку відмови обладнання. Під час появи пошкоджень, що супроводжуються відмовою певного фрагменту мережі або окремої ВОЛЗ, наявність (доступність) до елементів ЗІП дозволить швидко виконати відновлення зв'язку.

До ключових ролей ЗІП можливо віднести:

1. Забезпечення готовності до підтримання зв'язку під час аварій: запасні частини ЗІП, такі як оптичні трансивери, комутатори, маршрутизатори, оптичні кабелі, з'єднувальні муфти, пігтейли, патчкорди і інші елементи мережі, можуть бути встановлені як резервні, готові негайно взяти на себе функції основних

елементів мережі в разі їх відмови або аварійних ситуацій.

2. Зниження часу відновлення зв'язку: наявність запасних частин дозволяє оперативно замінювати елементи мережі, які спричинили відмову, знижуючи час відновлення послуг і запобігаючи тривалим перервам у роботі ВОЛЗ та мереж на їх основі.

3. Забезпечення неперервного зв'язку: запасні частини ЗІП дозволяють підтримувати неперервний зв'язок у разі відмови або пошкодження основних елементів мережі, що забезпечує надійність і доступність мережі для користувачів.

4. Мінімізація втрат продуктивності: наявність запасних частин ЗІП допомагає знизити втрати продуктивності мережі у разі відмови обладнання, оскільки можна швидко відновити роботу мережі без тривалих перерв у роботі.

5. Підтримка стандартів безпеки і зв'язку: запасні частини ЗІП можуть бути налаштовані відповідно до стандартів безпеки та протоколів зв'язку, що забезпечує сумісність з існуючими мережними пристроями та дозволяє зберігати високий рівень захищеності мережі.

6.1.1 Структура системи ЗІП

У практиці забезпечення об'єктів технічної експлуатації ВОЛЗ запасними елементами використовуються різноманітні і складні структури систем ЗІП, але, як правило, будь-яку практично використовувану систему ЗІП можна побудувати з наступних комплектів [204]:

- одиночний комплект заміни (ОКЗ) надається безпосередньо об'єкту технічної експлуатації з метою забезпечення його надійності при тривалому використанні;
- груповий комплект ЗІП (ГКЗ) передається групі ОТЕ для їх поповнення ОКЗ у міру витрачання або для забезпечення надійності виробів за типами елементів, які відсутні в номенклатурі ОКЗ;
- ремонтний комплект ЗІП (РКЗ) (комплект підрозділу технічної

експлуатації) надається аварійно-відновлювальній бригаді ОТЕ для забезпечення його працездатності ВОЛЗ. Функціонування ремонтного органу (РО) експлуатації полягає в усуненні відмов в несправних елементах за рахунок виявлення та заміни в них більш дрібних конструктивних елементів, що відмовили.

Для технологічної бази сучасних ВОЛЗ характерна наявність трьох рівнів складності – типових елементів заміни (ТЕЗ) [204]:

- ТЕЗ1 – найдрібніший конструктивний елемент (роз’ємний з’єднувач, пігтейли, патчкорди та ін.), ремонту не підлягає;
- ТЕЗ2 складається з ТЕЗ1, ремонтується за рахунок заміни відмови ТЕЗ1;
- ТЕЗ3 складається з ТЕЗ2, ремонтується за рахунок заміни відмови ТЕЗ2.

Аварійно-відновлювальні бригади при РО для ремонту ТЕЗ3 повинна бути забезпечена запасом ТЕЗ2, а АВБ для ремонту ТЕЗ2 – запасом ТЕЗ1.

Оскільки рівні складності ТЕЗ для ВОЛЗ обмежуються трьома або двома рівнями, а ієрархія рівнів системи складається із одиночного і групового ЗІП. Можливо представити загальну структуру ЗІП ОТЕ ВОЛЗ у вигляді (рис. 6.1). Вона включає 6 комплектів: одиночний (1), груповий (2), і 4 ремонтних, з яких два (3, 4) передаються АВБ, поєднаним із ЗІП окремої ВОЛЗ, а два інших (5, 6) – АВБ, поєднаним з комплектом групи ВОЛЗ ГКЗ.

Одиночний і груповий комплекти в загальному випадку містять запаси ТЕЗ1, ТЕЗ2 і ТЕЗ3, причому деякі запасні елементи відсутні в одиночному комплекті і поставляються об’єкти безпосередньо з групового комплекту. Ремонтні комплекти 3, 5 містять запаси ТЕЗ2, які можуть поповнюватися за рахунок ремонтних комплектів 4, 6, а також за рахунок невичерпного джерела. Ремонтні комплекти 4, 6 містять запаси ТЕЗ1, які поповнюються за рахунок невичерпного джерела (запаси в комплектах 3,4 також можуть поповнюватись за рахунок групового). Запаси елементів в одиночному комплекті можуть поповнюватися за рахунок комплектів 2, 3, 4 и невичерпного джерела. На рис. 6.1 стрілками вказані можливі напрямки руху запасних елементів.

Практично реалізовані структури системи ЗІП є окремими випадками цієї

загальної структури. Розглянемо кілька типових структур системи ЗІП.

1. Система ЗІП ОТЕ лінії, що забезпечує надійність ВОЛЗ, яка складається тільки з одиночного комплекту. У цьому випадку передбачається, що в міру свого витрачання ОКЗ поповнюється з невичерпного джерела (рис. 6.2) [204].

2. Система діагностики визначає несправність ВОЛЗ з точністю до ТЕЗ3. Запас ТЕЗ по всій номенклатурі елементів ВОЛЗ становить ОКЗ. При ОТЕ ВОЛЗ є два РО: РО1 дозволяє своїй АБВ ремонтувати ТЕЗ3 шляхом заміни в них відмовивших ТЕЗ2, а РО2 своїй АБВ2 – ТЕЗ2 шляхом заміни в них ТЕЗ1, що відмовили. Така система ЗІП складається з трьох комплектів: запас ТЕЗ3 – одиночний комплект; запас ТЕЗ2 – перший ремонтний комплект (РК1); запас ТЕЗ1 – другий ремонтний комплект (РК2) (рис. 6.3) [204].

3. Волоконно-оптична лінія зв'язку ремонтується за рахунок заміни у ній ТЕЗ2, що відмовили. Одиночний комплект ЗІП – запас ТЕЗ2 за частиною елементів номенклатури ВОЛЗ – безупинно поповнюється з ГКЗ. Останній містить запаси ТЕЗ2 по всій номенклатурі елементів лінії і поставляє безпосередньо ОТЕ ті елементи, запаси яких відсутні в одиночних комплектах. Груповий комплект, суміщений з комплектом РО, що дозволяє ремонтувати ТЕЗ2 шляхом заміни в них несправних ТЕЗ1. У цьому випадку система ЗІП, придана групі з S ідентичних ВОЛЗ, складається з $S+2$ комплектів ЗІП: S ідентичних одиночних комплектів – запаси ТЕЗ2 на всі групи; груповий комплект – обмінний фонд для безперервного поповнення S одиночних комплектів і відновлення працездатності ліній; ремонтний комплект – запас ТЕЗ1 для ремонту ТЕЗ2 (рис. 6.4) [204].

6.1.2 Показники достатності системи ЗІП

Об'єкт технічної експлуатації ВОЛЗ передбачає використання системи ЗІП, то має сенс говорити не про показник його надійності, а про показник надійності пари «об'єкт – система ЗІП». Однак існуюча практика проєктування надійних ОТЕ лінії передбачає окремі його проєктування і приданої йому системи ЗІП.

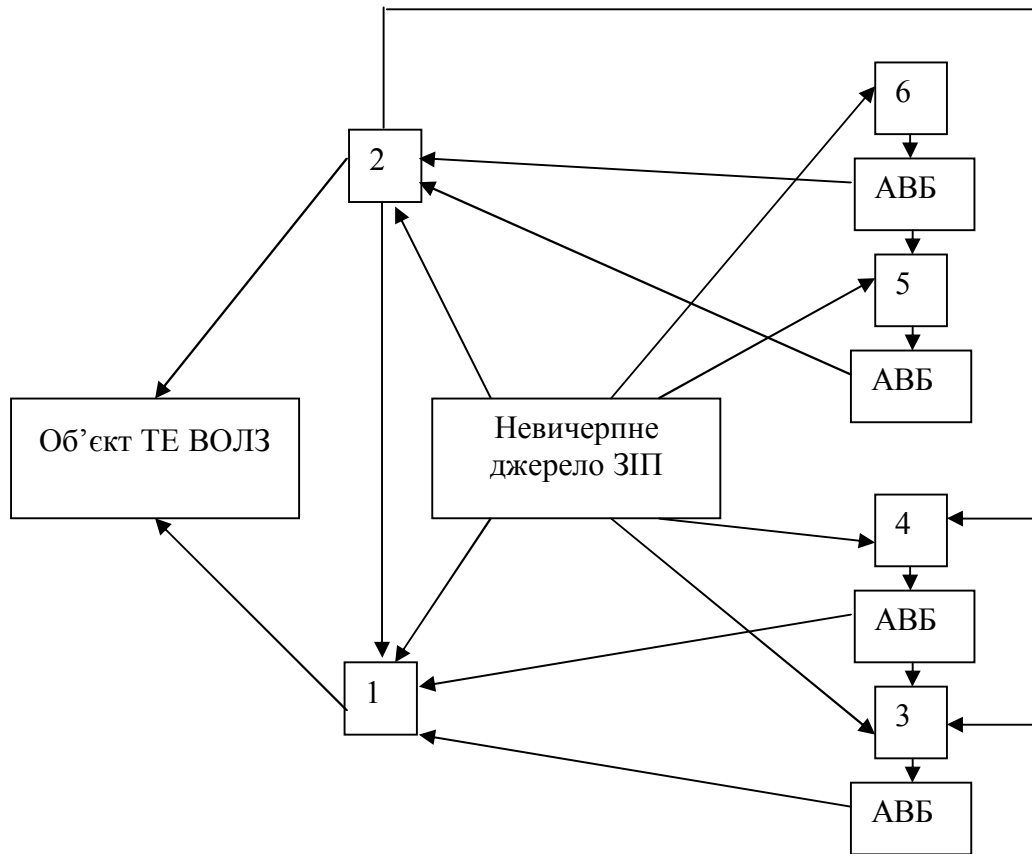


Рисунок 6.1 – Загальна структура системи ЗІП об'єкта технічної експлуатації
ВОЛЗ: 1 – ОКЗ, 2 – ГКЗ, 3, 4, 5, 6 – РКЗ

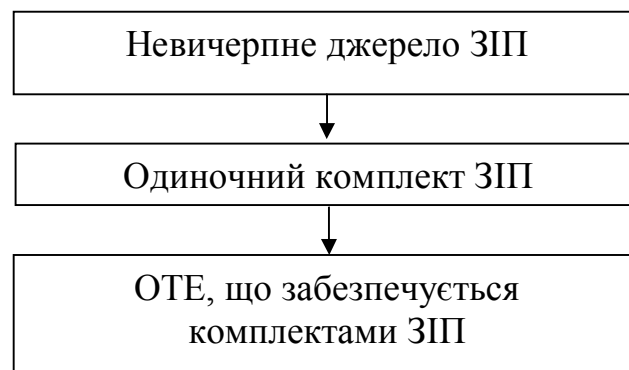


Рисунок 6.2 – Система ЗІП об'єкта технічної експлуатації,
що складається тільки з ОКЗ

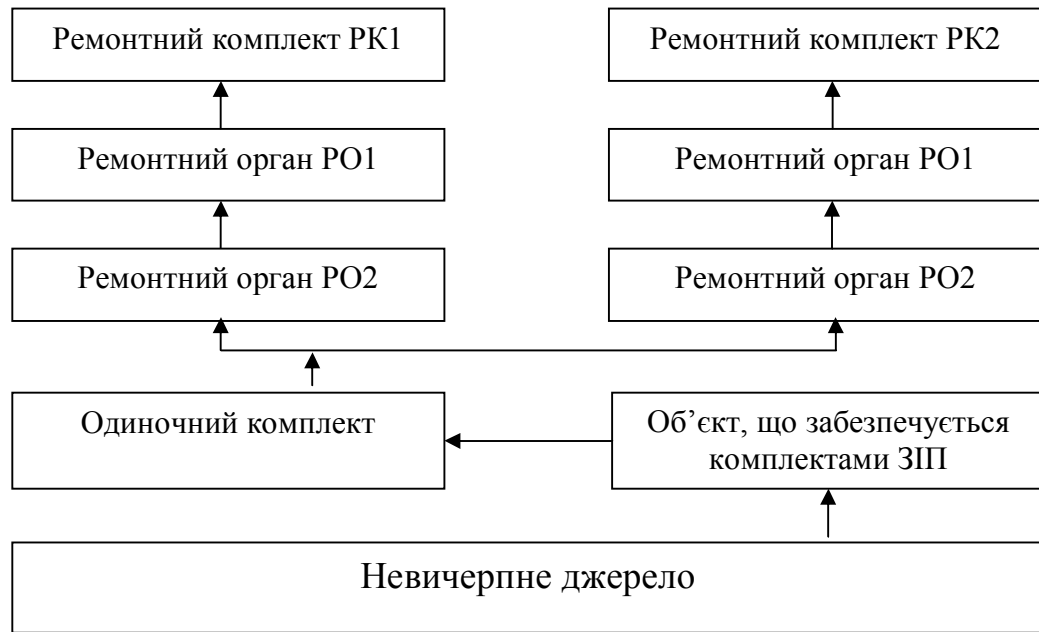


Рисунок 6.3 – Структура системи ЗІП об'єкта технічної експлуатації, поєднаного з двома ремонтними органами

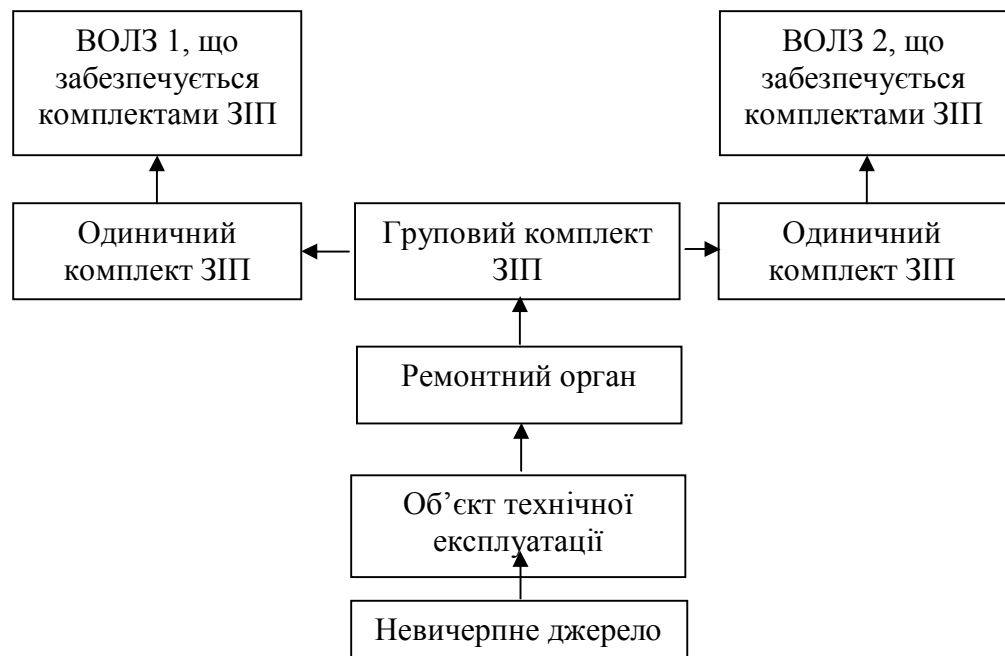


Рисунок 6.4 – Структура системи ЗІП групи ВОЛЗ, що обслуговуються об'єктом технічної експлуатації

Тому вводиться показник достатності системи ЗІП, який характеризує зниження надійності пари «об'єкт – конкретна система ЗІП» в порівнянні з надійністю пари «об'єкт – безкінечна система ЗІП» [204].

Показником достатності системи ЗІП може бути середній час затримки Δ^* у виконанні заявки на запасний елемент, затримка визивається можливою відсутністю необхідного запасного елемента в системі ЗІП. З усіх параметрів, що визначають надійність ОТЕ лінії, обмеженість системи ЗІП позначається тільки на часі ремонту об'єкта. Він збільшується при відсутності в системі ЗІП необхідного запасного елемента у той момент, коли він знадобиться. Середній час ремонту об'єкта, забезпеченого конкретною системою ЗІП визначається згідно до [204]:

$$t_{\text{счр}} = t_{\text{счр}\infty} + t_{\text{сз}}, \quad (6.1)$$

де $t_{\text{счр}}$ – середній час ремонту ВОЛЗ, год; $t_{\text{счр}\infty}$ – заданий середній час ремонту при наявності запасного елемента, год; $t_{\text{сз}}$ – середній час затримки у виконанні заявки на запасний елемент, год.

Величина $t_{\text{счр}\infty}$ не залежить від системи ЗІП, вона визначена до етапу її проектування, визначається параметрами функціонування і структурою системи ЗІП. При проектуванні роботи ОТЕ ВОЛЗ вимоги до його надійності виражаються заданням необхідного показника надійності (R_0).

Після того як закінчено проектування власно ОТЕ ВОЛЗ, можливо вважати відомими розраховані значення функції $R(t)$ – показника його надійності в залежності від середнього часу ремонту при вимогах, що необхідний запасний елемент є завжди.

Тоді вимоги до системи ЗІП, що забезпечує задану надійність ОТЕ, виражається обмеженням на показник достатності системи ЗІП [204] за виразом:

$$t_{\text{сз}} \leq \Delta_0 = \tilde{t} - t_{\text{счр}\infty} \quad (6.2)$$

де $t_{\text{сз}}$ – середній час затримки у виконанні заявки на запасний елемент, год; Δ_0 – задане значення показника достатності системи ЗІП ВОЛЗ; $\tilde{t}$ – корінь рівняння $R(t) = R_0$, год; $t_{\text{счр}\infty}$ – заданий середній час ремонту при наявності запасного елемента.

Задача проектування системи ЗІП ВОЛЗ зводиться до знаходження такої системи ЗІП, показник достатності якої буде не більше за Δ_0 .

Приклад 6.1. Розглянемо задачу, яка вирішується при проектуванні ЗІП ВОЛЗ. Умови задачі. Волоконно-оптична лінія зв'язку буде володіти резервною групою ідентичних елементів із номенклатури лінії. Вважається, що: ця група має m_{oe} основних і 1 резервний елемент; елементи не відмовляють, знаходячись в резерві; контроль несправності – повний, а переключення, якщо воно є, миттєве. Будемо також допускати, що відновлення відмовлених елементів не обмежене. Нехай показником надійності ВОЛЗ вибрано T_{0pL}^H , а вимоги до нього і вимоги до надійності лінії виражені нерівністю $T_{0pL}^H \geq T_0$. Необхідно визначити вимоги до достатності ЗІП.

Розв'язання. Залежність T_{0pL}^H ВОЛЗ від середнього часу її ремонту в такому випадку буде дорівнювати:

$$T_{0pL}^H(t_{счр}) = (m_{oe} \cdot \lambda_{pe} \cdot t_{счр} + 1) / (t_{счр} \cdot m_{oe}^2 \cdot \lambda_{pe}^2), \quad (6.3)$$

де $T_{0pL}^H(t_{счр})$ – показник надійності ВОЛЗ, що залежить від середнього часу його ремонту, год; m_{oe} – кількість основних елементів ЗІП; λ_{pe} – інтенсивність відмов одного працюючого елемента на лінії довжиною L .

Нехай $t_{счр\infty}$ вимога до системи ЗІП, що забезпечує задану надійність лінії буде виражатися згідно (6.2) рівнянням [204]:

$$\tilde{t}_{сз} - t_{счр\infty} = \frac{1}{T_{0pL}^H(m_{oe} \lambda_{pe})^2} - t_{счр\infty}, \quad (6.4)$$

де $\tilde{t}_{сз}$ – корінь рівняння $T_{0pL}^H(t_{счр}) = T_{0pL}^H$; $t_{счр\infty}$ – заданий середній час ремонту при наявності запасного елемента, год; $T_{0pL}^H(t_{счр})$ – залежність середнього часу напрацювання на відмову ВОЛЗ від середнього часу її ремонту, год; T_{0pL}^H – значення середнього часу напрацювання на відмову ВОЛЗ, що вимагається.

Таким чином, який би показник надійності ВОЛЗ не був вибраний, вдається виділити вимоги до системи ЗІП з вимог до надійності пари «ВОЛЗ –

система ЗП». Але тут виникає деяка розрахункова трудність, пов'язана з необхідністю розв'язувати рівняння $R(t_{\text{ср}}) = R_{0pL}$. В окремому випадку, коли показником надійності ВОЛЗ вибрано коефіцієнт готовності лінії, ці труднощі вдається подолати, вводячи інший показник достатності ЗП – коефіцієнт готовності системи ЗП.

Коефіцієнт готовності системи ЗП називається середня у часі ймовірність того, що система ЗП не знаходиться в стані відмови. Тоді він буде дорівнювати [204]:

$$K^* = \lim_{T_0 \rightarrow \infty} \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} P^*(t) dt = \frac{T^*}{T^* + t^*}, \quad (6.5)$$

де K^* – коефіцієнт готовності системи ЗП; T_0 – значення середнього часу напрацювання на відмову ВОЛЗ, що вимагається, год; $P^*(t)$ – ймовірність того, що в момент t система ЗП не знаходиться в стані відмови; T^* – середній час між відмовами системи ЗП; t^* – середня тривалість однієї відмови системи ЗП (тут індексом $*$ відмічені показники системи ЗП).

Відмовою системи ЗП умовно називається такий стан пари «ВОЛЗ – система ЗП», при якому лінія повністю або частково втрачає працездатність через відмови однієї із складових її елементів, а система ЗП не може забезпечити необхідного запасного елемента. З визначення слідує, що відмова системи ЗП не обов'язково співпадає відмовою лінії виконувати вимоги на елемент, а лише з такою відмовою у виконанні вимоги, яка веде до простою ВОЛЗ.

Нехай показником надійності пари «ВОЛЗ – система ЗП» обрано результуючий коефіцієнт готовності $K_{\Sigma} \approx K_{\infty} K^*$, де K_{∞} – коефіцієнт готовності лінії при нескінченній системі ЗП; K^* – коефіцієнт готовності системи ЗП.

Задані вимоги до системи ЗП в такому випадку зводяться до нерівності [204]:

$$K^* \geq K_0^* = R_0 / K_{\infty}, \quad (6.6)$$

де K^* – коефіцієнт готовності системи ЗП; K_0^* – коефіцієнт готовності системи

ЗІП, що вимагається; R_0 – вимагаєме значення коефіцієнт готовності ВОЛЗ з урахуванням реальної системи ЗІП; K_∞ – коефіцієнт готовності ВОЛЗ при нескінченній системі ЗІП.

Простота, а також практична важливість цього випадку вимагає розглядати коефіцієнт готовності системи ЗІП як другий показник достатності системи ЗІП.

6.1.3 Задачі оптимізації системи ЗІП при її проєктуванні

Оптимізація проєктування системи ЗІП ВОЛЗ зводиться до пошуку кількості запасних елементів (ЗЕ) по усій номенклатурі комплектів, як створюють задану структуру системи ЗІП. Цей пошук необхідний для того, щоб в залежності від показника достатності виконувалося нерівність (6.2) або нерівності (6.6) при мінімумі загальних витратах на ЗІП.

Постановку цієї задачі можливо звести до деяких прикладів.

1. Проєктування одиночного комплекту ЗІП, мінімального по загальній кількості ЗЕ та забезпечуючого задане значення коефіцієнта готовності пари «ВОЛЗ – система ЗІП». Ця задача зводиться до пошуку $n_1 \geq 0, \dots, n_N > 0$, згідно до [204], що реалізують:

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^N n_i / K^*(n) \geq K_0 = R_0 / K_\infty \right\}, \quad (6.7)$$

де N – кількість типів елементів в даному комплекті ЗІП; n_i – початкова кількість ЗЕ i -го типу в даному комплекті ЗІП; $K^*(n)$ – показник достатності системи ЗІП ВОЛЗ при початковій кількості ЗЕ даного типу в даному комплекті; K_0 – вимагаєме значення показника достатності ЗІП; R_0 – вимагаєме значення коефіцієнта готовності ВОЛЗ з урахуванням заданої системи ЗІП; K_∞ – коефіцієнт готовності ВОЛЗ при нескінченній системі ЗІП.

2. Оптимізація проєктування групового і S поповнюваних із нього ідентичних ОКЗ. Задана структура системи ЗІП припускає наявність двох різних комплектів ЗІП ($M = 2$): одиночного ($j = 1$) і групового ($j = 2$). Нехай показником

витрат на систему ЗІП вибрана загальна вартість всіх ЗЕ, в показником достатності – середній час затримки у виконанні заявки на ЗЕ. Тоді оптимізація проєктування системи ЗІП такої структури зводиться до пошуку $n_1 > 0, n_2 > 0$, які реалізуються згідно до [204]:

$$\min \left\{ \sum c_i (n_{i2} + S n_{i1}) / \Delta^*(n_1, n_2) \leq \Delta_0 \right\}, \quad (6.8)$$

де c_i – вартість одного елемента i -го типу; n_{i1}, n_{i2} – початкові кількості запасних елементів i -го типу в першому та другому комплектах ЗІП, відповідно; S – кількість поповнюваних ідентичних комплектів ЗІП ВОЛЗ; $\Delta^*(n_1, n_2)$ – показник достатності даної системи ЗІП ВОЛЗ; Δ_0 – вимагаєме значення показника достовірності ЗІП ВОЛЗ.

3. Оптимізація проєктування системи ЗІП ОТЕ, сумісного з РО. Задана структура системи ЗІП включає два різних комплекти ($M = 2$) і одиночний ($j = 1$), приданий об'єкту, і ремонтний ($j = 2$), який забезпечує роботу РО. Нехай показником витрат на систему ЗІП вибрано загальний об'єм всіх ЗЕ, а показником достатності – коефіцієнт готовності системи ЗІП лінії. Тоді задача оптимізація проєктування такого двухкомплетного ЗІП лінії зводиться до пошуку $n_1 > 0, n_2 > 0$, що реалізують згідно до [204]:

$$\min_{n_1, n_2} \left\{ \sum_{i=1}^{N_1} c_{i1} n_{i1} + \sum_{i=1}^{N_2} c_{i2} n_{i2} / K^*(n_1, n_2) \geq K_0 \right\}, \quad (6.9)$$

де N_1, N_2 – кількість типів елементів в першому та другому комплектах ЗІП; c_{i1}, c_{i2} – об'єм одного елемента i -го типу по номенклатурі першого і другого комплекту; $K^*(n_1, n_2)$ – показник достатності системи ЗІП при n_1, n_2 запасних елементів даних типів в даних комплектах; K_0 – коефіцієнт готовності ВОЛЗ з урахуванням заданої систем ЗІП.

Розглянуті параметри показують, що задачі оптимізації проєктування систем ЗІП вельми різноманітні, але в той же час ясно, що при їх вирішенні виникають дві проблеми: обчислення показників достатності системи ЗІП K^* і Δ^* і розв'язання цілочисленних задач математичного програмування типу

(6.7)... (6.9).

6.2 Стратегія поповнення запасів комплектів ЗІП лінії

Будь-який комплект ЗІП складається з запасів певних ТЕЗ різних рівнів складності. Ці запаси в залежності від типу елементів і структури системи ЗІП змінюються по-різному: різні як потоки заявок, що поступають в комплект ЗІП на елементи різних типів, так і стратегії поповнення запасів, тобто правила відновлення запасів по мірі їх витрачання. На практиці в системі забезпечення ВОЛЗ запасними елементами використовуються такі стратегії поповнення запасів [204]:

1. Періодичне поповнення ($\alpha = 1$). При ньому ЗЕ даного типу періодично, через задані фіксовані періоди поповнення відновлюється до початкового рівня. Ця стратегія є самою розповсюдженою на практиці. Вона застосовується для поповнення усіх видів комплектів ЗІП. Дана стратегія поповнення ЗЕ i -го типу характеризується одним числовим параметром $T_{i1} = T_{\pi}$ (T_{i1} – числовий параметр стратегії поповнення запасу i -го елемента, T_{π} – період поповнення запасу елементів даного типу).

2. Періодичне поповнення з терміновими доставками ($\alpha = 2$). При цій стратегії крім планового періодичного відновлення, відбувається ще й позапланове відновлення запасу до початкового рівня у тому випадку, коли лінія не діє через відсутність ЗЕ відповідного типу. Ця стратегія застосовується тільки для відновлення запасів в одиночному комплекті ЗІП. Вона характеризується двома параметрами: $T_{i1} = T_{\pi}$, $T_{i2} = T_{\text{ед}}$ (T_{i2} – числовий параметр стратегії поповнення запасу з терміновими доставками i -го елемента, $T_{\text{ед}}$ – період поповнення запасу з терміновими доставками елементів заданого типу).

3. Ремонт, відновлення елементів лінії, що відмовили. Одночасно з заявкою на ЗЕ сам несправний елемент (муфта, пігтейл, патчкорд та інше) поступає до відповідного РО та після ремонту повертається у той же запас, за рахунок якого

задовольнялася заявка. Роль РО в забезпеченні ЗЕ аварійно-відновлювальної бригади закладається в поставці елемента із ГКЗ або з невичерпного джерела постачання (в цьому випадку часом ремонту слід рахувати час доставки з джерела поповнення). Вирази для розрахунку показників достатності запасу відновлюваних елементів істотно залежить від таких видів пропускної здатності відповідного РО: необмежене відновлення ($\alpha = 3$) – одночасно можливо ремонтувати скільки завгодно елементів даного типу; повністю обмежене відновлення ($\alpha = 4$) – одночасно ремонтується не більш одного елемента даного типу. Усі ці частини стратегії поповнення характеризуються одним параметром $T_{i1} = T_p$ (T_{i1} – числовий параметр стратегії поповнення запасу i -го елемента даного типу; T_p – середній час ремонту одного елемента даного типу). Ремонт відмовивших елементів використовується для відновлення запасів в одиночному, груповому і ремонтному комплектах ЗІП.

4. Безперервне поповнення (поповнення за рівнем запасу). При використанні цієї стратегії для запасу елементів даного типу фіксується ціле число k_{pz} ($0 \leq k \leq n/2 - 1$, де n – початковий рівень запасу), і, коли запас елементів даного типу вичерпується до рівня k_{pz} , посиляється заявка на поставку $n-k$ елементів даного типу. Заявка задовольняється через випадковий час t_d . При безперервному поповненні заявка може бути відправлена тільки після виконання попередньої, незалежно від того, чи відмовляли елементи даного типу в процесі задоволення заявки або ні. Показники достатності ЗЕ сильно залежать від гіпотези про розподіл часу виконання заявки на поповнення (t_d). Зазвичай на практиці приймається один з двох варіантів розподілу: t_d – час розподілений за експоненціальним законом ($\alpha = 5$); t_d – фіксовано ($\alpha = 6$). Стратегія безперервного поповнення використовується для відновлення запасів тільки в одиночних комплектах ЗІП і характеризується двома чисельними параметрами: $T_{i1} = T_d$, $T_{i2} = k$.

6.3 Склад розрахунку показників достатності системи ЗІП складної структури

Склад розрахунку показників достатності системи ЗІП складної структури (який скаляється більше, ніж з одного комплекту) можливо звести до послідовного розрахунку показників по всій номенклатурі всіх комплектів ЗІП.

Показником достатності запасу елементів i -го типу в j -ому комплекті ЗІП можна прийняти: Δ_{ij}^* – середній час затримки у виконанні заявки на запасний елемент i -го типу, який поступає в j -ий комплект ЗІП.

Для запасу елементів i -го типу в одиночному комплекті ЗІП при умові, що в ньому передбачено запаси елементів по всій номенклатурі об'єкта, можна розглядати як його достатність і K_i^* – коефіцієнт готовності запасу елемента i -го типу – середню в часі ймовірність того, що одиночний комплект не знаходиться в стані відмови по елементам i -го типу.

Для будь-якого комплекту ЗІП справедливий такий наближений вираз [204]:

$$\Delta_j^*(n_j, \tau_j) \approx \frac{1}{\Lambda_j} \sum_{i=1}^{N_j} \Lambda_{ij} \Delta_{ij}^*(n_{ij}, \tau_{ij}), \quad (6.10)$$

де Δ_j^* – показник достатності j -го комплекту ЗІП; n_j – початковий рівень запасу в j -му комплекті; τ_j – числовий параметр стратегії поповнення запасу; Λ_j – середня кількість заявок на елемент в j -му комплекті за одиницю часу; i – номер елемента в комплекті; N_j – кількість типів елементів в j -му комплекті; Λ_{ij} – середня кількість заявок на i -ий елемент в j -му комплекті з одиницю часу; Δ_{ij}^* – середній час затримки у виконанні заявки на запасний елемент i -го типу, який поступає в j -ий комплект ЗІП; n_{ij} – початковий рівень запасу i -го елемента в j -му комплекті; τ_{ij} – числовий параметр стратегії поповнення запасу на i -ий елемент в j -му комплекті.

Для одиночного комплекту ЗІП справедливий вираз з визначення

коефіцієнта готовності запасу елемента [204]:

$$K^*(n_j, \tau_j) = \prod_{i=1}^N K_i^*(n_{i1}, \tau_{i1}), \quad \tau_j = (\tau_{ij}, i=1, \dots, N_j), \quad (6.11)$$

де $K^*(n_j, \tau_j)$ – коефіцієнт готовності запасу елемента; n_j – початковий рівень запасу в j -му комплекті; τ_j – числовий параметр стратегії поповнення запасу; i – номер елемента в комплекті; N – кількість типів елементів в комплекті; $K_i^*(n_{i1}, \tau_{i1})$ – коефіцієнт готовності запасу i -го елемента; n_{i1} – початковий рівень запасу i -их елементів в одиночному комплекті; τ_{i1} – числовий параметр стратегії поповнення запасу i -их елементів в одиночному комплекті; τ_j – числовий параметр стратегії поповнення запасу в j -му комплекті; N_j – кількість типів елементів в j -му комплекті.

Для показників достатності системи ЗІП справедливий наближений вираз [204]:

$$\Delta^* \approx \frac{1}{\Lambda_0} \sum \Lambda_{0i} \Delta_{i(k),j(k)}^*, \quad (6.12)$$

де $j(k)$ – номер комплекту, який поставляє елементи k -го типу; $i(k)$ – номер елементів k -го типу по номенклатурі $j(k)$ -го комплекту ЗІП.

Таким чином, знаючи показники достатності запасів елементів по всій номенклатурі комплекту, можливо розрахувати показники достатності будь-якого комплекту ЗІП і системи ЗІП.

Нехай відомі залежності $\Delta_0^*(n_{ij}, \tau_{ij})$ та $K_i^*(n_{i1}, \tau_{i1})$ показників достатності запасів від n_{ij} – початкового рівня запасу і τ_{ij} – числового параметра стратегії поповнення запасу (середнього часу ремонту або доставки). Тоді з урахуванням обмеженості джерела поповнення показник достатності запасів елементів буде складати [204]:

$$\Delta_{ij}^* = \Delta_{ij}^*(n_{ij}, \tilde{\tau}_{ij}), \quad \tau_{ij} = \tilde{\tau}_{ij\infty} + \Delta_k^*, \quad (6.13)$$

де k – номер комплекту, за рахунок якого поповнюється даний запас; $\tilde{\tau}_{ij\infty}$ – заданий параметр стратегії поповнення запасу з невичерпного джерела.

Якщо запас елементів поповнення з невичерпного джерела, то його показник достатності системи ЗІП та коефіцієнт готовності запасу елементу розраховуються як: $\Delta_{ij}^*(n_{ij}, \tau_{ij\infty})$, $K_i^*(n_{i1}, \tau_{i1\infty})$.

Таким чином, можна розрахувати Δ_{ij}^* показник достатності запасу, якщо відомо Δ_k^* – показник достатності комплекту ЗІП, за рахунок якого виконується даний запас.

Послідовний розрахунок показників достатності системи ЗІП оснований на властивості часткової впорядкованості комплектів в системі ЗІП.

Розглянемо загальну структуру системи ЗІП (рис. 6.1). Розрахунок показника достатності такої системи ЗІП зводиться до виконання такої послідовності [204]:

1. Розраховується Δ_6^* за виразом (6.10).
2. Формується $\tau_{i5} = \tilde{\tau}_{i5\infty} + \Delta_6^*$ для всіх запасів 5-го комплекту, які поповнюються за рахунок ремонту відмовивших елементів у відповідному РО. Для тих запасів 5-го комплекту, які виконуються з невичерпного джерела $\tau_{i5} = \tau_{i5\infty}$.
3. Розраховується $\Delta_{i5}^*(n_{i5}, \tau_{i5})$, $i = 1, \dots, N_5$ та формується Δ_5^* та Δ_6^* , $\tau_{i2} = \tilde{\tau}_{i2\infty} + \Delta_k^*$, де $k = 5$ для тих запасів, які відновлюються за рахунок ремонту елементів в РОЗ; $\Delta_k^* = 0$ для тих запасів, які поповнюються з невичерпного джерела.
4. Розраховується $\Delta_{i2}^*(n_{i2}, \tau_{i2})$ та Δ_2^* , яка формується $\tau_{i4} = \tilde{\tau}_{i4\infty} + \Delta_k^*$, де $\Delta_k^* = 0$ або Δ_2^* , в залежності від джерела поповнення даного запасу.
5. Розраховується Δ_6^* . Аналогічно по Δ_6^* та Δ_2^* визначається Δ_3^* . По відомим Δ_6^* , Δ_4^* , Δ_2^* визначається Δ_{i1}^* .
6. За виразом (6.12) визначається Δ^* – показник достатності системи ЗІП.

Приклад. Нехай вимагається розрахувати коефіцієнт готовності ЗІП, який складається з трьох комплектів одиночного та двох ремонтних. Задані $n_{ij} = 1, \dots$,

3, $\tau_{j\infty}, j = 1, \dots, 3$. Тоді $\tau_{1\infty} = (\tau_{i1\infty}, i = 1, \dots, N_1)$, $\tau_{2\infty} = (\tau_{i2\infty}, i = 1, \dots, N_2)$ – середні часи ремонту елементів в першому та другому РО при умові, що перший та другий ремонтні комплекти необмежені, а $\tau_{3\infty} = (\tau_{i3\infty}, i = 1, \dots, N_3)$ – параметри стратегії поповнення запасів другого ремонтного комплекту з невичерпного джерела поповнення.

Розв’язання. Спочатку розрахуємо $\Delta_{i3}^*(n_{i3}, \tau_{i3\infty}), i = 1, \dots, N_3$, та Δ_3^* . По Δ_3^* формується $\tilde{\tau}_2 = (\tau_{i2\infty} + \Delta_3^*, i = 1, \dots, N_2)$ і розраховується $\Delta_{i2}^*(n_{i2}, \tau_{i2}), i = 1, \dots, N_2$, та Δ_2^* . Формується $\tilde{\tau}_1 = (\tau_{i1\infty} + \Delta_2^*, i = 1, \dots, N_1)$, та показник достатності ЗІП буде мати вид $K^* = \prod_{i=1}^{N_1} K_i^*(n_{i1}, \tilde{\tau}_{i1})$.

6.4 Узагальнення підходів до забезпечення норм надійності ВОЛЗ запасними елементами ЗІП

Забезпечення надійності ВОЛЗ за допомогою ЗЕ системи ЗІП є важливим аспектом для її безперервної роботи в умовах можливих витоків сигналів, відмов обладнання або інших негативних ситуацій. Оскільки ВОЛЗ є однією із головних складових волоконно-оптичної мережі (ВОМ), то розглянемо деякі ключові аспекти підходів, які необхідно враховувати при забезпеченні рівня надійності ВОМ. До них включаються:

1. Дублювання маршрутів (Diversity): використання різних фізичних маршрутів для окремих каналів дозволяє забезпечити надійність в разі відмови частини мережі. Це може включати в себе використання різних трас, що проходять по різних районах або використання різних видів передавальних засобів (наприклад, різні ВОСП з різними технологіями передавання сигналів).
2. Передбачення в конструкції ОК додаткових ОВ, які можна використовувати у випадку відмови основного волокна.
3. Запасне обладнання: установка додаткового обладнання (наприклад, перемикальних пристроїв, маршрутизаторів і т.п.) для автоматичного переходу

на резервній лінії у випадку відмови основного обладнання.

4. Запасні джерела живлення: використання незалежних джерел живлення для обладнання, таких як резервні акумулятори або генератори.

5. Системи моніторингу та управління: використання систем, які надають можливість моніторити стан мережі в реальному часі і автоматично реагувати на події, такі як відмови або збої.

6. Резервне забезпечення вузлів: використання резервних вузлів (наприклад, резервних мережних вузлів) для забезпечення неперервної роботи в разі відмови основних вузлів.

7. Планування для масштабування: планування мережі з урахуванням можливості масштабування і додавання нових елементів без великих перебоїв.

8. Автоматизація процесів відновлення: розробка автоматизованих систем, які можуть швидко виявляти та виправляти проблеми, мінімізуючи час відновлення мережі. Ці підходи можуть використовуватися окремо чи в комбінації для забезпечення або підвищення до необхідного рівня надійності ВОЛЗ та ВОМ.

6.4.1 Основні підходи з оптимізації розташування запасних частин ЗІП мережі ВОЛЗ

Визначення місць розташування ЗІП на мережі ВОЛЗ є важливим етапом у забезпеченні її надійності та ефективності.

В підрозділі пропонується враховувати такі підходи з оптимізації мережі ВОЛЗ:

1. Аналіз мережі: провести детальний аналіз всієї мережі ВОЛЗ, включаючи маршрути, вузли, точки витоку сигналу та обладнання; визначити критичні елементи та проблемні місця на мережі.

2. Ідентифікація критичних точок відмов:

– визначити точки, де ймовірність виникнення пошкодження або появи відмови обладнання є найвищою;

– розглянути особливості ділянок, де можливі механічні пошкодження, електромагнітні впливи, а також зміни в середовищі.

3. Розташування елементів ЗІП: розташовувати ТЕЗ в найбільш критичних точках, де ймовірність відмови є великою; забезпечити, щоб ЗІП були легко доступними та могли бути швидко замінені.

4. Створення резервних запасів: визначити, які конкретні ТЕЗ необхідні для заміни в разі відмови; зберігати наявність запасних ОВ в кабелях, конекторів, сплайсів, обладнання і т.д.

5. Урахування віддалених місць: якщо мережа ВОЛЗ розтягнута на великих відстанях або знаходиться у важкодоступних місцях, розглянути можливість створення резервних запасів у віддалених складах або пунктах, щоб зменшити час відновлення.

6. Регулярне оновлення та тестування: регулярно переглядати та оновлювати запаси ЗІП з метою переконання, що вони ще актуальні та працездатні; періодично проводити тестування самих запасних частин для впевненості в їхній готовності до використання.

7. Врахування фінансових обмежень: враховувати фінансові обмеження при визначенні обсягу та розташуванні ЗІП.

8. Система моніторингу та управління: використовувати системи моніторингу, які можуть автоматично виявляти відмови і сповіщати про них, зменшуючи час реагування та відновлення зв'язку.

Врахування цих підходів дозволить створити ефективну стратегію управління запасами ЗІП та забезпечення надійності мережі ВОЛЗ.

6.4.2 Роль логістики в системі забезпечення ЗІП на мережі ВОЛЗ

На сьогодні ЕКМ зв'язку – це будь-які форми зв'язку, способи передачі інформації на великі відстані.

Головними категоріями логістики є потік і запас, які взаємопов'язані. Транспортна електронна комунікаційна мережа зв'язку в розрізі поняття

логістики оперує з інформаційними та матеріальними потоками.

Матеріальні потоки при експлуатації ТЕКМ зв'язку характеризуються кількісними і якісними показниками. Основними з них є напруженість і потужність матеріального потоку [205, 206]. Між цими показниками, як правило, спостерігається взаємна залежність. На них прямий вплив здійснюють обсяг (маса), час і форми постачань. Матеріальні потоки при експлуатації ТЕКМ зв'язку полягають, в першу чергу, в забезпеченні комплектами ЗІП та іншими частинами ОТЕ та їх підрозділів. Своєчасна наявність та достатність ЗІП дозволить підприємствам виконувати та забезпечувати безперебійну технічну експлуатацію мережі ВОЛЗ.

Актуальною проблемою в даному випадку є розташування розподільного центру та достатність ЗІП в ньому.

Задачу розміщення розподільчих центрів можна сформулювати як пошук оптимального рішення або ж як пошук субоптимального (близького до оптимального) рішення. Наукою і практикою вироблені різноманітні методи розв'язання задач обох видів [207 – 210].

Найбільш вживаний з них – метод визначення центру ваги (використовується для визначення місця розташування одного розподільного центру). Для цього використовується метод накладання мережі координат на карту потенційних місць розташування складів підприємств технічної експлуатації. Система мережі дає можливість оцінити вартість доставки від кожного постачальника до ймовірного складу і від складу до кінцевого споживача, а обирають варіант, який визначається як центр маси.

Координати центру ваги вантажних потоків, тобто точки, в якій може бути розташований розподільний склад, згідно до [102], визначається за формулами:

$$X_{\text{PC}} = \frac{\sum_{i=1}^n B_i X_i}{\sum_{i=1}^n B_i}, \quad Y_{\text{PC}} = \frac{\sum_{i=1}^n B_i Y_i}{\sum_{i=1}^n B_i}, \quad (6.14)$$

де X_{PC} , Y_{PC} – координати центру ваги вантажних потоків – точки в якій може бути розташований розподільний склад; B_i – вантажообіг i -го споживача; X_i , Y_i –

координати i -го споживача; n – кількість споживачів.

Розв'язання задачі розташування щодо відстані дає координати географічної точки, від якої сума відстаней до всіх пунктів попиту мінімальна. В основі цього підходу лежить припущення, що транспортні витрати є функцією виключно відстані. Тим самим передбачається, що варто мінімізувати сумарну відстань перевезень, і отримається оптимальне за витратами місце для складу розподільного центру підприємства (ОТЕ). Головним недоліком цього підходу є нехтування вагою і часом.

Застосування описаного методу має ще одне обмеження. На моделі відстань від пункту споживання матеріального потоку до розміщення розподільного центру обчислюють за прямою. Через це модельований район повинен мати розвинену мережу доріг, оскільки інакше буде порушено основний принцип – принцип подібності моделі і модельованого об'єкта [102].

Розглядаючи підсистему логістики, що займається запасами матеріальних ресурсів, необхідно пов'язати поняття запасів з предметом науки логістики – з рухом матеріального потоку, в межах якого створюються ці запаси. Незалежно від того, чи є матеріальні потоки зовнішніми по відношенню до ОТЕ, або внутрішніми, при фіксації їх місця знаходження, приходиться стикатися з поняттям запасів. Можливо сказати, що запас – це форма існування матеріального потоку. Критеріями класифікації можуть стати два параметри, що визначають поняття руху. Це простір і час. Параметр кількості запасу невіддільний від параметра часу. Параметр якості запасу пов'язаний з конкретною потребою і не призводить до виділення видів запасів. Запаси в тому чи іншому вигляді присутні по всій довжині логістичного ланцюга, як у сфері виробництва, так і в сфері обігу продукції.

Матеріальні запаси – це продукція виробничо-технічного призначення, яка знаходиться на різних стадіях виробництва й обігу складових ВОЛЗ [205].

На рівні підприємств експлуатації транспортної ЕКМ зв'язку запаси відносяться до ОТЕ, що потребують великих капіталовкладень, і тому являють собою один із факторів, що визначають політику підприємства, та впливають на

рівень логістичного обслуговування у цілому.

6.5 Розрахунок показників достатності комплектів ЗІП

6.5.1 Розрахунок показників достатності одиночного комплекту ЗІП

Для розрахунку основних показників достатності одиночного комплекту ЗІП з високою точністю можна використовувати такі вирази [204]:

$$K^* = \prod_{i=1}^N (1 - P_{i,l_i+1}); \quad K_i^* = 1 - P_{i,l_i+1}; \quad (6.15)$$

$$\Delta^* \approx \frac{1}{\Lambda_0} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{l_i+1} j P_{ij}; \quad \Delta_i^* = \frac{1}{\Lambda_{i0}} \sum_{j=1}^{l_i+1} j P_{ij}.$$

Якщо об'єкт не містить резервних груп елементів, то для показників достатності одиночного комплекту ЗІП K^* та Δ^* справедливі такі вирази [204]:

$$K^* = \prod_{i=1}^N (1 - P_{i,l_i+1}); \quad \Delta^* = \frac{1}{\Lambda_0} \sum_{i=1}^N P_{i1}. \quad (6.16)$$

Нижче приводяться вирази розрахунку ймовірності P_{ij} для різних стратегій поповнення запасів та при різних припущеннях про характер відмов елементів. Для зручності, оскільки у всіх виразах всі параметри відносяться до одного типу елементів, індекс типу елемента i в номенклатурі одиночного комплекту ЗІП буде опущений.

Прийняті такі припущення: для безвідмовної роботи (зберігання) елемента даного типу розподілена по експоненціальному закону з відомими параметрами; всі працюючі (резервні та запасні) елементи відмовляють незалежно (λ – інтенсивність відмов основного елемента даного типу); під час простою виробу елементи не відмовляють; тривалість ремонту елемента, що відмовив, розподілена по експоненціальному закону з відомими параметрами.

6.5.2 Розрахунок показників достатності ремонтного комплекту ЗІП

В РО несправний елемент даного типу (наприклад, ТЕ33) усувається заміною в ньому комплектуючого елемента (наприклад, ТЕ32). Таким чином, для нормального функціонування РО потребує комплект ЗІП, який складається з цих комплектуючих елементів.

Показником достатності ремонтного комплекту ЗІП слугує Δ^* – середній час затримки у виконанні заявки в РО на запасний елемент. Нехай потік заявок на елемент даного типу, що потрапляє в ремонтний комплект ЗІП, пуассонівський, причому заявки при відсутності запасних елементів не зникають, а становляться в чергу [211].

Для запасів елементів ремонтного комплекту ЗІП характерні дві стратегії поповнення: періодичне поповнення ($\alpha = 1$) і ремонт відмовивших елементів ($\alpha = 3$ та 4). При використанні другої стратегії відмовивші елементи з розглянутого ремонтного комплекту ЗІП (ТЕ32) поступають в РО, не до якого відноситься даний комплект, і несправність в ньому усувається за рахунок ще більш мілкового комплектуючого елемента (ТЕ31).

Показник достатності ремонтного комплекту ЗІП розраховується за виразом [204]:

$$\Delta^* = \sum_{i=1}^N \frac{\lambda_i}{\Lambda} \Delta_i^* = \frac{1}{\Lambda_0} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{\infty} j P_{ij}, \quad (6.17)$$

де λ_i – інтенсивність пуассонівського потоку заявок на елемент i -го типу;

$$\Lambda = \sum_{i=1}^N \lambda_i.$$

В табл. 6.1 приведені формули розрахунку ймовірностей P_{ij} для різних стратегій поповнення запасів елементів.

Послідовність дій при розрахунку показників достатності ремонтного комплекту ЗІП така [204]:

1. Задається точність розрахунку $\varepsilon > 0$, що вимагається.

2. Розраховується $\Lambda = \sum_{i=1}^N \lambda_i$.

При $i = 1, \dots, N$ за виразами табл. 6.1 визначається ймовірність $P_{i1}, \dots, P_{ij^*}$, де $j^* = \min_{jP_{ij} \leq \Lambda \varepsilon / N} j$.

Для кожного типу елемента розраховується $\sum_{j=1}^{j^*} jP_{ij} = \Phi_i$.

За знайденими $\Phi_1, \dots, \Phi_N$ визначається показник достатності ремонтного комплекту ЗІП [204]:

$$\Delta^* = \frac{1}{\Lambda} \sum_{i=1}^N \Phi_i. \quad (6.18)$$

Таблиця 6.1 – Вирази розрахунку ймовірності P_{ij} для ремонтного комплекту

α	σ	P_j	Примітка
1	0	$\frac{1}{\alpha} e^{-\alpha} \sum_{k=n+j+1}^{\infty} \frac{\alpha^k}{k!}$	$\alpha = \lambda T_{\text{п}}$
3	0	$e^{-\alpha} \frac{\alpha^{n+j}}{(n+j)!}$	$\alpha = \lambda T_{\text{п}}$
4	0	$\alpha^{n+j} (1 - \alpha)$	
1	> 0	$\prod_{k=1}^n (1 + \frac{\lambda}{k\sigma}) \sum_{k=0}^n C_n^k (-1)^{j-k} \frac{e^{-\alpha}}{\alpha^k} \sum_{r=j+1}^{\infty} \frac{\alpha^r}{r!} \left[1 - \left(-\frac{k\sigma}{\lambda} \right)^{r-j} \right]$	$\alpha_k = (\lambda + k\sigma) T_{\text{п}}$ $\alpha = \lambda T_{\text{п}}$
3	> 0	$\frac{\alpha_j}{(n+j)!} \prod_{k=0}^{n-1} \alpha_k / \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k!} \prod_{r=0}^{k-1} \alpha_r \right)$	$\alpha_k = \begin{cases} (\lambda + (n-k)\sigma) T_{\text{п}}; \\ k = 0, \dots, n; \\ \Delta T_{\text{п}}, k > n. \end{cases}$
4	> 0	$\alpha^j \prod_{k=1}^n \alpha_k / \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} \prod_{r=0}^{k-1} \alpha_r \right)$	

Приклад. Розрахувати показник достатності ремонтного комплекту ЗІП. Нехай комплект ЗІП, приданий РО, містить елементи трьох різних типів $N = 3$. Необхідно визначити Δ^* з точністю $\varepsilon = 0,1$. Початкові дані по всім типам елементів задані в табл. 6.2.

Таблиця 6.2 – Початкові дані для розрахунку

i	λ_i	σ_i	α_i	T_{i1}	n_i
1	0,00001	0,000001	1	1000	2
2	0,001	0	4	100	3
3	0,001	0	3	20	1

Розв’язання. За виразом $\Lambda = \sum_{i=1}^N \lambda_i$ розраховується сума $\Lambda = 0,00201$.

Визначається $d = \frac{\Lambda \varepsilon}{N} = 0,000007$.

Для визначення P_{ij} за виразами з табл. 6.1 отримано: $P_{11} = 0,000696$, $P_{12} = 0,0000002$. Оскільки $P_{12} > d$, припущено: $j^* = 1$, $\Phi_1 = P_{11} = 0,000696$, $P_{21} = 0,000099 > d$, $P_{22} = 0,0000099 > d/2$, $P_{32} = 0,000001 < d/3$, $j^* = 2$. Значить, $\Phi_2 = 0,0001089$.

Визначимо: $P_{31} = 0,00019604 > d$, $P_{32} = 0,0000013 < d/2$. Значить, $\Phi_3 = 0,000196$.

Звідси отримано значення показника достатності ремонтного комплекту ЗІП: $\Delta^* = (\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3) / \Lambda = 0,5$, тобто середній час затримки заявки, що поступає з РО в приданий йому комплект ЗІП дорівнює 0,5 год (розраховано з заданою точністю $\varepsilon = 0,1$ год).

6.5.3 Розрахунок показників достатності групового комплекту ЗІП

Групові комплекти ЗІП служать для поповнення приданих виробам одиночних комплектів ЗІП по мірі їх витрачення, а також для відновлення працездатності об’єктів за деякими типами елементів, запаси яких відсутні в одиночних комплектах. Для відновлення запасу елементів даного типу у складі групового комплекту ЗІП на практиці використовуються дві стратегії поповнення: періодичне поповнення ($\alpha = 1$) і ремонт елементів, що відмовили ($\alpha = 3, 4$). Показником достатності групового комплексу ЗІП служить Δ^* – середній час затримки у виконанні заявки на запасні елементи, для якого

справедливо приблизне представлення (6.17) [204].

Залежно від прийнятої стратегії поповнення запасу елементів даного типу у складі одиночного комплекту ЗІП можливо виділити два варіанта моделі випадкових звертань до запасу елементів даного типу в груповому комплекті ЗІП i , відповідно, різні вирази розрахунку Δ^* – показників достатності запасів елементів у складі групового комплекту [204].

Модель 1. Якщо запас елементів даного типу у складі одиночного комплекту ЗІП функціонує як запас елементів, що відновлюються, то груповий комплект ЗІП як би грає роль ремонтного органу, тільки замість ремонту відмовившого елемента виконується його заміна аналогічним справним елементом. В цьому випадку можливо вважати, що потік заявок, який поступає в груповий комплект ЗІП на елементи даного типу, пуассонівський, при відсутності необхідних елементів заявки не губляться, а стають у необмежену чергу, Δ_i^* розраховуються за формулою (6.17), для розрахунку вірогідності P_{ij} скористаємося виразами табл. 6.1 [204].

Модель 2. Потік заявок на елементи даного типу відповідає періодичному поповненню з екстремальними доставками або безперервному (за рівнем) поповненню запасів елементів цього типу у складі одиночних комплектів ЗІП. В цьому випадку не можливо вважати, що потік заявок на елементи даного типу пуассонівський, оскільки одиночний комплект не може послати чергову заявку на елементи даного типу, поки не задоволена попередня [204].

Нехай запас елементі i -го типу в груповому комплекті служить для поповнення S запасів елементів цього типу в одиночних комплектах ЗІП чи обслуговується безпосередньо S запасів ідентичних об'єктів. Будемо припускати, що витрата всіх S запасів елементів i -го типу в одиночних комплектах ЗІП описується однаково, причому процеси статистично незалежні один від одного. Це означає, що в заявках на елементи i -го типу, що приходять до групового комплекту ЗІП від будь-якого з одиночних, позначена одна та сама кількість необхідних елементів r (при безперервному поповненні запасу елементів i -го типу в одиночних комплектах ЗІП $r = n - k$, де n – початковий рівень, а k – рівень

поповнення запасу елементів i -го типу в будь-якому з S одиночних комплектів, при періодичному поповненні з екстремальними доставками $r = n + 1$, а якщо запас елементів даного типу в груповому комплекті обслуговує безпосередньо об'єкти, то $r = 1$) [204].

Будемо вважати, також, що час очікування чергової заявки на елементи i -го типу від даного одиночного комплекту чи від об'єкта за умови, що буде задоволена попередня заявка цього одиночного комплекту чи цього об'єкта на елементи i -го типу, розподілено за експоненціальним законом з параметром $\lambda_i > 0$.

В цьому випадку модель потоку заявок, що поступають в груповий комплект ЗІП від S ідентичних одиночних комплектів чи об'єктів, має опис. Час очікування появи чергової заявки на елементи i -го типу розподілену за експоненціальним законом з інтенсивністю $(S - j)\lambda_i$, де j – довжина черги з незадовільних заявок на елементи i -го типу, що мається у розглянутий момент в груповому комплекті. Довжина черги незадовільних заявок не може перевищувати S , оскільки ні один одиночний комплект, а також ні один об'єкт не може послати наступну заявку на елементи даного типу, поки не задовільнена попередня [200].

В цьому випадку для Δ_i^* справедливим є наступний вираз [204]:

$$\Delta_i^* \approx \frac{1}{\lambda_i S} \sum_{j=1}^S j P_{ij}. \quad (6.19)$$

Формули табл. 6.1 дозволяють обчислити ймовірність P_{ij} , $j = 1, \dots, S$ при різних стратегіях поповнення запасу елементів i -го типу і різних гіпотезах про можливість відмови елементів при зберіганні. Індекс, що відповідає номеру типу елементів в номенклатурі групового комплекту ЗІП, опущений. В цій таблиці використані наступні позначки: n – максимальна кількість заявок на поповнення, яке запас елементів даного типу в груповому комплекті здатен задовольнити без власного відновлення (якщо початковий рівень запасу елементів даного типу в груповому комплекті n , то $n = [n / r]$, де r – кількість елементів, що позначені в заявці на поповнення), $b_k = S \cdot \Lambda + (n - k)\sigma / r$; $k = 0, \dots, n$; $b_k = (n + S - k)\lambda$;

$k = n + 1, \dots, S + n$.

Приклад. Розрахувати показники достатності групового комплекта ЗІП. Нехай початкові дані по груповому комплекту, які містять елементи даного типу, задані в табл. 6.3.

Таблиця 6.3 – Початкові дані для розрахунку

i	r_i	S_i	λ_i	σ_i	α_i	T_{i1}	n_i
1	-	-	0,001	0,0001	1	1000	4
2	3	5	0,01	0	3	24	2
3	2	5	0,01	0	4	24	3

Потрібно визначити показник достатності такого групового комплекта з точністю $\varepsilon = 0,1$ год.

Розв'язання. Розраховується $\Lambda = \sum_{i=1}^N S_i \lambda_i = 0,101$, а потім

$$d = \varepsilon \Lambda / N = 0,0033.$$

При $i = 1$ S_i не вказано, тобто запас елементів i -го типу функціонує як запас елементів в ремонтному комплекті. Для розрахунку Δ_1^* використано вираз (6.17), а для ймовірностей P_{ij} – табл. 6.1. $P_{11} = 0,00177 > d$, $P_{12} = 0,00001 < d/2$, тобто $j^* = 1$, $\Delta_1^* = 1,77$.

При $i = 2, 3$ для розрахунку P_{ij} використано вирази з табл. 6.1. $P_{21} = 0,06988 > d$, $P_{22} = 0,01677 > d/2$, $P_{23} = 0,00242 > d/3$, $P_{24} = 0,00019 < d/4$. Таким чином, $j^* = 3$. За виразом (6.19), $\Delta_2^* = 2,23$, $P_{31} = 0,17695 > d$, $P_{32} = 0,16987 > d/2$, $P_{33} = 0,12231 > d/3$, $P_{34} = 0,05870 > d/4$, $P_{35} = 0,01409 > d/5$. При $j^* = S$ розрахунок ймовірностей P_{ij} зупиняється незалежно від виконання умови $P_{i,j^*+1} < d/(j^*+1)$. Отримано за виразом (6.19) $\Delta_3^* = 23,78$.

Таким чином, за виразом (6.10): $\Delta^* = 12,9$ год, причому значення Δ^* вираховане з точністю $\varepsilon = 0,1$ год.

6.6 Оптимальне проектування комплектів ЗІП

Задача оптимального проектування комплекту ЗІП (одиначного, групового або ремонтного) полягає в пошуку цілочисленного вектора n , який реалізує
$$\min_{n>0} \left\{ \sum_{i=1}^N c_i n_i \mid Q(n) \leq Q_0 \right\},$$
 де $Q(n) = -\ln K^*(n)$ або $Q(n) = \Delta^*(n)$, а Q_0 відповідно

дорівнює $-\ln K^*(n)$ або Δ_0 в залежності від вибору показника достатності.

Згідно [200] $Q(n)$ можливо представити у вигляді $Q(n) \approx \sum_{i=1}^N Q_i(n_i)$, де

$$Q_i(n_i) = -\ln K_i^*(n_i) \text{ або } Q_i(n_i) = \Lambda_i \Delta_i^* / \Lambda.$$

Таким чином, задача оптимального проектування комплекту ЗІП зводиться до задачі оптимального резервування [204]:

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^N c_i n_i \mid \sum_{i=1}^N Q_i(n_i) \leq Q_0 \right\}, \quad (6.20)$$

або при зворотній постановці

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^N Q_i(n_i) \mid \sum_{i=1}^N c_i n_i \leq C_0 \right\}. \quad (6.21)$$

Оскільки задачі оптимального проектування комплектів ЗІП мають, як правило, більшу розмірність ($N \sim 1000$), для їх розв'язання необхідно вибирати методи, трудоемністю яких росте зі збільшенням розмірності не дуже швидко. Часто непогані результати дає такий простий метод, коли комплект не містить неперервно-поповнювальних запасів. Як оптимальне розв'язання задачі (6.20) можна вибрати [204]:

$$n_i^* = \min \left\{ n_i \mid Q_i(n_i) \leq c_i Q_0 / \sum_{i=1}^N c_i \right\}.$$

Верхня оцінка точності отриманого розв'язання – це $\sum_{i=1}^N c_i$. Досвід розв'язання практичних задач оптимального проектування комплекту ЗІП показує, що найбільш зручний метод найскорішого координатного спуску [200].

6.7 Оптимальне проєктування системи ЗІП складної структури

Для забезпечення надійності групи об'єктів можуть використовуватися системи досить складної структури, що включають одиночні, групові і ремонтні комплекти. У [204] представлені методи оптимального проєктування всіх видів комплектів ЗІП, проте на практиці при проєктуванні системи ЗІП складної структури задаються лише вимоги до показника достатності системи ЗІП в цілому.

На практиці проєктування системи ЗІП, що забезпечує надійність одного або групи об'єктів, починається з вибору структури системи ЗІП. Структура системи ЗІП визначається кількістю одиночних, групових і ремонтних комплектів, стратегіями поповнення запасів елементів у складі всіх комплектів і чисельними параметрами стратегій поповнення запасів.

Набір раціональних структур системи ЗІП, як правило, сильно обмежений організаційними міркуваннями. У реальному завданні може зустрітися не більше 10...20 конкуруючих структур. Тому немає сенсу розглядати параметри, що визначають структуру ЗІП, як параметри управління в задачі оптимального проєктування. Найбільш підходить «швидкий» метод оцінки витрат на систему ЗІП заданої структури, що використовує огрублення лівої частини обмеження, за допомогою цього методу оцінити витрати на системи ЗІП всіх конкуруючих структур та вибрати серед них ту, якій відповідає найменше значення оцінки, а потім, використовуючи «акуратні» методи, провести оптимальне проєктування системи ЗІП вибраної структури, тобто вирішити таке завдання [204]:

$$\min \left\{ \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{N_j} c_{ij} n_{ij} \mid Q(n_1, \dots, n_M) \leq Q_0 \right\}. \quad (6.22)$$

Для того, щоб грубо оцінити затрати на систему ЗІП заданої структури можливо використати евристичний метод розв'язання задачі. Ідея полягає в тому, що замість виразу (6.22) розв'язується задача:

$$\min \left\{ \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{N_j} c_{ij} n_{ij} \mid \tilde{Q}(n_1, \dots, n_M) \leq Q_0 \right\}. \quad (6.23)$$

де $\tilde{Q}(n_1, \dots, n_M) = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{N_j} Q_{ij}(n_{ij})$ – сепарабельна функція.

Якщо функція $\tilde{Q}(n_1, \dots, n_M)$ вибрана так, що при всіх $n_{ij} \geq 0, j=1, \dots, M, i=1, \dots, N_j$ виконується нерівність $Q(n_{ij}) \leq \tilde{Q}(n_{ij})$, то очевидно, що всякий набір n_{ij} задовольняє умовам (6.22) та (6.23). Тому оптимальне значення цілого функціонала задачі (6.23) слугує верхньою оцінкою оптимального значення цільового функціонала задачі (6.22) [204].

Для того, щоб знайти обмежувальну сепарабельну функцію $\tilde{Q}(n_{ij})$, використовується таке припущення: нехай відмова будь-якого комплекту в заданій структурі системи ЗІП виконати поступившу вимогу на запасний елемент приводить до відмови виробу, причому ця відмова триває до тих пір, поки вимога на ЗЕ не буде задоволена [200].

Тоді показник достатності системи ЗІП має вид [204]:

$$\tilde{Q}(n_{ij}) = \sum_{j=0}^M \sum_{i=1}^{N_j} Q_{ij}(n_{ij}), \quad (6.24)$$

де $Q(n_{ij}) = -\ln[1 - \varphi_{ij}(n_{ij})]$, якщо показником достатності системи ЗІП вибрано

його коефіцієнт готовності, та $Q(n_{ij}) = \frac{1}{\Lambda_0} \varphi_{ij}(n_{ij})$, якщо показником достатності

системи ЗІП вибрано середній час затримки у виконанні заявки на запасний елемент; $\varphi_{ij}(n_{ij})$ – середня в часі ймовірність наявності в j -му комплекті хоча б однієї незадовільної заявки на елемент i -го типу.

Для розв'язання задачі (4.23) можна скористатися любим методом, наприклад методом найшвидшого координатного спуску.

Розв'язання задачі оптимального проектування системи ЗІП цим методом можна використати для оцінки затрат на систему ЗІП при виборі його структури. Оптимальне проектування системи ЗІП вибраної структури проводиться методом послідовної оптимізації. Ідея полягає в тому, що оптимальні витрати на системи ЗІП знаходяться як мінімум функції $(M-1)$ -ої змінної (M – число різних

комплектів в системі ЗІП) [204].

Нехай задані: $x_2 > 0, x_3 > 0, \dots, x_M > 0$. Розглянемо таку задачу з M обмеженнями:

$$\min \left\{ \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{N_j} c_{ij} n_{ij} \mid \tilde{Q}(n_1, x) \leq Q_0 \Delta^*(n_j, x_j) \leq x_j, j = 2, \dots, M \right\}, \quad (6.25)$$

де $x_j = (x_1, \dots, x_{j-1}, x_{j+1}, \dots, x_M)$.

Очевидно, що оптимальне значення цільового функціонала задачі (6.25) можна представити у виді [204]:

$$C(x) = \sum_{j=1}^M C_j(x_j), \quad (6.26)$$

де $C_1(x)$ – оптимальне значення цільового функціонала задачі.

$$\min_{n_1 > 0} \left\{ \sum_{i=1}^{N_1} c_{i1} n_{i1} \mid Q(n_1, x) \leq Q_0 \right\}, \quad (6.27)$$

а $C_j(x_j), j = 2, \dots, M$ – оптимальні значення цільових функціоналів задач.

$$\min_{n_j > 0} \left\{ \sum_{i=1}^{N_j} c_{ij} n_{ij} \mid \Delta^*(n_j, x_j) \leq x_j \right\}. \quad (6.28)$$

Оптимальне значення цільового функціонала задачі – це мінімум

$$C^* = \min_{x > 0} C(x).$$

Оскільки функція $C(x)$ кусково постійна, то для пошуку її мінімуму можна використовувати лише методи, які застосовують значення функції, а не градієнт.

6.8 Використання теорії графів для розробки математичних моделей фрагмента ТЕКМ зв'язку

Транспортна електронна комунікаційна мережа зв'язку як об'єкт синтезу та аналізу являє собою сукупність пунктів мережі та ліній, що їх з'єднують. Як математичну модель такого об'єкта використовують граф. Визначимо математичну модель ТЕКМ зв'язку та використаємо теорію графів, згідно якої

розглядається деяка сукупність пунктів мережі (точок) і ділянок лінії (стрілок), що їх зв'язують. Точки графа називаються вершинами, а стрілки – дугами. Граф математично позначається як $G(N, V)$, де N – кінцева множина вершин потужністю n , а V – кінцева множина дуг потужністю m . Вершини позначатимемо малими літерами (i, j, k, l, s) або цифрами $(1, 2, 3, 4, 5)$, а дуги відповідно парами: $\{(i, j), (j, k), (k, l)\} \dots$ або $\{(1, 2), (2, 3), (3, 4), \dots\}$, де перший індекс визначає початок, а другий – кінець дуги. Граф, у якому задається напрямок дуг, називається орієнтованим, а в якому не задається – неорієнтованим. Неорієнтовані дуги називаються ребрами. Між двома вершинами, з'єднаними дугою (ребром), існує відношення суміжності (для орієнтованого графа вершини i та j суміжні, лише якщо дуга починається в i та спрямована до j). Між вершиною та з'єднаними з нею дугами (ребрами) існує відношення інцидентності. Граф, кожній дузі (ребру) якого поставлені у відповідність деякі числові характеристики, названі вагами, є зваженим графом. При необхідності ваги можуть бути приписані вершинам графу. Зважений граф прийнято називати мережею (у разі мається на увазі мережна модель, а не сама мережа як об'єкт). Як вагові характеристики мережі можуть виступати відстані, пропускна здатність, вартість і т.д. Крім геометричного зображення у виді точок і ліній, граф може бути представлений у дискретній формі, яка використовується при введення графової моделі в ЕОМ [102, 212].

Однією з найпоширеніших дискретних уявлень графа є матриця суміжностей. Це матриця $G = [a_{ij}]$, розміром $(n \times m)$ елементів, які можуть набувати значення: $a_{ij} = 1$, якщо у графі G існує дуга (ребро) між вершинами i та j ; $a_{ij} = 0$, якщо інакше.

Матриця суміжностей графа, наведеного на рис. 6.5, має вигляд:

$$G = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{vmatrix}, \quad (6.29)$$

Для зберігання в пам'яті ЕОМ матриці суміжності, як бачимо, необхідно n^2 комірок.

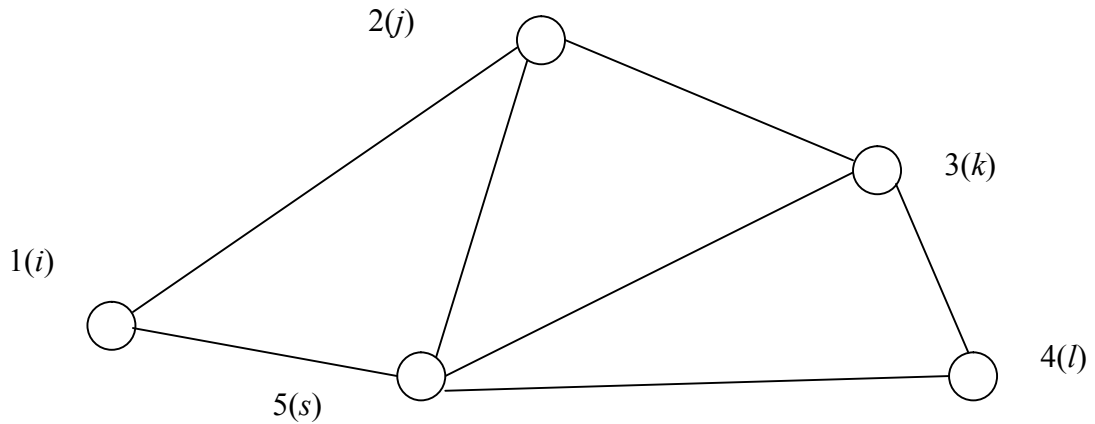


Рисунок 6.5 – Приклад графа для визначення матриці суміжності

У неорієнтованого графа матриця суміжності симетрична щодо головної діагоналі, і, отже, у пам'яті ЕОМ може зберігатися лише один із її трикутників, що дозволить економити пам'ять, але ускладнює її обробку на ЕОМ.

Якщо перенумерувати в довільному порядку дуги (ребра) графа G і поставити ці номери у відповідність до номерів рядків деякої матриці $B = [b_{ij}]$, а номери стовпців залишити, як і раніше, відповідними номерами вершин графа, то в такій матриці можна відобразити відношення інцидентності елементів графа G . Елементи матриці B_{ij} можуть приймати значення $\{0, 1\}$.

Перенумеруємо дуги для графа, що розглядається: $(i, j) - 1$; $(j, k) - 2$; $(k, l) - 3$; $(l, s) - 4$; $(s, i) - 5$; $(s, j) - 6$; $(s, k) - 7$.

Тоді матриця інцидентності матиме вигляд:

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6.30)$$

Зважений граф (мережа ВОЛЗ) може бути в дискретному вигляді представлений матрицею ваг $W = [w_{ij}]$, де w_{ij} – вага дуги (ребра), якщо вона існує

в графі W . Ваги неіснуючих дуг (ребер) вважають рівними ∞ або 0 в залежності від умов завдання, у якому вони розглядаються.

6.9 Оптимізація підходів до визначення місця розташування комплектів ЗІП фрагмента ТЕКМ зв'язку

6.9.1 Розробка методу визначення розташування ЗІП за відстанню між вузлами

6.9.1.1 Метод визначення місця розташування ЗІП за критерієм мінімальної відстані між вузлами

Згідно до [102] розв'язання задачі визначення місця розміщення ЗІП на основі мінімальних відстаней від ОТЕ до усіх інших об'єктів ТЕКМ зв'язку можна здійснити методом медіани графа, суть якого методу полягає у знаходженні такої вершини графа (ОТЕ), яка мінімізує суму найкоротших відстаней до всіх інших ОТЕ (вершин).

Медіаною графа вважається така вершина $m \in V$, від якої сума найкоротших відстаней до всіх інших ОТЕ мережі є мінімальною:

$$f(m) = \sum_{i=1, i \neq m}^n l_{mi} \rightarrow \min, \quad (6.31)$$

де $f(m)$ – медіана графа (функція вершини m); l_{mi} – довжина ребер графа (ділянок ВОЛЗ) між вершинами (ОТЕ) m та i .

Величина $R_m = \sum_{j=1}^n l_{mj}$ називається медіанною довжиною графа G і є найменшою сумарною довжиною ребер, що з'єднують вершину m з іншими вершинами графа.

Класичний алгоритм знаходження медіани графа зводиться згідно [102] до такої послідовності:

Крок 1. Визначити матрицю $n \times n$ відстаней L ребер графа (фрагментів

ТЕКМ зв'язку) між вершинами графа (ОТЕ):

$$L = [l_{ij}], \quad (6.32)$$

де L – матриця відстаней між вершинами; l_{ij} – відстань між вершинами i та j , км; i – порядковий номер рядка матриці, $i = 1, \dots, n$; j – порядковий номер стовпця матриці, $j = 1, \dots, n$.

Елементи головної діагоналі матриці L відстані між вершинами $l_{ii} = 0$. Якщо безпосереднього з'єднання між вершинами i та j немає, тоді елемент матриці відстаней $l_{ij} = \infty$.

Крок 2. Пошук шляху з найменшим значенням l_{ij} між кожною вершиною i та j , використовуючи, наприклад, алгоритми Флойда-Уоршелла або Дейкстри. В даному випадку перевага надається методу Флойда-Уоршелла через те, що вузли мережі зв'язку можуть не мати прямого з'єднання між собою, тобто мережа є неповнозв'язною.

Крок 3. В матриці $L = [l_{ij}]$ визначити по кожному рядку суму значень довжин ребер. Тобто, для кожної вершини i :

$$R_i = \sum_{j=1, i \neq j}^n l_{ij}, \quad (6.33)$$

де R_i – сума рядка матриці відстаней $L = [l_{ij}]$, км; l_{ij} – відстань між вершинами i та j , км; i – порядковий номер рядка матриці, $i = 1, \dots, n$; j – порядковий номер стовпця матриці, $j = 1, \dots, n$.

Крок 4. Визначити медіану графа як вершину m з найменшим значенням $R_m = \min(R_i)$.

Визначена вершину m має найменшу сумарну відстань до всіх інших ОТЕ мережі.

6.9.1.2 Розробка методу визначення місця розташування ЗІП за відстанню між вузлами та інтенсивністю відмов ВОЛЗ

Обґрунтування необхідності методу. У традиційних підходах при

моделюванні ТЕКМ зв'язку певного кліматичного району представляється як граф, у якого вершини є вузлами мережі, а ребра між вершинами – з'єднувальні ВОЛЗ, які, як правило, оцінюються за геометричною довжиною. Траси ВОЛЗ, зазвичай, прокладаються вздовж автомобільних доріг, що забезпечує доступність для проведення ремонтних робіт. Проте при вирішенні задачі оптимізації підходів до розташування ЗІП у вузлах мережі необхідно враховувати не лише відстань між ними, а й імовірність (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, це мінімізує час доставки запасних частин до потенційно проблемних місць.

У різних кліматичних або технічних умовах інтенсивність відмов лінійних споруд ВОЛЗ на ділянках мережі може суттєво відрізнятися. Тому однакові за довжиною ділянки ВОЛЗ можуть мати різну схильність до пошкоджень. Для об'єктивнішого врахування цієї особливості при вирішенні оптимізації підходів до визначення місця розташування ЗІП на мережі зв'язку необхідно замість довжини ділянок (ребер) використовувати параметр потоку відмов, Λ_{ij} , що визначається як добуток інтенсивності відмов, λ_{ij} , між i -им та j -им вузлами на довжину ділянки між ними, L_{ij} .

Цей параметр відображає очікувану кількість відмов на ділянці за одиницю часу і дозволяє визначати, які частини мережі є найбільш вразливими.

Для цього у якості ваг ребер графа w_{ij} використовується параметр потоку відмов $\Lambda_{ij} = \lambda_{ij} \cdot L_{ij}$, що дозволяє урахувати як довжину траси, так інтенсивність виникнення пошкоджень.

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

Теоретична складова методу. Визначення місця розташування ЗІП при мінімальних відстанях від об'єкта технічної експлуатації до усіх інших об'єктів

заданої частини мережі ТЕКМ зв'язку на основі структури її ділянки можливо здійснювати методом медіани графа. Суть цього методу згідно до пп. 6.9.1.1 полягає у знаходженні такої вершини графа (вузла мережі), яка максимізує суму зважених відстаней до всіх інших вершин.

Згідно до [102] медіаною такого графа є така вершина $v^* \in V$, від якої сума зважених ребер до всіх інших вузлів є максимальною, тобто:

$$f(v^*) = \sum_{v \in V} w_{vj} \rightarrow \max, \quad (6.34)$$

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

Припущенням оптимізації підходу є його застосування, яке можливе у випадку не однаковості інтенсивностей відмов усіх ВОЛЗ фрагменту мережі.

Алгоритм знаходження зваженої медіани графа зводиться до послідовності:

Крок 1. Визначення матриць відстаней L та інтенсивностей відмов I фрагментів ТЕКМ зв'язку між n об'єктами технічної експлуатації – вузлами зв'язку (вершинами графа):

$$L = [l_{ij}], \quad I = [\lambda_{ij}]. \quad (6.35)$$

де L – матриця відстаней фрагмента у мережі; l_{ij} – відстань між вершинами i та j фрагмента мережі, км; i – порядковий номер рядка матриці, $i = 1, \dots, n$; j – порядковий номер стовпця матриці, $j = 1, \dots, n$; I – матриця інтенсивності відмов ребер фрагмента мережі; λ_{ij} – інтенсивність відмов ребер між вершинами i та j , 1/год.

Елементи головної діагоналі матриці L відстаней між вершинами i та j $l_{ii} = 0$. Якщо безпосереднього з'єднання між вершинами i та j немає, тоді елемент матриці відстаней між вершинами $l_{ij} = \infty$.

Елементи головної діагоналі матриці I інтенсивностей відмов ділянок ВОЛЗ $\lambda_{ii} = 0$. Якщо безпосереднього з'єднання між вершинами i та j немає, тоді елемент матриці $\lambda_{ij} = \infty$.

Крок 2. На основі отриманих матриць L та I побудувати матрицю ваг ребер

W , де $W = [w_{ij}]$ розміром $n \times n$. В загальному випадку така матриця W заповнюється елементами:

$$w_{ij} = \begin{cases} \Lambda_{ij} = \lambda_{ij} \cdot L_{ij}, & \text{якщо існує ребро між } v_i \text{ та } v_j; \\ 0, & \text{якщо } i = j; \\ \infty, & \text{якщо немає прямого з'єднання між } v_i \text{ та } v_j \end{cases} \quad (6.36)$$

Крок 3. Побудова графа мережі $G = (V, E)$ на основі відомостей про кількість n вершин (вузлів) v та ваг ребер w_{ij} (з'єднувальних ліній). Кожній вершині відповідає номер v_i , а ребру – вага ребра w_{ij} . Елемент матриці W відповідає значенню параметра потоку відмов $w_{ij} = \Lambda_{ij} = \lambda_{ij} \cdot L_{ij}$.

Крок 4. Пошук шляху з найменшим значенням Λ_{ij} між кожною вершиною i та j , використовуючи, наприклад, алгоритм Флойда-Уоршелла. В даному випадку перевага надається методу Флойда-Уоршелла через те, що вузли мережі зв'язку можуть не мати прямого з'єднання між собою, тобто мережа є неповнозв'язною. Для цього цей алгоритм для всіх вершин i, j, k , де $i \neq j$ виконує перебір усіх варіантів та пошук найменшого значення $\Lambda_{ij} = \min(\Lambda_{ij}, \Lambda_{ik} + \Lambda_{kj})$. За результатами цього формується матриця R з найменшими значеннями параметра потоку відмов Λ_{ij} між кожною вершиною i та j .

Крок 5. В матриці R визначити по кожному рядку суму значень Λ , що буде характеризувати вагу кожної вершини. Тобто, для кожної вершини i :

$$R_i = \sum_{j=1, i \neq j}^n \Lambda_{ij}.$$

Крок 6. Для кожного ребра необхідно вибрати ОТЕ (вузол) з найменшою сумою значень параметра потоку відмов матриці W до всіх інших вузлів:

$$v'(e_{ij}) = \min(R_i, R_j), \quad (6.37)$$

де $v'(e_{ij})$ – вершина графа з найменшою сумою значень параметра потоку відмов матриці W ; e_{ij} – ребро між вершинами i та j .

Крок 7. Для визначених вузлів $v'(e_{ij})$ розраховується сума параметра потоку відмов усіх ребер $R'_i = \sum_{j=1}^m w_{ij}$, приєднаних до цього вузла.

Крок 8. Визначити зважену медіану графа як вершину m з найбільшою

сумою $R_m = \max(R'_i)$.

При визначенні місць розташування ЗІП більше одного, необхідно обирати вершини m_x з найбільшими значення R'_i .

За результатами виконаних кроків алгоритму, буде визначено вершини графа (ОТЕ), навколо якого розташовані лінії з найбільшою пошкоджуваністю.

Експериментальна складова методу. Дослідження та визначення оптимального місця розташування ЗІП на ТЕКМ зв'язку проводиться на прикладі її фрагменту в умовах 5-річного терміну експлуатації в Одеській області. Для цього використана теоретична основа даного методу.

Фрагмент ТЕКМ зв'язку Одеської області можна представити у вигляді графу (рис. 6.6), де вершини графа відповідають вузлам мережі, а ребра – лініям ВОЛЗ між ними.

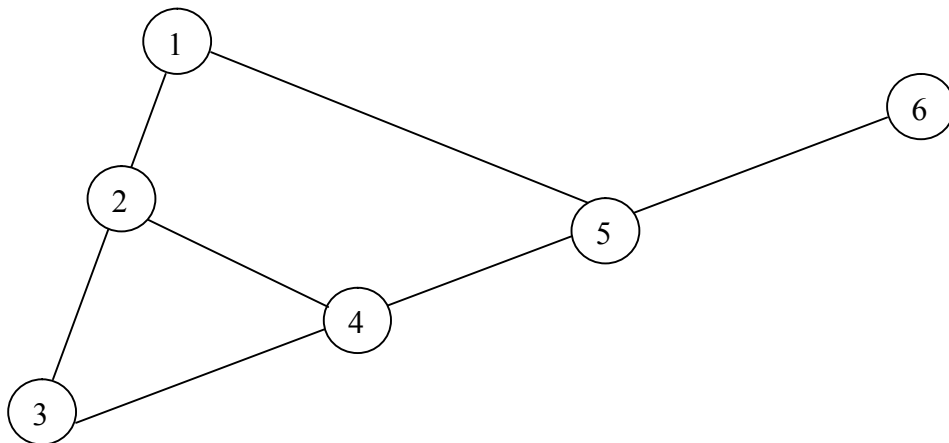


Рисунок 6.6 – Граф фрагмента ТЕКМ зв'язку в Одеській області

Матриця суміжностей графа, наведеного на рис. 6.8, має вигляд:

$$G(6,7) = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}.$$

Перенумеруємо дуги для графа, що розглядається: $(1, 2) - 1$; $(2, 3) - 2$; $(1, 5) - 3$; $(2, 4) - 4$; $(3, 4) - 5$; $(4, 5) - 6$; $(5, 6) - 7$. Тоді матриця інцидентності графа матиме вигляд:

$$B = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{vmatrix}.$$

Для досліджень в експериментальній складовій методу використано значення кількості відмов за 5 років експлуатації, довжини ліній між вузами фрагментів мережі та визначені експлуатаційні показники якості роботи ВОЛЗ.

Для подальшого дослідження експлуатаційних показників якості роботи ВОЛЗ, зокрема, значення щільності відмов m на 100 км траси та інтенсивності відмов λ , виконано розрахунки цих параметрів за виразами (4.1) та (4.6). Тоді,

для ділянки 1 – 2 $m_{12} = \frac{1}{5 \cdot 47,29} \cdot 100 = 0,423 \quad 1/\text{рік}, \quad \text{а}$

$$\lambda_{12} = \frac{m}{8760 \cdot 100} = \frac{0,423}{8760 \cdot 100} = 4,83 \cdot 10^{-7}, \quad 1/\text{год.}$$

Значення цих параметрів обчислені для інших ділянок аналогічно та зведені до табл. 6.2.

Для прискорення виконання складного алгоритму пошуку оптимального місця розташування ЗІП на даному фрагменті ТЕКМ зв'язку було розроблено дві комп'ютерні програми мовою Python, одна з яких виконує пошук за класичним методом медіани з мінімальною відстанню до ОТЕ, друга – за теоретичною складовою даного методу по критерію тяжіння до ребер фрагментів ТЕКМ зв'язку. Програмний код наведено в Додатку Д.

На основі розробленого методу медіани, що описаний в пп. 6.9.1.1 та даних табл. 6.2 було визначено матрицю R , яка має вид:

$$R = \begin{vmatrix} 341,5 \\ 256,0 \\ 294,8 \\ 247,6 \\ 261,8 \\ 482,8 \end{vmatrix}.$$

На основі теоретичної складової даного розробленого методу та даних табл. 6.2 було визначено матрицю R , яка має вид:

$$R = \begin{vmatrix} 2505,7 \cdot 10^{-7} \\ 2505,3 \cdot 10^{-7} \\ 2730,1 \cdot 10^{-7} \\ 2273,8 \cdot 10^{-7} \\ 2499,2 \cdot 10^{-7} \\ 6133,1 \cdot 10^{-7} \end{vmatrix}.$$

Для кожного ребра вибрано ОТЕ (вузол) з найменшою сумою значень параметра потоку відмов матриці W до всіх інших вузлів (табл. 6.3).

Використовуючи вираз (4.7) та дані табл. 6.2 значення параметра потоку відмов для ділянки ВОЛЗ фрагмента ТЕКМ зв'язку буде дорівнювати:

$$-\Lambda_{12} = 4,83 \cdot 10^{-7} \cdot 47,29 = 228,41 \cdot 10^{-7}, \text{ км/год.}$$

Розрахунки Λ_{ij} для інших ділянок виконані аналогічно та зведені до табл. 6.3.

На основі теоретичної складової методу та даних табл. 6.2 отримано суми параметрів потоку відмов для вершин R'_i , до яких приєднані усі ребра графа:

$$R' = \begin{vmatrix} 0 \\ 456,7 \cdot 10^{-7} \\ 0 \\ 682,6 \cdot 10^{-7} \\ 1364,5 \cdot 10^{-7} \\ 0 \end{vmatrix}$$

Аналіз результатів оптимізації підходу до визначення місця розташування ЗІП для ВОЛЗ фрагменту ТЕКМ зв'язку. На основі

Таблиця 6.2 – Реальні експлуатаційні показники якості роботи ВОЛЗ ТЕКМ зв'язку в Одеській областях за 5-річний термін

Ділянка фрагмента мережі між вузами	Кількість пошкоджень на фрагменті мережі	Довжина фрагменту мережі, L , км	Щільність відмов на 100 км траси, m , 1/рік	Інтенсивність відмов на 1 км траси, $\lambda \cdot 10^{-7}$, 1/год
1 – 2	1	47,29	0,423	4,83
2 – 3	1	16,00	1,250	14,27
1 – 5	2	52,30	0,764	8,72
2 – 4	1	23,81	0,840	9,59
3 – 4	1	31,43	0,636	7,26
4 – 5	1	33,00	0,600	6,85
5 – 6	4	55,26	1,440	16,44

Таблиця 6.3 – Результати розподілу ребер графа до його вершин

Ребра графа	Вершина, до якої відноситься ребро графа	Параметр потоку відмов ребра графа $\Lambda \cdot 10^{-7}$, км/год	Сумарне значення параметр потоку відмов для вершини $\Lambda \cdot 10^{-7}$, км/год
1 – 2	2	228,41	456,7
2 – 3		228,32	
2 – 4	4	228,34	682,6
3 – 4		228,18	
4 – 5		226,05	
1 – 5	5	456,05	1364,5
5 – 6		908,47	

експериментального дослідження оптимізації підходів до ефективного розташування ЗІП фрагменту ТЕКМ зв'язку було встановлено:

- у першому випадку, що вершина 4 має найменшу суму відстаней до усіх інших вузлів (ОТЕ) і тому за критерієм мінімальної відстані має бути обрана як місце розташування комплектів ЗІП;

- у другому випадку, що вершина 5 має найбільшу суму параметра потоку відмов у ребрах, що до неї віднесені і тому за критерієм тяжіння до фрагментів ТЕКМ зв'язку з максимальною пошкоджуваністю має бути обрана як місце розташування комплектів ЗІП.

Таким чином, ЗІП доцільно розміщувати у вершині 5, так як вона знаходиться ближче до ділянок ВОЛЗ, де ймовірність пошкоджень є вищою, що зменшує час доставки запасних частин, інструментів та приладів до потенційно-проблемних місць мережі.

Надання рекомендацій з оптимізації підходу до визначення місця розташування ЗІП фрагмента ТЕКМ зв'язку. Для оптимізації технічного обслуговування лінійних споруд ВОЛЗ при експлуатації з метою зменшення часу відновлення зв'язку технічному відділу організації зв'язку слід:

- провести аналіз чинників, які збільшують час відновлення зв'язку лінійних споруд ВОЛЗ та, в першу чергу, вияснити складові цього часу;
- особливу увагу приділити перевірці місць розташування ЗІП та часу доставки складових ЗІП до можливих місць її пошкоджень.

Висновки. Результати розробки методу оптимізації підходу до визначення місць розташування ЗІП на фрагментах ТЕКМ зв'язку при експлуатації дозволили:

- на основі обґрунтованої необхідності в методі розробити його теоретичну та експериментальну складові;
- оцінити пошкоджуваність окремих ВОЛЗ фрагменту мережі зв'язку в Одеській області та на їх основі визначити місце оптимального розташування ЗІП за критерієм максимального тяжіння до уразливих фрагментів мережі;
- надання рекомендацій з оптимізації підходу до визначення місць

розташування ЗІП фрагмента ТЕКМ зв'язку.

6.9.2 Розробка методу визначення місця розташування ЗІП за сумарним часом відновлення зв'язку та коефіцієнтом готовності

Обґрунтування необхідності методу. Приведені вище методи дозволяють визначати місце розташування комплектів ЗІП на ТЕКМ зв'язку на основі різних критеріїв. Оптимальність застосування кожного з зазначених методів вирішено проводити на основі експлуатаційних показників надійності. Як експлуатаційні показники надійності в даному випадку використано: середній час відновлення зв'язку $t_{\text{свчз}}$ та коефіцієнти простою $K_{\text{п}}$ і готовності $K_{\text{г}}$.

Згідно до [153, 213] аварійно-відновлювальні роботи (АВР) організовуються негайно після одержання відповідної інформації АББ і мають виконуватися в обсягах, що забезпечують якнайшвидше відновлення роботи ВОСП, та вестись безперервно. Тривалість АВР обчислюється з моменту повного або часткового припинення дії зв'язку до остаточного відновлення здатності пошкодженої ВОЛЗ забезпечувати роботу всіх задіяних лінійних трактів. Час, витрачений на виконання окремих операцій при проведенні АВР, визначається хронометражем та уточнюється з урахуванням перевірного розрахунку по результатам усунення пошкоджень на ВОЛЗ за минулий рік. Нормування часу на виконання АВР має враховувати застосування не лише відповідних умовам транспортних засобів і механізмів, вимірювальних приладів, комплектів інструментів та обладнання для розробки і монтажу ОК, а й автоматичних зварювальних апаратів або механічних з'єднувачів для ОВ.

В НТД [153] встановлені терміни виконання для таких робіт: визначення місця та характеру пошкодження ОК за допомогою рефлектометра (40 хв), розробка кінців ОК та підготовка до монтажу в з'єднувальній муфті (2 год), монтаж корпусу та герметизація стиків муфти (40 хв), розробка котловану над муфтою (2,7 год), але не регламентовано час під'їзду АББ до місця пошкодження, а також час доставки ЗІП у разі його відсутності на ОТЕ. Це може

суттєво привести до збільшення часу відновлювальних робіт та зменшення коефіцієнта готовності лінії.

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

Теоретична складова методу. Сумарний час відновлення зв'язку включає час виявлення місця пошкодження, під'їзду АВБ, час доставки запасних частин (за умови їх відсутності в АВБ) та час проведення аварійно-відновлювальних робіт [153]:

$$t_{\text{счвз}} = t_{\text{вияв}} + t_{\text{достЗІП}} + t_{\text{під}} + t_{\text{АВР}}, \quad (6.38)$$

де $t_{\text{счвз}}$ – сумарний час відновлення зв'язку, год; $t_{\text{вияв}}$ – час на виявлення місця пошкодження, год; $t_{\text{достЗІП}}$ – час доставки ЗІП до місця пошкодження, год; $t_{\text{під}}$ – час під'їзду АВБ до місця пошкодження, год; $t_{\text{АВР}}$ – тривалість АВР, год.

Зміна місця розташування ЗІП з одного вузла ОТЕ на інший дає зміну часу доставки ЗІП до ділянок фрагменту мережі. У випадку відсутності ЗІП на ОТЕ біля пошкодженої ділянки фрагменту мережі ВОЛЗ доставка такого ЗІП повинна здійснюватися з найближчого ОТЕ, який має такий ЗЕ.

Середній час доставки ЗІП до місця пошкодження або до певного ОТЕ можливо визначити за виразом:

$$t_{\text{сдостЗІП}} = \frac{L}{v_{\text{сдост}}}, \quad (6.39)$$

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.

Швидкість доставки (транспортування) ЗІП з іншого ОТЕ залежить від стану дороги, міської, приміської чи позаміської завантаженості. Тому, якщо маршрут доставки ЗІП включає автодороги різного призначення, середню швидкість доставки ЗІП слід визначати за виразом:

$$t_{\text{сдостЗІП}} = \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{v_{\text{сдост}i}}, \quad (6.40)$$

де $t_{\text{сдостЗП}}$ – середній час доставки ЗП, год; i – номер ділянки маршруту доставки ЗП; n – кількість ділянок маршруту доставки ЗП; L_i – довжина i -ої ділянки маршруту доставки ЗП, км; $v_{\text{сдост}i}$ – середня швидкість доставки ЗП на i -ій ділянці маршруту доставки ЗП, км/год.

Збільшення $t_{\text{счвз}}$ приводить до зменшення K_{Γ} ВОЛЗ та вимагає особливої уваги до чотирьох його складових.

Згідно до [4] для вирішення задач оптимізації щодо коефіцієнта простою ВОЛЗ варто використовувати вираз виду:

$$K_{\Pi} = \frac{\Lambda \cdot t_{\text{счвз}}^{\Pi}}{1 + \Lambda \cdot t_{\text{счвз}}^{\Pi}}, \quad (6.41)$$

де K_{Π} – коефіцієнт простою ЛЗ ВОСП; Λ – параметр потоку відмов для періоду нормальної експлуатації ВОЛЗ, 1/год; $t_{\text{счвз}}^{\Pi}$ – середній час відновлення при пошкодженнях з перервою зв'язку, год.

Складову коефіцієнта простою ВОЛЗ за рахунок часу доставки ЗП до місця пошкодження або до ОТЕ, де перебуває АББ, можливо визначити за виразом [4]:

$$K_{\text{пЗП}} = \frac{\Lambda \cdot t_{\text{сдостЗП}}^{\Pi}}{1 + \Lambda \cdot t_{\text{сдостЗП}}^{\Pi}}, \quad (6.42)$$

де $K_{\text{пЗП}}$ – складова коефіцієнта простою ЛЗ ВОСП за рахунок часу доставки ЗП; Λ – параметр потоку відмов для періоду нормальної експлуатації ВОЛЗ, 1/год; $t_{\text{сдостЗП}}^{\Pi}$ – середній час доставки ЗП при пошкодженнях з перервою зв'язку, год.

Для визначення сумарної складової коефіцієнта простою за рахунок часу доставки ЗП використано вираз:

$$K_{\text{пЗП}\Sigma} = \frac{\sum_{i=1}^n L_i \cdot K_{\text{пЗП}i}}{\sum_{i=1}^n L_i}, \quad (6.43)$$

де $K_{\text{пЗП}\Sigma}$ – сумарний коефіцієнт часу простою всіх фрагментів ТЕКМ зв'язку за рахунок доставки ЗП; i – номер вузла; n – кількість вузлів у мережі; L_i – довжина

ділянки фрагмента мережі ВЛЗ, км; $K_{пзПi}$ – коефіцієнти часу простою лінії i -го фрагменту ТЕКМ зв'язку за рахунок доставки ЗП.

За результатами розрахунків $K_{пзП}$ за виразами (6.37) – (6.42) у кожному з вузлів ОТЕ, що розглядаються для розташування в ньому ЗП, необхідно обрати той, у якому коефіцієнт готовності найбільший.

Експериментальна складова методу. Для реалізації експериментальної складової методу використаний метод з оптимізації підходів до визначення місця розташування ЗП фрагмента ТЕКМ зв'язку, приведений в пп.6.9.1.2. Зміна місця розташування ЗП з вузла 4 на вузол 5, що виявлено з результатів досліджень, приводять до зміни часу доставки ЗП (у випадку їх відсутності в АВБ).

Використовуючи реальний фрагмент ТЕКМ зв'язку (рис. 6.6) та вирази (6.38) – (6.40) визначено $t_{сдотЗП}^п$ до кожної ділянки мережі зв'язку при середній швидкості доставки ЗП на усіх ділянках – 40 км/год.

Розрахунок середнього часу доставки ЗП від місця його розташування до ділянок фрагменту ТЕКМ зв'язку проведено на основі виразу (6.39):

$$1. \text{ При доставці ЗП з вузла 4 до ділянка 1 – 5: } t_{сдотЗП} = \frac{33 + 52,3}{40} = 2,13 \text{ год.}$$

$$2. \text{ При доставці ЗП з вузла 5 до ділянка 1 – 5: } t_{сдотЗП} = \frac{52,3}{40} = 1,31 \text{ год.}$$

Обчислення $t_{сдотЗП}^п$ з вузла 4 до ділянок 1 – 2 і 2 – 3 та з вузла 5 до ділянок 1 – 2 і 2 – 3 розраховані аналогічно. Результати визначення часу доставки ЗП (у випадку їх відсутності в АВБ) представлена в табл. 6.4.

За даними табл. 6.2 і 6.4 та виразу (6.42) визначено складову коефіцієнта простою за рахунок доставки ЗП при його розташуванні у вузлах 4 та 5. Результати розрахунку складової коефіцієнта простою $K_{пзП}$ подані в табл. 6.5.

Сумарний коефіцієнт простою за рахунок часу доставки ЗП визначено за виразом (6.43):

– при розміщенні ЗП в вузлі 4:

$$K_{пзП\Sigma} = \frac{(52,3 \cdot 9,71 + 47,29 \cdot 4,01 + 16 \cdot 2,28 + 23,81 \cdot 1,37 + 31,43 \cdot 1,8) \cdot 10^{-5}}{52,3 + 47,29 + 16 + 23,81 + 31,43 + 33 + 55,26} +$$

$$+ \frac{(33 \cdot 1,88 + 55,26 \cdot 19,35) \cdot 10^{-5}}{52,3 + 47,29 + 16 + 23,81 + 31,43 + 33 + 55,26} = 7,54 \cdot 10^{-5};$$

– при розміщенні ЗІП в вузлі 5:

$$K_{\text{пзпс}} = \frac{(52,3 \cdot 5,97 + 47,29 \cdot 5,69 + 16 \cdot 4,16 + 23,81 \cdot 3,24 + 31,43 \cdot 3,67) \cdot 10^{-5}}{52,3 + 47,29 + 16 + 23,81 + 31,43 + 33 + 55,26} +$$

$$+ \frac{(33 \cdot 1,88 + 55,26 \cdot 12,54) \cdot 10^{-5}}{52,3 + 47,29 + 16 + 23,81 + 31,43 + 33 + 55,26} = 6,16 \cdot 10^{-5}.$$

Складова коефіцієнта готовності за рахунок доставки ЗІП можливо визначити за виразом (4.13): – при розміщенні ЗІП в вузлі 4: $K_{\text{гзп}} = 1 - 0,0000754 = 0,999925$; – при розміщенні ЗІП в вузлі 5: $K_{\text{гзп}} = 1 - 0,0000616 = 0,999938$.

Аналіз результатів визначення місця розташування ЗІП. На основі результатів експериментального дослідження оптимізації підходу до визначення місця розташування ЗІП було встановлено, що: – результати розрахунку за виразом (6.43) показали, що сумарна складова коефіцієнта простою за рахунок доставки ЗІП 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; – використовуючи вираз (4.13) 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 фрагменту ТЕКМ зв'язку має бути обрана як місце розташування комплекту ЗІП, так як вона зменшує час доставки запасних частин, інструментів та приладь до потенційно проблемних місць мережі.

Рекомендації з використання методу. Для оптимізації технічного обслуговування лінійних споруд ВОЛЗ при експлуатації з метою зменшення часу та відстані доставки запасних елементів (ЗЕ) до найбільш уразливих її ділянок та збільшення коефіцієнту готовності слід:

- зменшити сумарний час відновлення зв'язку за рахунок приділення особливої уваги до усіх складових часу відновлення зв'язку;
- при виборі оптимального місця розташування ЗІП використовувати вирази (6.37) – (6.42) для кожного з вузлів ОТЕ, що розглядається та обрати той, у якого значення коефіцієнта готовності найбільше.

Таблиця 6.4 – Зміна часу доставки ЗІП за рахунок зміни їх місця розташування

Ділянка фрагмента мережі	Середній час підвезення ЗІП до ділянки		Зміна часу доставки, %
	З вузла 4	З вузла 5	
1 – 5	2,13	1,31	-38,5
1 – 2	1,78	2,49	+39,9
2 – 3	1,00	1,82	+82,0
2 – 4	0,60	1,42	+136,0
3 – 4	0,79	1,61	+103,8
4 – 5	0,83	0,83	–
5 – 6	2,21	1,38	-37,6

Таблиця 6.5 – Зміна коефіцієнта простою фрагмента ТЕКМ зв'язку в Одеській області за рахунок зміни розташування ЗІП

Фрагмент мережі	Параметр потoku відмов, $\Lambda \cdot 10^{-7}$, км/год	Довжина фрагменту	Коефіцієнт простою, $K_{\text{пЗІП}} \cdot 10^{-5}$	
			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

Висновки. Таким чином, метод дозволив: – оцінити складові коефіцієнтів простою та готовності за рахунок розташування ЗІП на різних ОТЕ Одеської області; – зменшити значення $K_{\text{пзпг}}$ даної мережі ВОЛЗ на 20 % (в 1,25 рази); – створити теоретичну та практичну базу з визначення місця оптимального розташування ЗІП на мережі зв'язку для рекомендації підрозділам технічної експлуатації лінійних споруд ВОЛЗ.

6.10 Вибір математичних моделей визначення оптимального місця розташування запасних частин фрагменту мережі ВОЛЗ

Вибір оптимального місця розташування запасних частин фрагменту мережі ВОЛЗ може бути реалізовано за допомогою різних математичних моделей та алгоритмів оптимізації. Для досягнення даної мети можна використовувати математичні моделі приведені у Додатку Е.

Вибір математичної моделі залежить від конкретних характеристик фрагменту мережі, об'ємів даних та інших факторів. Важливо врахувати реальні умови та обмеження для створення реалістичної та ефективної моделі.

6.11 Висновки до шостого розділу

В даному розділі з забезпечення надійності волоконно-оптичних ліній зв'язку комплектами ЗІП було:

А. Виконано:

- узагальнення підходів до забезпечення рівня надійності ВОЛЗ запасними елементами ЗІП. При цьому показано стратегії поповнення запасів комплектів ЗІП ліній, послідовність розрахунку показників достатності одиночного, ремонтного та групового комплектів ЗІП, оптимальне проєктування системи ЗІП складної структури;

- обґрунтування підходів з оптимізації розташування запасних частин ЗІП на мережі ВОЛЗ, в рамках яких:

а) аналіз існуючого методу визначення місця розташування ЗІП за критерієм мінімально відстані між вузлами;

б) розроблено метод визначення місця розташування ЗІП за відстанню між вузлами та інтенсивністю відмов ВОЛЗ;

в) розроблено метод визначення місця розташування ЗІП за сумарним часом та коефіцієнтом готовності;

г) розроблено низку математичних моделей визначення оптимального місця розташування запасних частин на фрагменті мережі ВОЛЗ.

Б. Встановлено, що:

— визначення оптимального місця розташування ЗІП на фрагментах ЕКМ зв'язку можливо виконувати за моделлю мережі, побудованої за допомогою теорії графів, та доцільно проводити не лише за відстанню між вузлами, а й за показниками експлуатаційної надійності лінійних споруд ВОЛЗ:

а) використовуючи розроблений метод визначення місця розташування ЗІП за відстанню між вузлами та інтенсивністю відмов ВОЛЗ, який за величиною параметра потоку відмов дає змогу визначати на фрагменті ЕКМ 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;

б) використовуючи розроблений метод визначення місця розташування ЗІП за сумарним часом відновлення зв'язку та коефіцієнтом готовності ВОЛЗ, який за величиною складових часу відновлення зв'язку та часу доставки ЗІП до місця пошкодження (у випадку його відсутності в АББ) дає змогу оцінити зміни складової коефіцієнта готовності за рахунок доставки ЗІП. Це 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 коефіцієнта простою на 20 % (в 1,25 рази);

В. Рекомендовано:

а) приведені результати досліджень з забезпечення надійності волоконно-оптичних ліній зв'язку комплектами ЗІП слід вважати рекомендаційними матеріалами для лінійного персоналу підприємств зв'язку;

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

ВИСНОВКИ

У дисертації сформульована, досліджена й вирішена наукова проблема – забезпечення надійності волоконно-оптичних ліній зв'язку на етапах проєктування та експлуатації. Результатом роботи став розвиток теорії забезпечення надійності сучасних ВОЛЗ на етапах життєвого циклу ВОСП. У роботі створено низку методів з: – забезпечення технічної та економічної ефективності проєктування та експлуатації ВОЛЗ оптимальними модульними конструкціями ОК; – розвитку теорії забезпечення надійності ВОЛЗ при проєктуванні та експлуатації за оцінкою необхідної конструкції ОК; – 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 наступному:

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 оптичного кабелю; – розвиток та обґрунтування теорії забезпечення надійності на етапах проєктування ВОЛЗ та її компонентів.

2. Розроблено два методи багатокритеріальної оптимізації модульних конструкцій оптичного кабелю для абонентських ліній. На основі сформульованих критеріїв структурної та параметричної оптимізації моделей багатоповивного осердя кабелю методи запропоновано використовувати на етапах проєктування ВОЛЗ для прискореного вибору оптимальної конструкції кабелю: – один за технічною, а другий – за 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 оптичних волокон. Результати досліджень в методах 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. За допомогою методу встановлені 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 ОК з оптимальними силовими та іншими конструктивними елементами. Дослідження показали, що використання арамідних ниток в якості периферійного 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 ($\epsilon_{\text{дк}}(t)$, $k_{\text{п}}$, $F_{\text{дкЦСЕ}}(t)$) оптичного кабелю та його елементів встановлено, що через менше значення температурного коефіцієнта лінійного розширення матеріалу оптичні волокна із-за гелікоїдального розташування в

трубці оптичного модуля стають довшими за неї, що дає технологічний запас волокна та збільшення $F_{\text{мк}}$ конструкції кабелю.

5. Удосконалено послідовність проєктування 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 проєктуванні 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 на 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 транспортної електронної комунікаційної мережі зв'язку.

7. Для оцінки механічного стану ОВ в осерді діелектричного самоутримного оптичного кабелю при експлуатації розроблено метод. Встановлено зв'язок фактичної механічної напруги в конструкції діелектричного самоутримного оптичного кабелю при фізико-кліматичних навантаженнях 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 запасних частин, інструментів і приладь розроблено методи визначення місця їх розташування 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 електронної комунікаційної мережі 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 об'єкта технічної експлуатації 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 підрозділам зв'язку здійснювати якісний контроль показників експлуатаційної надійності та часу відновлення зв'язку ЗІПами фрагменту 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 «ОНДІЗ» в галузі волоконної оптики. До таких результатів відносяться: а) метод контролю ймовірнісних показників надійності лінійних споруд ВОЛЗ при 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 відносяться: 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 відносяться: 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 відносяться: а) метод контролю технічного стану лінійних споруд ВОЛЗ при експлуатації в різних фізико-кліматичних умовах; б) практичні рекомендації з оцінки ймовірнісних показників надійності ЛС ВОЛЗ;

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

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про електронні комунікації: Закон України від 16.12.2020 р. № 1089-IX. Дата оновлення: 01.07.2024. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1089-20/ed20240701#Text> (дата звернення: 13.08.2024).
2. Паспорт спеціальності 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі. Постанова Президії ВАК України за № 25-08/1 від 15.01.2003. URL: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v08_1330-03#Text (дата звернення: 13.08.2024).
3. Иоргачев Д.В., Бондаренко О.В., Дашенко А.Ф., Усов А.В. Волоконно-оптические кабели. Теоретические основы, конструирование и расчет, технология производства и эксплуатация : монография. Одесса: Астропринт, 2000. 536 с. ISBN 966-549-542-9.
4. Бондаренко О.В. Методологія забезпечення надійності волоконно-оптичних ліній передавання : дис. ... доктора технічних наук : 05.12.02. Одеса, 2010. 415 с.
5. Васілевський О.М., Поджаренко В.О. Нормування показників надійності технічних засобів: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2010. 129 с.
6. Нечипоренко О.М. Основи надійності літальних апаратів: навч. посібник. Київ: НТУУ «КПІ», 2010. 239 с.
7. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення. [Чинний від 1996-01-01]. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України, 1994. 91 с.
8. ДСТУ 2861-94. Надійність техніки. Аналіз надійності. Основні положення. [Введ. з 1994-12-8]. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України, 1994. 32 с.
9. ДСТУ 2862-94. Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності. Загальні вимоги. [Чинний від 1997-01-01]. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України, 1994. 39 с.
10. ДСТУ 2863-94. Надійність техніки. Програма забезпечення надійності. Загальні вимоги. [Введ. з 1994-12-8]. Вид. офіц. Київ: Держстандарт

України, 1994. 37 с.

11. ISO 9000:2015. Quality management systems – Fundamentals and vocabulary. Ver. 4, 2015. URL: <https://www.iso.org/ru/standard/45481.html# lifecycle> (дата звернення: 13.08.2024).

12. ITU-T Recommendation G.911. Parameters and calculation methodologies for reliability and availability of fibre optic systems, 1997. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.911> (дата звернення: 20.08.2024).

13. IEC 60050-192:2015. International Electrotechnical Vocabulary (IEV) - Part 192: Dependability. [Publication date: 2016-03-23] URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/24394> (дата звернення: 25.08.2024). ISBN 9782832232590. 2 p.

14. Міляєв Ю.П., Нечипоренко О.М. Основи надійності технічних систем: навч. посіб. Київ : Видавн.-полігр. центр Акад. муніцип. управління, 2008. 246 с.

15. Технічна експлуатація засобів та систем зв'язку: навч. посіб. / Л. М. Сакович та ін. Київ : ІСЗЗІ КПП ім. Ігоря Сікорського, 2021. 176 с.

16. Абрамович О.О., Грібов В.М. Надійність і діагностика технічних систем: навч.-метод. посіб. Національний авіаційний ун-т. Київ: НАУ, 2005. 120 с.

17. Коренівська О.Л., Бенедицький В.Б. Теорія надійності, експлуатації та ремонту радіоелектронної та телекомунікаційної техніки: навч. посібник. Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2020. 180 с.

18. Кустов В.Ф. Основи теорії надійності та функційної безпечності систем залізничної автоматики: навчальний посібник. Харків: УкрДАЗТ, 2008. 218 с.

19. Лесовой И.П., Одинцов Н.Н., Степанов Д.Н. Вариационные методы анализа направляющих систем поперечного сечения сложной формы. Научно-производственный сборник «Научові записки українського науково-дослідного інституту зв'язку». 2013. Вип. № 4(28). С. 22 – 27.

20. Кабелі оптичні для сільських мереж зв'язку. Технічні умови. ТУ-У 05758730.008-98: 1998. [Чинні від 1998-04-01]. Одеса: УРУ Держстандарта Одеський центр стандартизації і метрології, 1998. (Технічні умови ВАТ

«Одеськабель»).

21. Mahlke G., Gossing P. Fiber Optic Cables – Fundamentals, Cable Design, System Planning, 4th edition, MCD Corporate Publishing, Munich, 2001. 302 p.

22. Günter B. The global cable industry: materials, markets, products. Sidney: John Wiley & Sons, 2021. 416 p. ISBN: 978-3-527-34627-1. DOI: 10.1002/9783527822263.

23. ГБН В.2.2-34620942-002:2015. Лінійно-кабельні споруди телекомунікацій. Проектування. [наказ №117 від 5.03.2015]. Київ: Адміністрація Держспецзв'язку, 2015. 140 с.

24. Р 45-010-2002. Рекомендації з підвішування оптичних кабелів на опорах повітряних ліній зв'язку, ЛЕП, контактної мережі залізниць. К.: Державний комітет зв'язку та інформатизації України, 2004. 95 с.

25. КНД 45-141-99. Керівництво щодо будівництва лінійних споруд волоконно-оптичних ліній зв'язку. К.: Держкомзв'язку та інформатизації України. 2000. 150 с. (Національний стандарт України).

26. КНД 45-136-99. Інструкція по захисту волоконно-оптичних кабелів зв'язку від ударів блискавки та електромагнітних впливів. К.: Зв'язокпідземзахист. 1999. 130 с.

27. КНД 45-188-2002. Інструкція з електрозахисту підземних металевих споруд зв'язку. [Чинний. від 04.01.2003 р.]. К.: Держкомзв'язку та інформатизації України. 2002. 100 с. (Національний стандарт України).

28. КНД 45-140-99. Правила технической эксплуатации первичной сети ЕНСС Украины, ч.1. Основные принципы построения и организации технической эксплуатации. К.: Госком связи и информатизации Украины, 2000. 81 с. (Національний стандарт України).

29. КНД 45-189-2003. Керівництво з експлуатації лінійно-кабельних споруд місцевих мереж зв'язку. [Чинний від 30.12.2003]. К.: Державний комітет зв'язку та інформатизації України, 2004. 231 с. (Національний стандарт України).

30. КНД 45-111-99. Організація технічного обслуговування та проведення ремонтних робіт на кабельних лініях первинної мережі виробничими

підрозділами підприємств електрозв'язку. [Чинний від 15.01.1999]. К.: Державний комітет зв'язку та інформатизації України, 2002. 141 с. (Національний стандарт України).

31. ПАТ «Одескабель». Волоконно-оптичні кабелі [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://odeskabel.com/en/products/vok-kabeli.html> (дата звернення 20 вересня 2024).

32. ПАТ «Завод «Південкабель»». Волоконно-оптичні кабелі [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.yuzhcable.info/index.php?CAT=50&ENG=1> (дата звернення 20 вересня 2024).

33. Kanamori, Hiroo "Fifty year history of optical fibers". Sei Technical Review, Num. 91. Oct. 2020. 15 p.

34. Каток В.Б., Руденко І.Е., Ранський Є.Г., Однорог П.М. Волоконно-оптичний зв'язок. Київ, Логос, 2015. 481 с.

35. Бондаренко О.В., Воробієнко П.П., Коляденко В.А., Потапова-Сінько Н.Ю. Методологічні аспекти розрахунку повної собівартості волоконно-оптичного кабелю. *Науково-теоретичний журнал Хмельницького економічного університету «Наука й економіка»*. Хмельницький, 2013. Вип. № 1 (29). С. 164 – 172.

36. Скубак О.М., Онищенко В.В., Манько О.О., Ніколов К.О. Надійність оптичних кабелів з оптичними волокнами нових типів. *Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку*. Київ, 2015. Вип. № 3. С. 43 – 49.

37. Бондаренко О.В. Розробка методу розрахунку стійкості діелектричних оптичних кабелів до розтягуючих навантажень. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: “Обчислювальна техніка та автоматизація”*. Донецьк, 2009. Вип. 17(148). С. 64 – 68.

38. Скубак О. М. Поведінка оптичного кабелю мереж доступу під дією зовнішніх факторів / О.М. Скубак // *Науково-технічний журнал Сучасний захист інформації*, 2013. Вип. №1. С. 39 – 44.

39. Розорінов Г.М., Соловьев Д.О. Високошвидкісні волоконно-оптичні

лінії зв'язку: навч. посіб. для студ. вузів за спец. «Радіотехніка» та «Електроніка». Київ: Ліра-К, 2007. 198 с.

40. Захарченко М.В., Бондаренко О.В. Вплив конструкції оптичного кабелю на стабільність параметрів передавання. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. Харків, 2009. Вип. 4/11 (40). С. 31 – 34.

41. Hirofumi Takai, Osamu Yamauchi. Optical fiber cable and wiring techniques for fiber to the home (FTTH). Optical Fiber Technology. Tsukuba, Ibaraki 305-0805, Japan: NTT Access Network Service Systems Laboratories, 2009, Volume 15, Issue 4, P. 380 – 387. doi.org/10.1016/j.yofte.2009.04.002.

42. Hisashi Tanji. Optical fiber cabling technologies for flexible access network. Optical Fiber Technology, Taya-cho, Sakae-ku, Yokohama 244-8588, Japan: Optical Communications R&D Laboratories, Sumitomo Electric Industries, Ltd., Volume 14, Issue 3, July 2008, P. 177 – 184. doi.org/10.1016/j.yofte.2007.11.006.

43. Mohammad Amin Shoaie, Stefano Meroli, Simao Machado, Daniel Ricci. Evolution of optical fibre cabling components at CERN: Performance and technology trends analysis. Optical Fiber Technology, Geneva 23, Switzerland: European Organization for Nuclear Research (CERN). Volume 42, May 2018, Pages 69-74. doi.org/10.1016/j.yofte.2018.02.002.

44. Yin-can YE, Xinmin Jiang, Guofu Pan, Wei Jiang. Submarine Optical Cable Engineering. China: Elsevier Inc., 2018. 356 p. doi.org/10.1016/C2016-0-04709-5.

45. José Chesnoy. Undersea Fiber Communication Systems. Paris, France: Ex-CTO of Alcatel-Lucent Submarine Networks, Elsevier Inc., 2016. 669 p. doi.org/10.1016/C2015-0-00778-X.

46. J. Canudo, P. Sevillano, A. Iranzo, S. Kwik, J. Preciado-Garbayo and J. Subías, "Overhead Transmission Line Sag Monitoring Using a Chirped-Pulse Phase-Sensitive OTDR," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 24, no. 2, pp. 1988-1995, 15 Jan.15, 2024, doi: 10.1109/JSEN.2023.3340296.

47. 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*

транспорт. Донецьк, 2013. Вип. №33. С. 86 – 92

48. Stepanov D.M. Estimation of transmission parameters of dielectric self-supporting optical cables in the exploitation conditions. *Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах»*. 2014. Вип. № 1. С. 50 – 56.

49. Корчевський О. С., Коломієць Л. В. Механічні характеристики волоконно-оптичних кабелів. *Збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості*. Одеса, 2015. Вип. 2(7), С. 68 – 72. DOI: <https://doi.org/10.32684/2412-5288-2015-2-7-68-72>.

50. Barry Elliott. Fiber optic cabling (second edition) / B. Elliott, M. Gilmore. – Newnes, Elsevier, 2002, 318 p. ISBN 978-0-7506-5013-7. DOI: 10.1016/B978-0-7506-5013-7.X5000-4.

51. Bondarenko O.V., Stepanov D.M., Stastchuk O.M. Technique of determination of modules tube diameter and possible lengthening of optical cables construction. *Inter-universities scientific articles «Photoelectronics»*. Одеса, 2011. Вип. № 20. С. 76 – 80.

52. Бондаренко О.В., Степанов Д.М., Власов О.М., Назаренко А.Ф. Дослідження механічної напруги в діелектричному самонесучому волоконно-оптичному кабелі під дією розтягувальних зусиль та температури. Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: “Обчислювальна техніка та автоматизація”. Донецьк, 2011. Вип. 20 (182). С. 174 – 179.

53. Степанов Д.М. Оцінка параметрів передачі діелектричних самонесучих оптичних кабелів в умовах експлуатації : дис. ... кандидата технічних наук : 05.12.20. Одеса, 2012. 274 с.

54. Бондаренко О.В., Степанов Д.М., Семенова О.М. Діелектричні самонесучі оптичні кабелі для повітряних ліній зв'язку і залізниць. Цифрові технології: зб. наук. праць. Одеса, 2011. Вип. № 9. С. 42 – 51.

55. Довгий С.О., Воробієнко П.П., Гуляєв К.Д. Сучасні телекомунікації: мережі, технології, безпека, економіка, регулювання. – Видання друге (доповнене): монографія / за загальною ред. С.О. Довгого. Київ: «Азимут-

Україна». 2013. 608 с. ISBN 978-966-1541-46-6.

56. Govind, P. Agraval Lightwave technology: telecommunication systems / P. Govind Agraval. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, The USA, 2005. 449с.

57. Одинцов Н.Н., Стащук О.М. Исследование поляризационной дисперсии волоконных световодов, изогнутых по спирали. *Наукові праці ОНАЗ ім О. С. Попова*. Одеса, 2009. №2. С. 40 – 44.

58. Стащук О.М. Компенсація внутрішньомодової дисперсії в анізотропному фотопружному оптичному волокні / О.М. Стащук // *Вісник Хмельницького Національного університету*. Хмельницький, 2009. Вип. 4. С. 230 – 233.

59. ITU-T Recommendation G.602. Reliability and availability of analogue cable transmission systems. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.602> (дата звернення: 05.09.2024).

60. ДБН А.2.2-3:2014. Склад та зміст проектної документації на будівництво. [Чинний від 01.10.2014]. К.: Мінрегіон України, 2014. 29 с.

61. ДБН В.1.2-14:2018 Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. Зі зміною № 1. [Чинний від 01.09.2022]. К.: Міністерство розвитку громад та територій України, 2022. 59 с.

62. ДСТУ 8855:2019 Будівлі та споруди. Визначення класу наслідків (відповідальності). [Чинний від 01.12.2019]. К.: ДП «УкрНДНЦ», 2019. 17 с.

63. Smith J., Johnson R., Liu H. Challenges in Optical Fiber Deployment. *Journal of Optical Communications*, 2021. №12(3), P. 123 – 135. <https://doi.org/10.1007/s11082-021-03032-1>.

64. Johnson R., Lee S. Advances in Optical Fiber Cable Design for Harsh Environments. *Optical Fiber Technology*, 2022. № 45, P. 202 – 210. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2022.102036>.

65. Brown A., Williams T., Green P. Mechanical Properties of ADSS Cables in

High Wind Environments. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2020. 35(1), P. 45 – 53. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2019.2923856>.

66. Seraji, F.E., Emami, A. & Chaghazardi, E. To optimize fiber lay length in OPGW cables used in power transmission networks. *Optical Quant Electron*, 2022. Vol. 54, №285. <https://doi.org/10.1007/s11082-022-03664-1>.

67. Gunes I. Examination of wind effect on ADSS cables aging test / I. Gunes // *Electrica*, 2018. Vol. 18, №2. pp. 321 – 324.

68. Shenghan Zhang, Han Liu , Sanjay Govindjee and Matthew J. DeJong Strain Transfer Mechanisms and Mechanical Properties of Optical Fiber Cables. *Sensors*, 2022. Vol. 22, № 9966. doi.org/10.3390/s22249966.

69. Meng, X., Ren, Q., Xiao, S., Chen, B. and Li, H. Numerical simulation of mechanical characteristics and tension-torsion coupling effect of tension-type anchor cable, *Engineering Computations*, 2023. Vol. 40 No. 9/10, pp. 2730-2753. <https://doi.org/10.1108/EC-08-2023-0440>.

70. The external mechanical effects on the value of additional losses in the telecommunications fiber optic cables under operating conditions / [A. Mekhtiyev, F. Bulatbayev, Y. Neshina, E. Siemens, A. Alkina and T. Shaigarayeva] // *Elektrotechnik, Maschinenbau und Wirtschaftsingenieurwesen*. 2018. – Vol. 6. P. 123 – 127. DOI:10.13142/kt10006.43.

71. Бондаренко О.В. Методика розрахунку модульної конструкції оптичного кабелю по розтягуючому зусиллю. Моделирование и информационные технологии: сб. науч. трудов, Институт проблем моделирования в энергетике им. Г.Е. Пухова НАН Украины. 2009. Вып. 54. С. 31 – 34.

72. Bondarenko O.V., Stepanov D.M., Stastchuk O.M. Technique of determination of modules tube diameter and possible lengthening of optical cables construction. *XIth International Conference «The experience of designing and application of CAD Systems in microelectronics»*, Lviv, 23 – 25 febr. 2011. Lviv: Polytechnic National University, 2011. P. 174 – 175.

73. Бондаренко О.В., Захарченко Н.В., Степанов Д.Н. Последовательность выбора конструкции элементов оптического кабеля. *Міжнародна наук.-прак.*

конф. «Сенсорна електроніка «Сенсор-2009»», Одеса, 1 – 4 чер. 2009 р. Одеса, 2009. С. 23 – 24.

74. Бондаренко О.В., Степанов Д.М. Особливості розробки багатоповивних оптичних кабелів. *Матеріали 63-ї наук.-тех. конф. проф.-викл. складу, науковців, аспірантів та студентів ОНАЗ ім. О.С. Попова*, м. Одеса, 26 лис. – 02 груд. 2008 р. Одеса, 2009. С. 13 – 15.

75. Степанов Д.М. Визначення допустимого видовження оптичного кабелю. *Матеріали 5-ої міжнар. наук.-техн. конф «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування»*, Вінниця, 19 – 21 трав. 2011 р. Вінниця, 2011. С. 98 – 99.

76. Каток В.Б., Руденко І.Е. Основні напрямки стандартизації оптичних кабелів зв'язку. *Зв'язок*, 2005. № 4. С. 17 – 22.

77. Каток В.Б., Руденко І.Е. Стійкість оптичних кабелів до впливів навколишнього середовища. *Зв'язок*, 2008. № 5-6. С. 24 – 28.

78. ITU-T Recommendation L.10 (12/2002) Optical fibre cables for duct, tunnel, aerial and buried application. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-L.100-202401-I/en> (дата звернення: 15.09.2024).

79. ITU-T Recommendation L.26 (08/15) Optical fibre cables for aerial application. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-L.26-201508-I> (дата звернення: 15.09.2024).

80. ITU-T Recommendation L.43 (08/15) Optical fibre cables for buried application. URL: <https://www.itu.int/itu-t/recommendations/rec.aspx?rec=12531&lang=ua> (дата звернення: 15.09.2024).

81. ITU-T Recommendation L.59 (09/2004) Optical fibre cables for indoor application. URL: <https://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?id=7381&lang=en> (дата звернення: 15.09.2024).

82. ITU-T Recommendation L.67 (10/2006) Small count optical fibre cables for indoor applications. URL: <https://handle.itu.int/11.1002/1000/8926> (дата звернення: 15.09.2024).

83. ITU-T Recommendation L.78 (05/2008) Optical fibre cable construction

for sewer duct applications. URL: <https://handle.itu.int/11.1002/1000/9428> (дата звернення: 15.09.2024).

84. ITU-T Recommendation L.87 (07/2010) Optical fibre cables for drop applications. URL: <https://handle.itu.int/11.1002/1000/10920> (дата звернення: 15.09.2024).

85. ITU-T G.Sup.40 (10/2018). Optical fibre and cable Recommendations and standards guideline. URL: <https://handle.itu.int/11.1002/1000/13823> (дата звернення: 15.09.2024).

86. 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.

87. Мурадян Л.Л. Апробация методики расчета конструкции СОК по растягивающим усилиям. *Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова*. Одеса, 2007. Вип. № 1. С. 158 – 160.

88. Кабелі зв'язку оптичні для магістральних зонових та міських мереж зв'язку. Технічні умови. ТУ-У 05758730.007-97: 1997. [Чинні від 1997-12-10]. Одеса: УРУ Держстандарта Одеський центр стандартизації і метрології, 1997. 69 с.: табл. 12. (Технічні умови ВАТ «Одескабель»).

89. Сталий розвиток і цифрові інновації : 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. 543 с. ISBN 978-617-14-0253-9. DOI <https://doi.org/10.31520/978-617-14-0253-9>.

90. 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.

91. Степанов Д.М., Свердлова 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.

92. 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.

93. Стащук О.М., Степанов Д.М., Багачук Д.Г. Вплив хімічного складу скла оптичного волокна на матеріальну дисперсію сигнал. *Науковий журнал «Вісник Хмельницького національного університету»*. 2015. Вип. № 6 (231). С. 234 – 237.

94. 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.

95. Стащук О.М., Степанов Д.М., Багачук Д.Г. Вплив хімічного складу скла оптичного волокна на хвилеводну дисперсію сигналу. *Науковий журнал «Вісник Вінницького політехнічного інституту»*. 2016. Вип. № 2 (125). С. 157 – 160.

96. 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.

97. 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.

98. Бондаренко О.В., Иоргачев Д.В., Мурадян Л.П. Внутриобъектовые оптические. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. 2001.

Вип. № 4 – 5. С. 23 – 29.

99. Бондаренко О.В., Степанов Д.М. Особливості розробки багатоповивних оптичних кабелів. *Матеріали 63-ої наук.-тех. конф. проф.-викл. складу, науковців, аспірантів та студентів ОНАЗ ім. О.С. Попова*, м. Одеса, 26 лис. – 02 груд. 2008 р. / ОНАЗ ім. О.С. Попова. Одеса, 2009. С. 13 – 15.

100. 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. ОНАЗ ім. О.С. Попова*, м. Одеса, 5 – 7 груд. 2012 р. / ОНАЗ ім. О.С. Попова. Одеса, 2012. С. 86 – 88.

101. Бортник Г. Г., Кичак В. М., Стальченко О. В., Яблонський В. Ф. Мережі абонентського доступу: навчальний посібник. Вінниця: УНІВЕРСУМ, 2008. 201 с.

102. Воробієнко П.П., Нікітюк Л.А., Резніченко П.І. Телекомунікаційні та інформаційні мережі : підручник [для вищих навчальних закладів]. К.: САММІТ-Книга, 2010. 708 с.: іл.

103. Farmer J., Lane B., Biurg K., Wanf W. FTTX Networks: Technology Implementation and Operation [Electronic resource] / Farmer J., Lane B., Biurg K., Wanf W. Access mode: <https://www.sciencedirect.com/book/9780124201378/fttx-networks#book-info>. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2013-0-12891-7>.

104. Голь В.Д., Ірха М.С. Телекомунікаційні та інформаційні мережі: навчальний посібник. Київ : ІСЗЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 250 с.

105. Вакуленко О.В., Голь В.Д., Ірха М.С., Хахлюк О.А. Лінії передачі: підручник. Київ: ІСЗЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 218 с.

106. Карпуков Л. М, Щекотихін О. В., Воскобойник В.О. Волоконно-оптичні лінії зв'язку: навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2020. 153с. ISBN 978-617-529-290-7.

107. Щекотихін О.В., Дмитренко В.П., Єфименко М.В, Проскурін М.П. Волоконно-оптичні системи передачі інформації (ВОСПІ): навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. Запоріжжя: НУ «Запорізька

політехніка», 2022. 114 с.

108. Fujikura Ltd. Fiber Optic Cables [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.optic-product.fujikura.com/optical-fiber-cables/en/products/outdoor-wtc-144-6912f/> (дата звернення 20 жовтня 2024).

109. OFS. Communication Fiber Optic Cables [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://fiber-optic-catalog.ofsoptics.com/Products/Communications-Fiber-Optic-Cables-3100100138> (дата звернення 20 жовтня 2024).

110. Sumitomo Electric. Optical Cables [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://global-sei.com/fttx/highfibercount/opticalcables/> (дата звернення 20 жовтня 2024).

111. Corning Inc. Fiber Optic Cables [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.corning.com/optical-communications/worldwide/en/home/products/fiber-optic-cables.html> (дата звернення 20 жовтня 2024).

112. Бондаренко О.В., Степанов Д.М., Боярова Г.А. Метод оптимізації багатомодульної конструкції осердя оптичних кабелів. *Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова*. 2013. Вип. № 1. С. 99 – 106.

113. Бондаренко О.В., Степанов Д.М., Ромашенко 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.

114. 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).

115. Бондаренко О.В. Воробієнко П.П., Коляденко В.А., Потапова-Сінько Н.Ю. Методологічні аспекти розрахунку повної собівартості волоконно-оптичного кабелю. *Науково-теоретичний журнал Хмельницького економічного університету «Наука й економіка»*. Хмельницький, 2013. Вип. № 1 (29). С. 164 – 172.

116. 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.

117. 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.

118. 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.

119. Волоконно-оптичний кабель з багатоповивною модульною конструкцією осердя: пат. 85703 Україна, МПК G 02 B 6/44, заявник та патентовласник Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова; заявл. 11.06.2013; опубл. 25.11.2013, Бюл. № 22.

120. 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.

121. Бондаренко О.В. Особливості розрахунку повної собівартості і оптової ціни волоконно-оптичного кабелю в умовах ринкових відносин в економіці країни. Журнал ННПЕ та М ім. Г.Е. Вейнштейна. Одеса: ОНАХТ, 2013. С. 56 – 62.

122. 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.

123. 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>.

124. 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.

125. 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.

126. Бондаренко О.В., Степанов Д.Н., Вербицкий 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.

127. Кифорук С.В. Influence of the ambient temperature on the mechanical tension of the optical cable. *Збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості.* Одеса, 2022, Вип. 2(21). С. 20 – 26. DOI:10.32684/2412-5288-2022-2-21-19-26.

128. Степанов Д.М., Горобець І.А. Порівняльна оцінка механічної міцності склопластикових стержнів силового елементу 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.

129. 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.

130. 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.

131. Будівництво та монтаж волоконно-оптичних систем передачі: підручник / Бондаренко О.В., Воробієнко П.П., Андрєєв В.О., Панюта І.М. Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2014. 192 с.

132. ДСТУ EN IEC 60794-1-401:2022. Волоконно-оптичні кабелі. Частина 1-401. Загальна специфікація. Основні процедури випробування оптичних кабелів. Електричні методи випробування. Випробування на коротке замикання (для OPGW, OPPC і OPAC), метод H1. [Чинний від 31.12.2023 р]. К.: ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості», 2023 (Національний стандарт України).

133. ДСТУ EN 60811-203:2016 Електричні та волоконно-оптичні кабелі. Методи випробування неметалевих матеріалів. Частина 203. Загальні випробування. Вимірювання зовнішніх розмірів (EN 60811-203:2012, IDT). [Чинний від 01.10.2017 р]. К.: ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості», 2017 (Національний стандарт України).

134. ДСТУ EN 60811-501:2018 Електричні та волоконно-оптичні кабелі. Методи випробування неметалевих матеріалів. Частина 501. Механічні випробування. Випробування для визначення механічних властивостей матеріалів ізоляції та оболонки (EN 60811-501:2012, IDT; IEC 60811-501:2012, IDT). [Чинний від 01.10.2019 р]. К.: ДП «Український науково-дослідний і

навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості», 2019 (Національний стандарт України).

135. Бондаренко О.В. Метод определения температурного коэффициента линейного расширения и модуля Юнга диэлектрического оптического кабеля. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Електротехніка і енергетика»*. 2009. Вип. № 9 (158). С. 25 – 29.

136. 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.

137. 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.

138. Бондаренко О.В., Степанов Д.М., Чербаджі А.В. Визначення довжини оптичного волокна в трубі 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.

139. 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. Лондон, 2020. С. 806 – 810.

140. Бондаренко О. В. Методи прискореної оцінки технічного стану оптичних кабелів. 64-тя наук.-тех. конф. проф.-викл. складу, наук., мол. вчених, асп. та студ., 1 – 4 груд, 2009 р.: тези доп. Одеса, 2009. С. 17 – 19.

141. НДР 0105, И007415. Методика розрахунку показників надійності проєктованих волоконно-оптичних ліній зв'язку: звіт про НДР-300 / кер. Бондаренко О.В. Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2007. 37 с.

142. Визначення показників надійності проєктованих волоконно-оптичних ліній зв'язку: метод. вказівки. РД 0.10XXX – 2007. К.: Мінтранспорту та зв'язку

України, Департамент з питань зв'язку та інформатизації України, 2007. 62 с.

143. Recommendation ITU G.650.1. Definitions and test methods for linear, deterministic attributes of single-mode fibre and cable (Визначення та методи випробувань лінійних, детермінованих атрибутів одномодового волокна та кабелю).

144. Recommendation ITU G.650.2. Definitions and test methods for statistical and non-linear, deterministic attributes of single-mode fibre and cable (Визначення та методи випробувань статистичних та нелінійних, детермінованих атрибутів одномодового волокна та кабелю).

145. Recommendation ITU G.652. Characteristics of a single-mode optical fibre and cables (Характеристики кабелю з одномодовими оптичними волокнами).

146. Recommendation ITU G.653. Characteristics of a dispersion-shifted single-mode optical fibre cable (Характеристики кабелю з одномодовими оптичними волокнами зі зміщеною дисперсією).

147. Recommendation ITU G.654. Characteristics of a cut-off shifted single-mode optical fibre and cable (Характеристики одномодових оптичних волокон і кабелів зі зміщеною довжиною хвилі відсікання).

148. Recommendation ITU G.655. Characteristics of a nonzero dispersion shifted single-mode optical fibre cable (Характеристики кабелю з одномодовими оптичними волокнами зі зміщеною ненульовою дисперсією).

149. Recommendation ITU G.656. Characteristics of a fibre and cable with non-zero dispersion for wideband optical transport (Характеристики волокна та кабелю з ненульовою дисперсією для широкосмугового оптичного транспорту).

150. Recommendation ITU G.657. Characteristics of a Bending Loss Insensitive Single Mode Optical Fibre and Cable for the Access Network (Характеристики втрат нечутливого до вигинів одномодового волоконно-оптичного кабелю і кабелю для мереж доступу).

151. Питання прийняття в експлуатацію закінчених будівництвом об'єктів: Постанова КМУ від 13 квітня 2011 р. № 461. Дата оновлення: 26.04.2024 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/461-2011-%D0%BF#n15> (дата звернення:

15.12.2024).

152. КНД 45-113-98. Загасання в одномодовій волоконно-оптичній елементарній кабельній секції. К.: Держкомзв'язку та інформатизації України. 1998. 22 с. (Керівний нормативний документ).

153. КНД 45-117-98. Інструкція щодо аварійно-відновлювальних робіт на волоконно-оптичних лініях зв'язку. К.: Державний комітет зв'язку та інформатизації України. 1999. 110 с. (Керівний нормативний документ).

154. Бондаренко О.В. Статистичні дані для розрахунку показників надійності підземних волоконно-оптичних ліній зв'язку. *Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова*. 2009. № 1. С. 64 – 69.

155. Бондаренко О.В. Статистичні характеристики пошкоджень волоконно-оптичних ліній зв'язку. 63-я наук.-тех. конф. проф.-вик. складу, науковців, асп. та студ.: тези доп., м. Одеса, 26.11-2.12 2008 р. Одеса, 2008. С. 51 – 54.

156. Сакович Л.М., Криховецький Г.Я., Курята Я.Е. Оцінка структурної надійності систем зв'язку. *Науковий журнал «Control, Navigation and Communication Systems»*. 2023. №2. С. 210 – 215. DOI: 10.26906/SUNZ.2020/2/210.

157. Bahachuk D., Hadzyiev M., Nazarenko A., Odegov N., Stepanov D. Multiplex technique of data transmission in residual class systems / Bahachuk D., Hadzyiev M., Nazarenko A., Odegov N., Stepanov D. // *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).

158. 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.

159. Kiforuk S.V. Devising a method to control the operational quality and reliability of fiber-optical communication lines. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Харків, 2021. 5/3(113). С. 92 – 100. ISSN 1729-3774.

160. 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.

161. Бондаренко О.В., Костік Б.Я., Кіфорук 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.

162. Теорія ймовірностей. [Електронний ресурс]: навч. посіб. / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: О.В. Барабаш, А.П. Мусієнко, О.В. Свинчук. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 193 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/d605e9e7-d1dc4ee1-88ad-32a08fc6d570/content> (дата звернення 23.03.2025 р.).

163. 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.

164. 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.

165. 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.

166. 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.

167. Бондаренко О.В., Григорович В.О., Левенберг Є.В. Методика розрахунку показників надійності проєктованих ВОЛП. *Сенсорна електротехніка «Сенсор-2008»*, 3-6 чер. 2008 р.: тези доп. Одеса, 2008. С. 45 – 46.

168. Бондаренко О.В., Одинцов Н.Н., Григорович В.А. Задачи обеспечения эксплуатационной надежности волоконно-оптических линий передачи. *Сенсорна електротехніка і мікросистемні технології*: наук. техн. конф., 2005 р. : тези допов. Одеса, 2005. С. 60 – 61.

169. Гнатюк С. Є. Аналіз показників надійності систем спеціального зв'язку *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, 2013. № 6(12). С. 45 – 50.

170. Гнатюк С.Є., Сакович Л.М. Кількісне оцінювання значень показників надійності систем зв'язку. *Зв'язок*. 2013. № 6. С. 10-15.

171. Гнатюк С.Є., Сакович Л.М. Методика оцінки показників надійності систем спеціального зв'язку. *Озброєння та військова техніка*. №1 (5). 2015, С. 26 – 28.

172. Барковський В.В., Барковська Н.В., Лопатін О.К. Теорія ймовірностей та математична статистика. 5-те видання. К.: Центр учбової літ., 2010. 424 с.

173. Бобик О.І., Берегова Г.І., Копитко Б.І. Теорія ймовірностей і математична статистика: навч. підручник. Київ, 2006. 440 с.

174. Турчин В.М. Теорія ймовірностей і математична статистика. Основні поняття, приклади, задачі: Підручник для студентів вищих навчальних закладів. Дніпро: ІМА-прес, 2014. 556 с.

175. Чорней Р.К. Практикум з теорії ймовірностей та математичної статистики: навч. посіб для студ. вищ. закл. / Р.К. Чорней, О.Ю. Дюженкова, О.Б.

Жильцов та ін.; за ред. Р.К. Чорнея. К.: МАУП, 2003. 328 с.

176. Медведєв М.Г., Пащенко І.О. Теорія ймовірностей та математична статистика. Підручник. К.: Вид-во «Ліра-К», 2008. 536 с.

177. Статистичний аналіз даних вимірювань: навч. посіб. / Єременко В.С., Куц Ю.В., Мокійчук В.М., Самойліченко О.В. К.: НАУ, 2013. 320 с.

178. Навчальний посібник щодо вивчення дисципліни "Методи прикладного статистичного аналізу" / Укл.: Г.Г. Швачич, В.С. Коноваленков, О.В. Соболенко, Т.М. Заборова, В.І. Христян, Є.Є. Єгорцева – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2017. 178 с.

179. Бахрушин В.Є. Методи аналізу даних : навчальний посібник для студентів. Запоріжжя : КПУ, 2011. 268 с.

180. 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.

181. 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.

182. 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.

183. 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.

184. 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.

185. 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.

186. 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.

187. 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. №3. P. 6 – 16. DOI: (Індексується в наукометричній базі Web of Science).

188. 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.

189. Бондаренко О.В. Методика розрахунку модульної конструкції оптичного кабелю по розтягуючому зусиллю. *Моделирование и информационные технологии*: сб. науч. тр. Института проблем моделирования в энергетике им.

Г.Е. Пухова НАН Украины, 2009. Вып. 54. С. 31 – 34.

190. ДСТУ EN 50174-3:2022 Інформаційні технології. Монтаж кабелів. Частина 3. Планування та практика монтажу поза будівлями (EN 50174-3:2013, IDT). [Чинний від 31.12.2023 р]. К.: ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості», 2023 (Державний Стандарт України).

191. ДСТУ EN 50174-2:2019 Інформаційні технології. Кабельні установки. Частина 2. Планування та практика встановлення в будівлях (EN 50174-2:2018, IDT). [Чинний від 01.08.2019 р]. К.: ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості», 2019 (Державний Стандарт України).

192. ГКД 34.48.151-2003. Проектування, будівництво та експлуатація волоконно-оптичних ліній зв'язку по повітряних лініях електропередавання. [Чинний. від 13.06.2003 р.]. К.: Міністерство палива та енергетики України. 2003. 99 с.

193. СОУ НЕК 33.180.1-27:2023. Волоконно-оптичні лінії зв'язку по повітряних лініях електропередавання. Проектування та будівництво. [Чинний. від 04.01.2023 р.]. К.: Приватне акціонерне товариство «Національна енергетична компанія «Укренерго»». 2023. 52 с. (стандарт підприємства).

194. "IEEE Standard for Testing and Performance for All-Dielectric Self-Supporting (ADSS) Fiber Optic Cable for Use on Electric Utility Power Lines," in IEEE Std 1222 – 2019 (Revision of IEEE Std 1222-2011), vol., no., pp.1-51, 31 March 2020, DOI: 10.1109/IEEESTD.2020.9052820.

195. Ніколов К.О. Рефлектометричні методи оцінки стану оптичних волокон на мережах зв'язку. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. Київ, 2015. Вип. № 1. С. 83 – 88.

196. Контроль стану оптичної лінії із застосуванням технології FDR / О. Є. Землянський, К. Л. Горященко, В. С. Коваль, А. В. Клепіковський // Вісник ХНУ. Технічні науки. 2017. № 3. С. 121 – 125.

197. Paschotta R. Field Guide to Optical Fiber Technology. Washington: SPIE,

2010. 128 с.

198. Бондаренко О.В., Иоргачев Д.В., Мурадян Л.П. Выбор конструкции самонесущего оптического кабеля по растягивающим нагрузкам. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. Одеса, 2001. Вып. № 1. С. 18 – 21.

199. Tingting Zhan. Optimization of the optical fiber with triple sector stress elements / Tingting Zhan, Minning Ji // *Optical Fiber Technology*. – 2020. – Vol. 57. DOI: 10.1016/j.yofte.2020.102212.

200. Правила улаштування електроустановок. – Видання офіційне, Міненерговугілля України. Х.: Видавництво «Форт», 2017. 760 с.

201. Canudo J., Sevillano P., Iranzo A., Kwik S., Preciado-Garbayo J. and J. Subías, "Overhead Transmission Line Sag Monitoring Using a Chirped-Pulse Phase-Sensitive OTDR," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 24, no. 2, pp. 1988-1995, 15 Jan.15, 2024, DOI: 10.1109/JSEN.2023.3340296.

202. M.C. van der Heijden, E.M. Alvarez, J.M.J. Schutten. Inventory reduction in spare part networks by selective throughput time reduction. *International Journal of Production Economics*. Volume 143, Issue 2, June 2013, Pages 509-517. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.03.020>.

203. Daijiro Mizutani, Shunichi Fukuyama, Koki Satsukawa. Optimal road facility spare parts location with continuum approximation. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. Volume 174, May 2025, 105109. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2025.105109>.

204. НДР 1275. Дослідження і розробка методів і пристроїв підвищення ефективності волоконно-оптичних систем передачі: звіт про НДР / кер. Макаров Т.В. Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2007. 111 с.

205. Заборська Н. К., Жуковська Л. Е. Основи логістики: навчальний посібник. Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2011. 86 с.

206. Гостев В.І., Кунах Н.І., Ткаленко О.М., Невдачина О.В. Мережні технології. Навч. посібник підготовлено для студентів вищих навчальних закладів. Київ: ДУІКТ, 2012. 101 с.

207. Ahmed, W., Hasan, O., Pervez, U., Qadir, J. Reliability Modeling and

Analysis of Communication Networks. arXiv preprint. 2016. arXiv:1612.08910. DOI: 10.48550/arXiv.1612.08910.

208. Paredes, R., Duenas-Osorio, L., Meel, K. S., Vardi, M. Y. Principled Network Reliability Approximation: A Counting-Based Approach. arXiv preprint. 2018. arXiv:1806.00917. DOI: 10.48550/arXiv.1806.00917.

209. Basaran, S. T., Kurt, G. K., Kschischang, F. R. Wireless Network Reliability Analysis for Arbitrary Network Topologies. arXiv preprint. 2019. arXiv:1904.12736. DOI: 10.48550/arXiv.1904.12736.

210. Vass, B. Regional Failure Events in Communication Networks: Models, Algorithms and Applications. Springer Theses. 2022. 119 p. DOI: 10.1007/978-3-031-14256-7.

211. Chaaben Kouki, Lama Moussawi-Haidar, Mohamad Y. Jaber. A divergent two-echelon spare part inventory system with lost sales and compound Poisson demand. *International Journal of Production Economics*. Volume 285, July 2025, 109625. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2025.109625>.

212. Zarghami, S.A., Gunawan, I., Schultmann, F. Exact Reliability Evaluation of Infrastructure Networks Using Graph Theory. *Qual. Reliab. Eng. Int.* 2020, 36, pp. 498 – 510.

213. Dagar, M., Mahajan, S. Optical Fiber Communication System for Increased Reliability. *Journal of Engineering and Technology Systems Engineering*. 2018. Vol. 5, No. 2. P. 45–50. DOI: 10.1109/MCOM.2018.1800036.

Додаток А

Акти впровадження результатів дисертаційної роботи

Затверджую
Голова комісії з реорганізації
«ОНДІЗ»
Юрій МАНІРНИК
« 5 » *серпня* 2023 р.

АКТ

з впровадження результатів дисертаційної роботи Степанова Дмитра
Миколайовича на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук на тему
«Методи забезпечення надійності волоконно-оптичних ліній зв'язку на етапах
проектування та експлуатації»

Комісія в складі:

- голова – голова НТР ДП «ОНДІЗ», керівник групи випробувань ЕМС випробувального центру, к.т.н., доц. Орешков В.І.;
- секретар НТР ДП «ОНДІЗ», керівник групи випробувань радіообладнання випробувального центру, к.т.н., Яневич О.К.;
- начальник лабораторії мереж електрозв'язку та систем комутації ДП «ОНДІЗ» Матковський О.П.

склала цей акт про те, що результати дисертаційної роботи Степанова Д.М. на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук на тему «Методи забезпечення надійності волоконно-оптичних ліній зв'язку на етапах проектування та експлуатації» використовуються в робочому процесі ДП «ОНДІЗ».

Надійність і якість роботи волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ) під час експлуатації забезпечується, в першу чергу, постійним моніторингом її стану, виявленням можливих дефектів та своєчасним їх усуненням. Зважаючи на те, очевидна необхідність в розробці та удосконаленні існуючих методів контролю та прогнозування технічного стану лінії.

Ряд результатів досліджень і розробок Д.М. Степанова, представлених в дисертації, використані в роботі випробувального центру ДП «ОНДІЗ» в галузі кабельних ліній та волоконної оптики. До таких результатів відносяться:

1. Метод контролю ймовірнісних показників надійності лінійних споруд ВОЛЗ при початковому терміні експлуатації.
2. Спосіб визначення параметрів оцінки технічного стану елементів ВОЛЗ ділянки регенерації ВОСП за загасанням сигналу.
3. Запроектована та реалізована ДП «ОНДІЗ» волоконно-оптична лінія зв'язку «Білгород-Дністровський – Шабо» Одеської області на базі кабелів ОКСП-02-50-1,0/1,3-4 та ОКСП-01-50-1,0/1,3-4 та апаратури ВОСП, що передана в експлуатацію Одеському ОВТУЗ АТ «Укртелеком».

Приведені результати досліджень з контролю технічного стану лінійних споруд ВОЛЗ різних кліматичних районів за якістю та безвідмовністю роботи і за визначеними рівнями параметра-критерію відмови елементів лінії ділянки

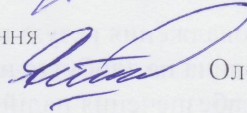
регенерації ВОСП за загасанням сигналу дозволили покращити її технічне обслуговування та забезпечення терміну експлуатації.

Керівник групи випробувань ЕМС
випробувального центру, к.т.н., доц.



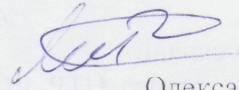
Василь ОРЕШКОВ

Керівник групи випробувань радіообладнання
випробувального центру, к.т.н.



Олександр ЯНЕВИЧ

Начальник лабораторії мереж
електрозв'язку та систем комутації
ДП «ОНДІЗ»



Олександр МАТКОВСЬКИЙ

Затверджую

Директор

технічного департаменту

Львівської філії АТ «УКРТЕЛЕКОМ»

Стус Павло Олександрович

« 15 »  2025 р.



Акт

впровадження результатів дисертаційної роботи Степанова Дмитра Миколайовича на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук на тему «Методи забезпечення надійності волоконно-оптичних ліній зв'язку на етапах проектування та експлуатації»

Ми, що нижче підписалися,

– Мачинський Роман Володимирович – начальник регіонального центру ядра мережі Львівської філії АТ «УКРТЕЛЕКОМ»;

– Гішак Олег Іванович – начальник центру ядра мережі Львівської філії АТ «УКРТЕЛЕКОМ»;

– Філярівська Наталія Петрівна – начальник відділу правового забезпечення Львівської філії АТ «УКРТЕЛЕКОМ».

склали дійсний акт у тому, що в Західному макрорегіоні АТ «УКРТЕЛЕКОМ» впроваджені результати дисертаційної роботи Д.М. Степанова, а саме:

1. В дисертаційній роботі Степанова Д.М. отримано низку конкретних науково-технічних рішень, до яких відносяться: методи вибору оптимальної конструкції оптичного кабелю за масо-габаритними та економічними показниками при проектуванні волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ), що було взято за основу при забезпеченні одночасно технічної та економічної ефективності лінії, особливо, в умовах браку місця в міській кабельній каналізації.

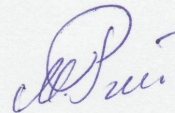
2. Отримані теоретичні розробки та практичні рекомендації були використані для прискореного вибору марки оптичного кабелю оптимальної та економічно ефективної конструкції при замовленні на виготовлення в різних

заводах-виробниках для проектування ВОЛЗ Західного макрорегіону АТ «УКРТЕЛЕКОМ».

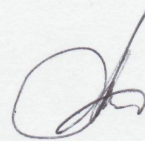
Планується використати матеріали дисертації з контролю технічного стану лінійних споруд ВОЛЗ при експлуатації в кліматичних умовах району гірських Карпат за якістю та безвідмовністю роботи з метою удосконалення моніторингу їх роботи за рахунок запропонованих метода та способу контролю.

Використання матеріалів роботи Д.М. Степанова в Західному макрорегіоні АТ «УКРТЕЛЕКОМ» дозволяє підвищити ефективність проектування та експлуатації волоконно-оптичних ліній зв'язку транспортної електронної комунікаційної мережі.

Начальник регіонального центру
ядра мережі ЛФ АТ «УКРТЕЛЕКОМ»
Мачинський Роман Володимирович



Начальник центру ядра мережі
ЛФ АТ «УКРТЕЛЕКОМ»
Гіщак Олег Іванович



Начальник відділу правового забезпечення
ЛФ АТ «УКРТЕЛЕКОМ»
Філярівська Наталія Петрівна



Затверджую

В.о. начальника служби
сигналізації та зв'язку регіональної
філії «Одеська залізниця»

Андрій ВІКРЕСТ

« 01 » 05 2025 р.

Акт

впровадження результатів дисертаційної роботи Степанова Дмитра
Миколайовича на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук на
тему «Методи забезпечення надійності волоконно-оптичних ліній зв'язку на
етапах проектування та експлуатації»

Ми, що нижче підписалися,

- Кошовий Р.Л., заступник начальника служби сигналізації та зв'язку;
- Батир Д.О., начальник відділу зв'язку, радіо та пристроїв
автоматичного виявлення перегріву букс

склали дійсний акт у тому, що в службі сигналізації та зв'язку
регіональної філії «Одеська залізниця» можуть бути впроваджені результати
дисертаційної роботи Д.М. Степанова, а саме:

1. Представлений в дисертаційній роботі розроблений метод оцінки
температурного впливу умов експлуатації волоконно-оптичних ліній зв'язку
(ВОЛЗ) на геометричні розміри і параметри конструкції оптичних кабелів
(ОК) врахований при виборі марки та оцінці механічних характеристик ОК
на етапі проектування лінії.

2. Отримані теоретичні розробки та практичні рекомендації можуть
бути використані для експлуатації підвісної лінії зв'язку на опорах
контактної мережі транспортної залізниці між станціями Одеса-Головна та
Пересип з використанням оптичного кабелю марки ОКЛ-3-Д2А14, що
експлуатується при різних температурах причорноморської кліматичної зони.

Планується використати матеріали дисертації для визначення ступеня
дії фізико-кліматичних впливів на існуючі ВОЛЗ, особливо підвішені на
опорах електрифікованих мереж залізничного транспорту міжміського

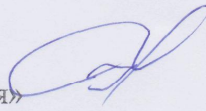
сполучення з метою удосконалення моніторингу їх роботи за рахунок запропонованих метода та способу контролю технічного стану лінії.

Використання матеріалів роботи Д.М. Степанова в службі сигналізації та зв'язку регіональної філії «Одеська залізниця» дозволяє підвищити ефективність проектування та експлуатації волоконно-оптичних ліній зв'язку відомчої мережі за рахунок оцінки та аналізу впливу умов експлуатації на технічний стан лінії.

Заступник начальника

Служби сигналізації та зв'язку

регіональної філії «Одеська залізниця»



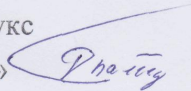
Роман КОШОВИЙ

Начальник відділу зв'язку,

радіо та пристроїв

автоматичного виявлення перегріву букс

регіональної філії «Одеська залізниця»



Дмитро БАТИР

Затверджую
 Начальник ЦТОЕ №5
 ТОВ «АТРАКОМ»
 Анатолій ТЕРНАВСЬКИЙ

«28» серпня 2025 р.



Акт

впровадження результатів дисертаційної роботи Степанова Дмитра Миколайовича на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук на тему «Методи забезпечення надійності волоконно-оптичних ліній зв'язку на етапах проектування та експлуатації»

Ми, що нижче підписалися:

- Дімов Віталій Іванович нач. ВЛ №51 ТОВ «Атраком»
- Веселов Павло Геннадійович інж. ВЛ №51 ТОВ «Атраком»

склали дійсний акт у тому, що в ТОВ «Атраком» впроваджені результати дисертаційної роботи Д.М. Степанова, а саме:

1. В дисертаційній роботі Степанова Д.М. отримано низку конкретних науково-технічних рішень, до яких відносяться: метод контролю технічного стану лінійних споруд волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ) за якістю та безвідмовністю їх роботи, метод оцінки ймовірнісних показників надійності лінійних споруд ВОЛЗ.

2. Отримані теоретичні розробки та практичні рекомендації з оцінки ймовірнісних показників надійності лінійних споруд ВОЛЗ ТОВ «Атраком» були використані для аналізу чинників, які зменшують надійність ліній, виявлення недоліків в їх обслуговуванні та підвищення якості та оптимізації технічної експлуатації фрагментів мережі зв'язку.

3. Планується в подальшому використовувати результати обробки реальних експлуатаційних статистичних даних розподілу пошкоджень та часу напрацювання на відмову лінійних споруд ВОЛЗ електронної комунікаційної мережі зв'язку для контролю показників надійності та удосконалення технічного обслуговування лінійних споруд ВОЛЗ.

Використання матеріалів дисертаційної роботи Д.М. Степанова в ТОВ «Атраком» дозволяє покращити якість та надійність роботи ВОЛЗ при експлуатації та організацію роботи її лінійних підрозділів.

Нач. ВЛ №51 ТОВ «Атраком»

Віталій ДІМОВ

Інж. ВЛ №51 ТОВ «Атраком»

Павло ВЕСЕЛОВ



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

вул. Кузнечна, 1, м.Одеса, 65023, тел.(048) 705-03-33, факс (048) 705-04-31
e-mail: suitt@suitt.edu.ua, код ЄДРПОУ 43997335



ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з навчальної роботи ДУІТЗ
проф. Світлана ХАДЖИРАДЄВА
«15» ~~серпня~~ 2025 р.

Акт

впровадження результатів дисертаційної роботи Степанова Дмитра
Миколайовича на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук на
тему «Методи забезпечення надійності волоконно-оптичних ліній зв'язку на
етапах проектування та експлуатації»
в навчальний процес кафедри Комутаційних систем електронних комунікацій
Державного університету інтелектуальних технологій і зв'язку

Ми, що нижче підписалися,

- декан факультету «Телекомунікацій та радіотехніки», к.т.н.
Русаловський В.Б.,
- декан факультету «Інформаційних технологій та кібербезпеки», д.т.н.,
проф. Васіліу Є.В.,
- гарант освітньої програми «Телекомунікації та радіотехніка» першого
(бакалаврського) рівня освіти за спеціальністю 172 Електронні комунікації та
радіотехніка, к.т.н., доц. Сідень С.В.

склали дійсний акт в тому, що в навчальному процесі кафедри
«Комутаційних систем електронних комунікацій» впроваджені такі
результати дисертаційної роботи Д.М. Степанова:

1. Теоретичні та експериментальні положення роботи Д.М. Степанова
використовуються в лекційних, практичних та лабораторних заняттях
навчальних дисциплін:

- «Лінійно-кабельні споруди електронних комунікацій»;
- «Проектування, будівництво та монтаж ВОЛЗ»;
- «Напрямні системи оптичного зв'язку, формування каналів витоку
інформації із ВОЛЗ»;

2. В рамках цих дисциплін вивчаються:

- обґрунтований вибір доцільних конструкцій кабелів при проектуванні
ВОЛЗ для заданих умов експлуатації;

– методи контролю та оцінки технічного стану конструкцій оптичних кабелів;

– визначення показників надійності проєктованої волоконно-оптичної лінії зв'язку;

– методики розрахунку і проєктування показників надійності волоконно-оптичних ліній зв'язку.

3. Вищенаведені матеріали дисертаційної роботи Д.М. Степанова:

– були використані для оновлення змісту обов'язкової освітньої компоненти «Лінійно-кабельні споруди електронних комунікацій» за пропозицією стейкхолдера – ЦТОЕ №5 ТОВ «Атраком» – до освітньої програми «Телекомунікації та радіотехніка» першого (бакалаврського) рівня освіти за спеціальністю 172 «Електронні комунікації та радіотехніка» відповідно до витягу з протоколу розширеного засідання кафедри РЕСТ від 24.05.2024 р.;

– увійшли до складу 3-х методичних посібників, виданих англійською мовою, та 1 колективної монографії:

1) Lecture notes of the course “Directional electric and optic communication systems” part 1 / Bondarenko O.V., Stepanov D.M., Bahachuk D.G. eds, Odesa: ONAT, 2015. 47 p.

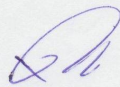
2) Methodical instruction of course project on the topic «Project of one-wave fiber-optic communication line» / Bondarenko O.V., Stepanov D.M., Bahachuk D.G. eds, Odesa: ONAT, 2018. 93 p.

3) Lecture notes of the course “Directional electric and optic communication systems” part 1/ Bondarenko O.V., Stepanov D.M., Bahachuk D.G. eds, Odesa: ONAT, 2018. 136 p.

4) Сталій розвиток і цифрові інновації : 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. 543 с. ISBN 978-617-14-0253-9. DOI <https://doi.org/10.31520/978-617-14-0253-9>.

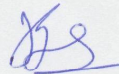
4. Матеріали методичних посібників та монографії призначені для фахівців у галузі кабельної техніки та зв'язку, конструкторів, інженерів, аспірантів, магістрів і здобувачів освіти. Вони використовуються при курсовому проєктуванні, написанні бакалаврських, магістерських робіт та кандидатських дисертацій.

Декан ф-ту ТР,
к.т.н.



Віктор РУСАЛОВСЬКИЙ

Декан ф-ту ІТК,
д.т.н., проф.



Євген ВАСІЛІУ

Гарант ОП «Телекомунікації
та радіотехніка» за
спеціальністю 172 Електронні
комунікації та радіотехніка,
к.т.н., доц.



Сергій СІДЕНЬ

Додаток Б

**Довідникові дані до проєктування та оптимізації модульних конструкцій
оптичних кабелів**

Таблиця Б.1 – Типи ОК по категоріям стійкості до ударів блискавки

Типи ОК, на які струм блискавки не впливає	Категорія стійкості до ударів блискавки			
	I	II	III	IV
	більше 105 кА	від 80 кА до 105 кА	від 55 кА до 80 кА	менше 55 кА
ОКд: ОКЛ-3-Д1 ОКЛ-3-ДА1 ОКЛ-3-Д2А1 ОКЛ-3-Д3А1	Діелектричний ЦСЕ			Металевий ЦСЕ
	Без дротів ДЖ: ОКЛБ-3-Д4 ОКЛБ-3-ДА4 ОКЛБГ-3-Д7 ОКЛБГ-3-ДА7 ОКЛК-3-Д6 ОКЛК-3-ДА6		З дротами ДЖ: ОКЛБ-3-Д9 ОКЛБ-3-ДА9 ОКЛБГ-3-Д9 ОКЛБГ-3-ДА9 ОКЛК-3-Д9 ОКЛК-3-ДА9	З дротами ДЖ: ОКЛ-3-М1 ОКЛ-3-М3 ОКЛБ-3-М4 ОКЛБ-3-М6 ОКЛБ-3-М9 ОКЛБГ-3-М7 ОКЛБГ-3-М9
	Захисні покриття ОК			
	ПЕ оболонка, сталева броня, ПЕ шланг	АПЕ оболонка, сталева броня, ПЕ шланг	ПЕ або АПЕ оболонка, сталева броня, ПЕ шланг	

Таблиця Б.2 – Щільності матеріалів та напівфабрикатів конструктивних елементів ОК

№ з/п	Назва елементу ОК	Матеріал елементу	Щільність матеріалу елемента $\gamma \cdot 10^{-6}$, г/см ³
1	Оптичне волокно	кварц	2,20
2	Центральний силовий елемент	склопластик	2,00
3	Трубка оптичного модулю	полібутилентерефталат	1,38
4	Гідрофобний заповнювач	тиксотропний гель	0,83
5	Водоблокуюча стрічка	поліетилентерефталат	1,39
6	Периферійний силовий елемент	арамідні нитки	1,45
7	Захисний шланг	поліетилен	0,94

Таблиця Б.3 – Дані конструктивних параметрів елементів трьох моделей ОК на 144 ОВ

Значення параметру елементів осердя ОК		№ моделі кабелю		
		I	II	III
Кількість ОВ в ОК, шт		144	144	144
Діаметр ЦСЕ, $d_{\text{ЦСЕ}}$, мм		2,70	2,70	2,70
Діаметр ОМ, за повивами, $d_{\text{ОМi}}$, мм	в I повиві	2,50	2,50	2,50
	в II повиві	2,50	2,50	1,85
Кількість ОВ в ОМ за повивами, $n_{\text{ОВ}}$, шт	в I повиві	8	8	8
	в II повиві	8	8	6
Кількість елементів кабелю за повивами, шт	в I повиві	6 ОМ	6 ОМ	6 ОМ
	в II повиві	12 ОМ	12 ОМ	16 ОМ

Закінчення табл. Б.3

Загальна кількість ОВ за повивами, шт	в I повиві	$6 \times 8 = 48$	$6 \times 8 = 48$	$6 \times 8 = 48$
	в II повиві	$12 \times 8 = 96$	$12 \times 8 = 96$	$16 \times 6 = 96$
Відносне видовження кабелю за повивами, ε_{ki} , %	I повивом	0,52	0,52	0,52
	II повивом	0,82	0,53	0,60
Крок спірального укладання елементів за повивами, $h_{\text{пов}}$, мм	в I повиві	90	90	90
	в II повиві	90	131	90
Діаметр конструкції моделі ОК, мм		16,6	16,4	15,1
Максимально допустиме розтягувальне навантаження кабелю, F_d , Н		5 469		

Додаток В

Довідникові дані до забезпечення надійності ВОЛЗ на етапах виробництва ОК та її будівництва

Таблиця В.1 – Характеристики матеріалів для виготовлення оптичного волокна та трубки оптичного модуля

Елемент ОК	Матеріал	Модуль Юнга, Н/мм ²	Щільність, г/см ³	Температурний коефіцієнт лінійного розширення, К ⁻¹	Температура плавлення, °С / К
Оптичне волокно	кварцове скло	72500	2,20	$5,5 \cdot 10^{-7}$	–
Трубка оптичного модуля	полібутилен-терефталат	1600	1,31	$1,5 \cdot 10^{-4}$	> 250 / 523
	поліамід	1700	1,06	$7,8 \cdot 10^{-5}$	> 220 / 493
	полікарбонат	2300	1,20	$6,5 \cdot 10^{-5}$	> 280 / 553

Таблиця В.2 – Матеріали та параметри елементів обраної конструкції ОК

№ з/п	Елементи конструкції кабелю	Матеріали та параметри елементу ОК
1	2	3
1	Центральний силовий елемент: – діаметр $d_{\text{ЦСЕ}}$, мм; – $\alpha_{\text{ЦСЕ}}$, К ⁻¹ ; – модуль Юнга, Н/мм ² .	склопластикові стержні 2,3 $6,6 \cdot 10^{-6}$ 50000
2	Трубка оптичного модуля: – діаметр $d_{\text{ОМ}}$, мм;	полібутилентерефталат 2,3

Закінчення табл. В.2

1	2	3
	– кількість ОМ, шт. – $\alpha_{\text{ТОМ}}$, K^{-1} ; – модуль Юнга, $\text{H}/\text{мм}^2$.	6 $1,5 \cdot 10^{-4}$ 1600
3	Периферійний силовий елемент: – лінійна щільність LD , дтекс; – $\alpha_{\text{ПСЕ}}$, K^{-1} ; – кількість в повиві, шт.; – модуль Юнга, $\text{H}/\text{мм}^2$.	арамідні нитки 8750 $-3 \cdot 10^{-6}$ 12 104000
4	Захисний шланг: – радіальна товщина, мм; – $\alpha_{\text{ЗШ}}$, K^{-1} ; – модуль Юнга, $\text{H}/\text{мм}^2$.	поліетилен 1,6 $3,2 \cdot 10^{-4}$ 621

Таблиця В.3 – Мінімально допустимі відстані, м, від траси ВОЛЗ до інших споруд

Споруди	Мінімальна відстань, м		Номер помітки
	у горизон- тальній площині	у вертикальній площині (при перетині)	
1	2	3	4
Мости магістральних автомобільних доріг та залізниць: – через внутрішні водні шляхи, судноплавні ріки, канали і водоймища – сплавні ріки – несудноплавні і несплавні ріки	1000 300 від 50 до 100		

Продовження табл. В.3

1	2	3	4
Мости автомобільних доріг та залізниць обласні і місцевого значення: – через судноплавні ріки і канали; – інші ріки	200 від 50 до 100		
Залізничі і автомобільні дороги	5 (від краю основи насипу)	1 (нижче полотна автошляху або основи рейки) і 0,8 (нижче дна кювету)	2
Кабельна каналізація (від трубопроводу і колодязя)	0,25	0,1	1
Міська каналізація	0,5	0,25/0,015	
Нафтопроводи і трубопроводи на позаміській трасі	10,0	0,5/0,15	
Газопроводи: – з тиском від 5 кПа до 1,2 МПа – високого тиску до 5,5 МПа	1,0 10,0	0,5/0,15 0,5/0,15	
Водопроводи розподільчої мережі діаметром: – до 300 мм – понад 300 мм	0,5 1,0	0,25/0,15 0,25/0,15	
Тепломережа	1,0	–	
Колектори загальні для підземних мереж	0,5	–	
Будинки в містах і селищах міського типу (від червоної лінії), не менше	0,6	–	

Продовження табл. В.3

1	2	3	4
Будинки в містах і селищах міського типу (від червоної лінії), не менше	0,6	—	
Бордюрні камені вулиці	1,5	—	
Стіни чи опори тунелів і шляхопроводів (на рівні чи нижче від основи)	0,5	—	
Основа насипу чи зовнішня брівка каналу	1,0	—	
Зрошувальні канали (від брівки каналу)	1,5	—	
Стовбур дерева в місті	1,5	—	
Кабелі силові напругою до 220 кВ	0,6	0,5	3; 4
Опори (підземна частина) високовольтних ліній (ВЛ) змінного струму напругою 750 кВ чи найближчі електроди їх заземлення при питомому опорі землі, ρ , Ом·м:			
— до 100	15,0	—	5
— від 101 до 500	25,0	—	5
— від 501 до 1000	40,0	—	5
— понад 1000	50,0	—	5
Опори (підземна частина) ВЛ напругою від 110 до 500 кВ або найближчі електроди їх заземлення при питомому опорі землі, ρ , Ом·м:			
— до 100	15,0	—	6
— від 101 до 500	25,0	—	6
— від 501 до 1000	40,0	—	6
— понад 1000	50,0	—	6
Відстань від найближчого проводу ВЛ змінного струму напругою 750 кВ (його проекція на горизонтальну площину) до підземного кабелю при питомому опорі землі, ρ , Ом·м:			

Продовження табл. В.3

1	2	3	4
– до 500;	30,0	–	
– від 501 до 1000;	40,0	–	
– понад 1000	50,0	–	
Відстань від дротів ВЛ напругою від 400 до 500 кВ до вершини кабельної опори ЛЗ (при перехрещенні)	20,0	–	
Опори ВЛ напругою від 1 до 35 кВ або найближчі електроди їх заземлення при питомому опорі землі, ρ , Ом·м:			
– до 100	0,83		6
– від 101 до 500	10,0	–	6
– від 501 до 1000	11,0	–	6
– понад 1000	0,35	–	6
Заземлювачі дерев'яних опор чи незаземлені залізобетонні опори ВЛ з неізолюваними проводами напругою до 1 кВ при перехрещенні з підземним чи підвісним кабелем ЛЗ:			
– у населеній місцевості	3,0	–	7
– у ненаселеній місцевості	10,0	–	7
Незаземлені дерев'яні опори ВЛ з неізолюваними проводами напругою до 1 кВ при перехрещенні з підземним чи підвісним кабелем ЛЗ:			
– у населеній місцевості;	2,0	–	–
– у ненаселеній місцевості;	5,0	–	–
– в утруднених умовах	1,0	–	8
Відстань від основи кабельної опори ЛЗ до найближчої рейки електрифікованої залізниці (перпендикулярно до полотна залізниці)			

Продовження табл. В.3

1	2	3	4
при куті перехрещення (у плані) підземного кабелю ЛЗ з віссю полотна залізниці:			
-90°	20,0	—	
-85°	30,0	—	
-80°	40,0	—	
-75°	50,0	—	
Опори контактних мереж наземного електротранспорту напругою від 1 до 35 кВ при перетині з підземним кабелем ЛЗ при питомому опорі землі, ρ , Ом·м:			
— до 100	0,83	—	
— від 101 до 500	10,0	—	
— від 501 до 1000	11,0	—	
— понад 1000	0,35	—	
Опори контактних мереж наземного електротранспорту напругою до 1 кВ при перетині з підземним кабелем ЛЗ (при усіх значеннях, ρ , Ом·м):			
— у населеній місцевості	3,0		
— у ненаселеній місцевості	10,0		
Відстань від місця перехрещення підземного кабелю ЛЗ з електрифікованою залізницею до стрілок, хрестовин і місць приєднання кабелів, які відсмоктують	10,0		
Те саме при перехрещенні з трамвайною колією	3,0		

Продовження табл. В.3

1	2	3	4
Вісь ближньої рейки трамвайної колії	2,0		2
Кабелі зв'язку	0,5		
Кабелі мереж проводового мовлення:			
- 1-го класу	1,0	—	
- 2-го класу	0,5	—	
Заземлювачі блискавковідводів ПЛЗ	25,0	—	
Опори, підпори, відтяжки ПЛЗ у місцевості:	1,0	—	
Примітка 1. У чисельнику вказані відстані при прокладанні кабелю безпосередньо у ґрунті, у знаменнику - у трубах, а за відсутності дробу - для обох випадків. Примітка 2. При захисті кабелю в кюветі цеглою, бетонними плитами тощо відстань може бути зменшена до 0,5 м. Примітка 3. При перехрещенні із силовими кабелями напругою до 10 кВ допускається 0,25 м за умови захисту кабелю (прокладання у трубах, установлення негорючих перегородок тощо). Примітка 4. При перехрещенні із силовими кабелями напругою до 35 кВ в утруднених умовах допускається 0,15 м за умови поділу кабелів на всій ділянці перехрещення плюс 1 м в кожний бік плитами чи трубами з бетону або іншого рівномірного матеріалу; при цьому такий кабель має розташовуватися вище від силового кабелю. Примітка 5. При прокладанні кабелю у сталевій трубі чи покритті його швелером на довжині, рівній відстані між крайніми проводами ВЛ плюс 15 м з кожного боку від крайніх проводів, допускається зменшення цих відстаней до 10 м. Примітка 6. При прокладанні кабелю у сталевій трубі чи покритті його швелером на довжині, рівній відстані між крайніми проводами ВЛ плюс 10 м з кожного боку від крайніх проводів, допускається зменшення цих відстаней до 5 м. Примітка 7. Дані відстані можуть бути зменшені відповідно до 2 і 5 м			

Закінчення табл. В.3

при прокладанні кабелю у сталевій трубі чи покритті його швелером або кутовою сталлю на довжині по обидва боки від опори не менш як 3 м у населеній і 9 м - у ненаселеній місцевості.

Примітка 8. При цьому кабель має прокладатися у сталевій трубі чи покриватися швелером або кутовою сталлю по обидва боки від опори на довжині не менш як 3 м.

Примітка 9. ОК прокладаються вище чи нижче від діючих кабелів зв'язку, силових кабелів, газопроводів, нафтопроводів і тепломереж.

Примітка 10. У таблиці наведені відстані для ОК з металевими елементами. Для ОК без металевих елементів відстань між ними та опорами ВЛ, електродами заземлення опор, проводами ВЛ визначається проектом.

Таблиця В.4 – Основні характеристики оптичних муфт

Параметр	Од. вим.	Значення
1	2	3
Робочий діапазон температур: – експлуатація землі, в кабельній каналізації, – експлуатація на відкритому повітрі	°C	-40...+50 -60...+60
Стійкість до циклічної зміни температури	°C	Від нижнього до верхнього значен- ня температури
Стійкість до впливу відносної вологості повітря	%	до 100 (при 25 °C)
Стійкість до статичного гідравлічного тиску муфт, які експлуатуються у ґрунті, в кабельній каналізації, на відкритому повітрі	кПа	30
Стійкість до циклічного вморожування в лід та відтавання муфт, експлуатованих у ґрунті, в кабельній каналізації, на відкритому повітрі	цикли	20

Закінчення табл. В.4

1	2	3
Стійкість до впливу розтягуючого зусилля	Н	450
Стійкість до впливу вібрації	Гц	10...80
Стійкість до роздавлювання	кН	1
Стійкість до впливу удару	Дж	25
Герметичність		Відсутність витікання при тиску газу 75 кПа
Радіус укладання ОВ: – мінімальний; – рекомендований	мм	30 ≥37,5
Поперечний перетин елемента з'єднання металевих елементів ОК (з забезпеченням окремих виводів з муфти від металевих елементів конструкції кожного кабелю)	мм ²	≥2,5
Умови транспортування: – температура – відносна вологість повітря – тиск	°С % кПа	-50...+50 100 (при 25 °С) 12
Умови збереження: – температура – відносна вологість повітря – тиск	°С % кПа	-50...+40 98 (при 25 °С) 60
Термін збереження	Рік	≥ 1
Термін служби	Рік	≥ 25
Нарантійний термін експлуатації	Рік	≥ 2,5
Примітка: 1) Стійкість до дії розтягуючих зусиль, які прикладено до муфт, призначених для монтажу ОК, що використовується для підводної прокладки і ОК, які прокладають в ґрунтах вічної мерзлоти – не менше 80 % від допустимого розтягуючого зусилля самого ОК.		

Додаток Г

Результати розрахунку ймовірнісних характеристик та перевірки відповідності закону розподілу кількості пошкоджень та часу напрацювання на відмову лінійних споруд ВОЛЗ в різних кліматичних районах

Таблиця Г.1 – Результати перевірки відповідності розподілу пошкоджень лінійних споруд ВОЛЗ закону Пуассона за допомогою критерію Пірсона для Закарпатської, Донецької та Одеської областей

Можливі значення кількості пошкод- жень, x_i	Результати розрахунку ймовірності появи кількості пошкоджень та статистики Пірсона для областей:								
	Закарпатської (гірський район)			Донецької (рівнинний район)			Одеської (причорноморський район)		
	Теоре- тична ймовір- ність, p_i	Очіку- вана частість, $n \cdot p_i$	Статистика критерія Пірсона, χ^2	Теоре- тична ймовір- ність, p_i	Очіку- вана частість, $n_i \cdot p_i$	Статистика критерія Пірсона, χ^2	Теоре- тична ймовір- ність, p_i	Очіку- вана частість, $n_i \cdot p_i$	Статистика критерія Пірсона, χ^2
0	0,215	2,80	0,014	0,085	1,11	0,009	0,058	0,752	0,420
1	0,331	4,30	0,393	0,209	2,73	0,622	0,165	2,143	
2	0,254	3,30	0,148	0,259	3,36	0,544	0,235	3,054	0,001
3	0,130	1,69	0,283	0,212	2,76	0,561	0,223	2,901	0,280
4	0,050	0,91	0,010	0,130	2,53	0,053	0,159	2,067	0,013
5	—	—	—	0,064		0,035	0,091	1,178	
6	—	—	—	—	—	—	0,043	0,560	
—	Сума		0,848	Сума		1,824	Сума		0,714

Таблиця Г.2 – Згруповані значення часу напрацювання на відмову лінійних споруд ВОЛЗ ТЕКМ зв'язку в Донецькій області (рівнинний район)

Номер інтер-валу	Інтервал часу напрацювання між відмовами ($x_i \dots x_{i+1}$)	Значення часу напрацювання на відмову, що потрапили в інтервал	Кількість значень часу напрацювання на відмову, що потрапили в інтервал, n_i	Відносна частість відмов, n_i/n
1	0...2235,75	1698,25; 514,5; 1945; 1599,8; 1194; 657,3; 1802,8; 2213,4; 1497,6	9	0,290
2	2235,75...4471,5	2449,7; 3752; 4154,6; 3203; 3548,6; 2893,5; 3924,6	7	0,226
3	4471,5...6707,25	6313,2; 6540,25; 4912,1; 6197,9; 5631,9; 5128,8	6	0,194
4	6707,25...8943,0	7439,5; 7388,7; 8641,5; 7996,2; 8702,7; 7485,2	6	0,194
5	8943,0...11178,75	9397,2; 10114,3	2	0,064
6	11178,75...13414,5	13413,5	1	0,032
—	Всього		31	1,000

Таблиця Г.3 – Згруповані значення часу напрацювання на відмову лінійних споруд ВОЛЗ ТЕКМ зв'язку в Одеській області (причорноморської район)

Номер інтер-валу	Інтервал часу напрацювання між відмовами ($x_i...x_{i+1}$)	Значення часу напрацювання на відмову, що потрапили в інтервал	Кількість значень часу напрацювання на відмову, що потрапили в інтервал, n_i	Відносна частість відмов, n_i/n
1	0...1375,4	1129,4; 909,6; 510,75; 953,5; 350,2; 281,25; 1151; 74,9; 535,4; 1131,1; 881; 182,2; 44,8; 293,4; 745,7	15	0,417
2	1375,4...2750,8	2615; 1662,5; 2306,6; 2546,2; 1731,8; 1773,8; 1867,4; 1559,3; 2155,7; 1920,5; 2038,1	11	0,306
3	2750,8...4126,2	2923,9; 3422,6; 3972,2	3	0,083
4	4126,2...5501,6	4176	1	0,028
5	5501,6...6877,0	5599; 5710,3; 6239,8	3	0,083
6	6877,0...8252,4	6721,2; 6854,9; 8252,4	3	0,083
—	Всього		36	1,000

Таблиця Г.4 – Дані перевірки узгодження емпіричного та теоретичного розподілу T_{0pL}^n лінійних споруд ВОЛЗ

ТЕКМ зв'язку в Донецькій області (рівнинний район) за 13-річний період

Номер інтер-валу	Інтервал часу напрацювання між відмовами, $(x_i \dots x_{i+1})$	Кількість відмов, n_i	Відносна частість відмов, n_i/n	Теоретична ймовірність		Теоретична:		Критерій згоди в i -му інтервалі, χ_i^2
				на початку інтервалу, $p(x_i)$	в кінці інтервалу, $p(x_{i+1})$	ймовірність потрапляння значення в i -ий інтервал, p_i	частість відмов, $n \cdot p_i$	
1	0...2235,75	9	0,290	1,000	0,635	0,365	11,315	0,474
2	2235,75...4471,5	7	0,226	0,635	0,403	0,232	7,192	0,005
3	4471,5...6707,25	6	0,194	0,403	0,256	0,147	7,440	2,79
4	6707,25...8943,0	6	0,194	0,256	0,163	0,093		
5	8943,0...11178,75	2	0,064	0,163	0,103	0,059	3,007	$1,6 \cdot 10^{-5}$
6	11178,75...13414,5	1	0,032	0,103	0,066	0,038		
	Сума	31	1,000	–	–	–	–	3,269

Таблиця Г.5 – Дані перевірки узгодження емпіричного та теоретичного розподілу T_{opL}^n лінійних споруд ВОЛЗ

ТЕКМ зв'язку в Одеській області (причорноморський район) за 13-річний період

Номер інтер-валу	Інтервал часу напрацювання між відмовами, $(x_i \dots x_{i+1})$	Кількість відмов, n_i	Відносна частість відмов, n_i/n	Теоретична ймовірність		Теоретична:		Критерій згоди в i -му інтервалі, χ_i^2
				на початку інтервалу, $p(x_i)$	в кінці інтервалу, $p(x_{i+1})$	ймовірність потрапляння значення в i -ий інтервал, p_i	частість відмов, $n \cdot p_i$	
1	0...1375,4	15	0,417	1,000	0,559	0,441	15,89	0,05
2	1375,4...2750,8	11	0,306	0,559	0,312	0,246	8,87	0,50
3	2750,8...4126,2	3	0,083	0,312	0,174	0,139	4,98	0,79
4	4126,2...5501,6	1	0,028	0,174	0,097	0,077	5,18	0,65
5	5501,6...6877,0	3	0,083	0,097	0,055	0,043		
6	6877,0...8252,4	3	0,083	0,055	0,030	0,024		
–	Сума	36	1,000	–	–	–	–	1,99

Додаток Д

Програмний код для визначення місця розташування ЗІП на ТЕКМ зв'язку та результати обробки даних

Д.1 Програмний код мовою Python для визначення місця розташування ЗІП за методом медіани

```
def floyd_warshall(n, matrix):
    # Копіюємо початкову матрицю відстаней
    dist = [[float('inf')] * n for _ in range(n)]
    for i in range(n):
        for j in range(n):
            if i == j:
                dist[i][j] = 0
            elif matrix[i][j] != 0:
                dist[i][j] = matrix[i][j]

    # Основний алгоритм
    for k in range(n):
        for i in range(n):
            for j in range(n):
                if dist[i][k] + dist[k][j] < dist[i][j]:
                    dist[i][j] = dist[i][k] + dist[k][j]
    return dist

def print_distance_matrix(matrix):
    n = len(matrix)
    print("\nМатриця відстаней між вершинами:")
    header = "    " + " ".join(f"{i+1:>5}" for i in range(n))
```

```

print(header)
print("  " + "-" * (6 * n))
for i in range(n):
    row_str = f'{i+1:>3} |' + "".join(f' {(f'{matrix[i][j]:.1f}' if matrix[i][j] <
float('inf') else ' inf'):>6}' for j in range(n))
    print(row_str)

def find_median_from_matrix(matrix):
    n = len(matrix)
    min_sum = float('inf')
    median_node = None

    print("\nСуми відстаней від кожної вершини до інших:")
    for i in range(n):
        total = sum(matrix[i][j] for j in range(n) if matrix[i][j] < float('inf'))
        print(f'Вершина {i+1}: сума відстаней = {total:.2f}')
        if total < min_sum:
            min_sum = total
            median_node = i + 1
    return median_node, min_sum

if __name__ == "__main__":
    n = int(input("Введіть кількість вершин у графі: "))
    m = int(input("Введіть кількість ребер у графі: "))

    # Початкова матриця суміжності (0 означає відсутність зв'язку, крім діагоналі)
    adj_matrix = [[0.0 for _ in range(n)] for _ in range(n)]

    print("Вводьте кожне ребро у форматі: <початкова вершина> <кінцева
вершина> <довжина> (через пробіл)")

```

```

for i in range(m):
    raw = input(f'Ребро {i+1}: ').replace(',', '.')
    u, v, w = map(float, raw.split())
    u, v = int(u) - 1, int(v) - 1 # переводимо у 0-індексацію
    adj_matrix[u][v] = w
    adj_matrix[v][u] = w # бо граф неорієнтований

dist_matrix = floyd_warshall(n, adj_matrix)
print_distance_matrix(dist_matrix)

median, total = find_median_from_matrix(dist_matrix)
print(f'\nМедіана графа: вершина {median}')
print(f'Сумарна відстань від неї до інших: {total:.2f}')

```

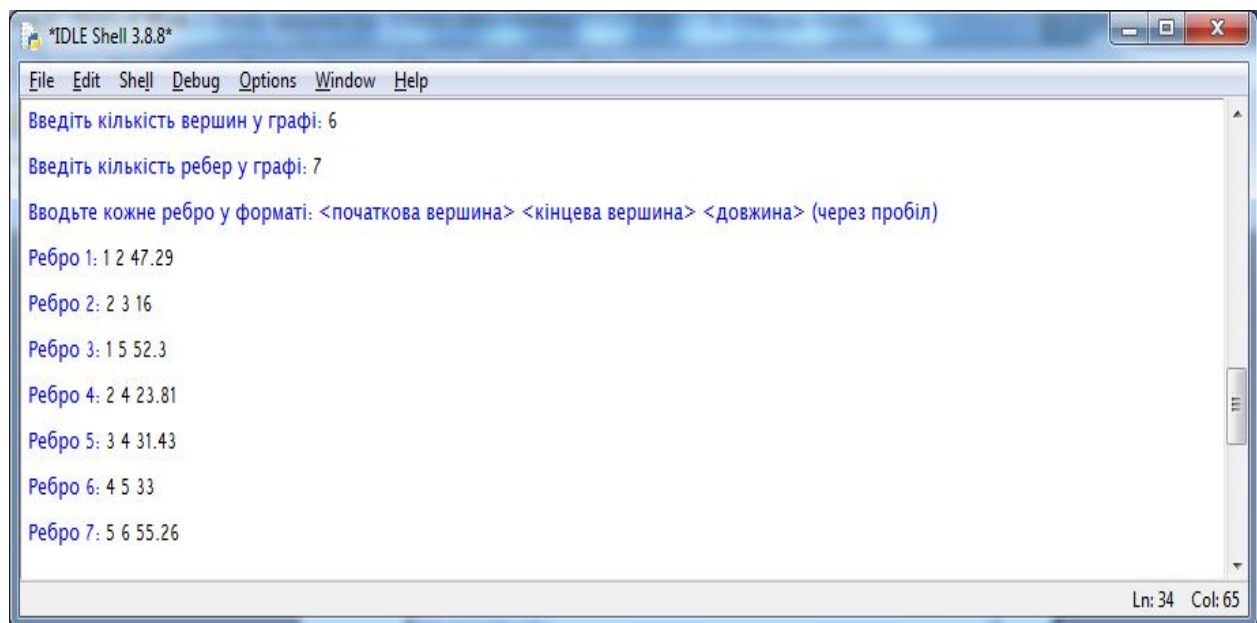
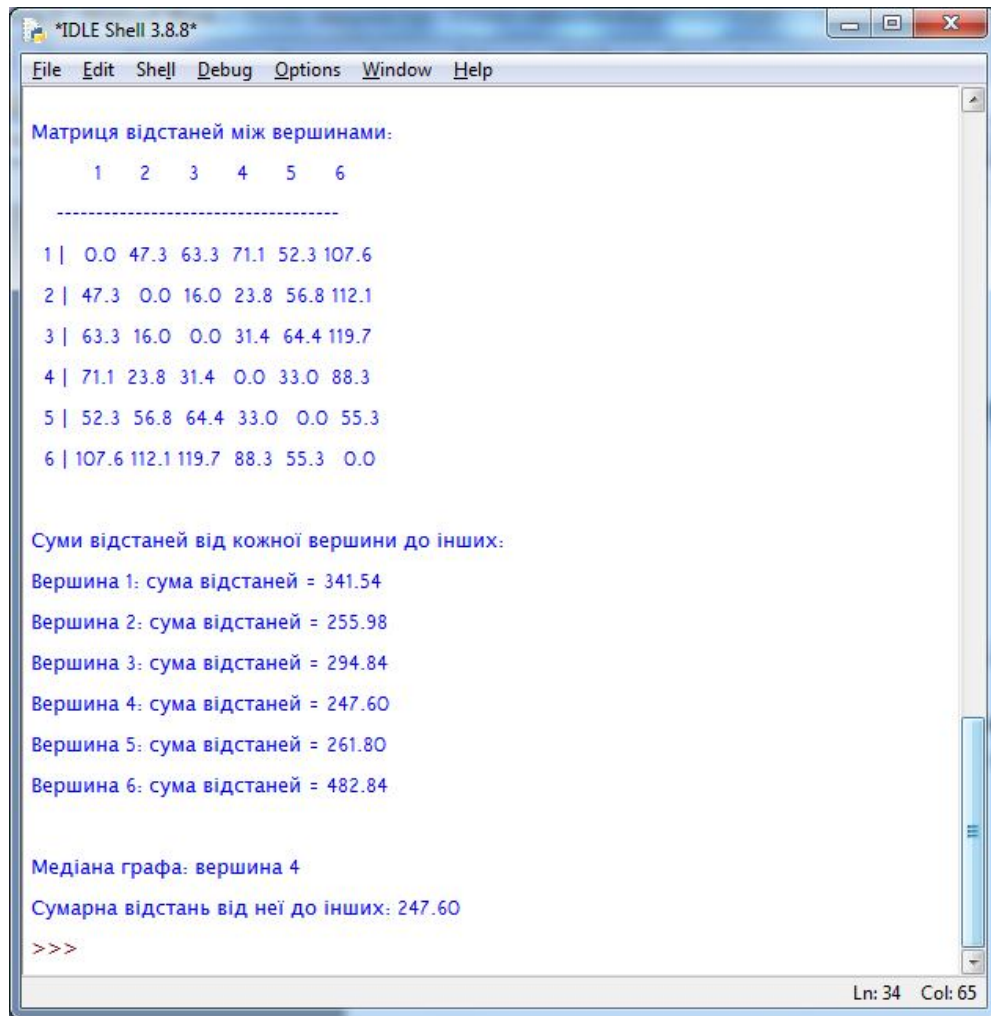


Рисунок Д.2 – Вихідні дані для визначення місця розташування ЗІП на ТЕКМ зв'язку за методом медіани



```

*IDLE Shell 3.8.8*
File Edit Shell Debug Options Window Help

Матриця відстаней між вершинами:
  1  2  3  4  5  6
-----
1 | 0.0 47.3 63.3 71.1 52.3 107.6
2 | 47.3 0.0 16.0 23.8 56.8 112.1
3 | 63.3 16.0 0.0 31.4 64.4 119.7
4 | 71.1 23.8 31.4 0.0 33.0 88.3
5 | 52.3 56.8 64.4 33.0 0.0 55.3
6 | 107.6 112.1 119.7 88.3 55.3 0.0

Суми відстаней від кожної вершини до інших:
Вершина 1: сума відстаней = 341.54
Вершина 2: сума відстаней = 255.98
Вершина 3: сума відстаней = 294.84
Вершина 4: сума відстаней = 247.60
Вершина 5: сума відстаней = 261.80
Вершина 6: сума відстаней = 482.84

Медіана графа: вершина 4
Сумарна відстань від неї до інших: 247.60
>>>
Ln: 34 Col: 65

```

Рисунок Д.3 – Результати розрахунку комп’ютерної програми при визначенні місця розташування ЗІП на ТЕКМ зв’язку за методом медіани

Д.4 Програмний код мовою Python для визначення місця розташування ЗІП за відстанню між вузлами та інтенсивністю відмов ВОЛЗ

```

import networkx as nx
import matplotlib.pyplot as plt
import math
from itertools import combinations

def floyd_warshall(n, matrix):
    dist = [[float('inf')] * n for _ in range(n)]
    for i in range(n):

```

```

for j in range(n):
    if i == j:
        dist[i][j] = 0
    elif matrix[i][j] != 0:
        dist[i][j] = matrix[i][j]
for k in range(n):
    for i in range(n):
        for j in range(n):
            if dist[i][k] + dist[k][j] < dist[i][j]:
                dist[i][j] = dist[i][k] + dist[k][j]
return dist

```

```

def print_matrix(matrix, title):
    n = len(matrix)
    print(f"\n{title} (усі значення  $\times 10^7$ ):")
    header = "    " + " ".join(f"{i+1:>10}" for i in range(n))
    print(header)
    print("    " + "-" * (11 * n))
    for i in range(n):
        row_str = f"{i+1:>3} |" + "".join(
            f" {(f'{matrix[i][j]*1e7:.3f}' if matrix[i][j] < float('inf') else 'inf'):>10}" for j in
range(n)
        )
        print(row_str)

```

```

def build_and_draw_graph(n, weight_matrix):
    G = nx.Graph()
    for i in range(n):
        G.add_node(i + 1)
        for j in range(i + 1, n):

```

```

weight = weight_matrix[i][j]
if weight != 0:
    G.add_edge(i + 1, j + 1, weight=weight * 1e7)

pos = nx.spring_layout(G, seed=42)
edge_labels = {edge: f'{w:.3f}' for edge, w in nx.get_edge_attributes(G,
'weight').items()}
nx.draw(G, pos, with_labels=True, node_color='lightblue', node_size=700,
font_size=12)
nx.draw_networkx_edge_labels(G, pos, edge_labels=edge_labels, font_size=10)
plt.title("Граф із вагами ( $\lambda \times L$ )  $\times 10^7$ ")
plt.show()

# === ГОЛОВНА ПРОГРАМА ===
n = int(input("Введіть кількість вершин у графі: "))
m = int(input("Введіть кількість ребер у графі: "))
k = int(input("Введіть кількість складів ЗІП: "))
max_distance_km = float(input("Введіть максимальну довжину обслуговування
одного складу ЗІП (у км): "))

print("\n ВВЕДІТЬ ДАНІ РЕБЕР:")
print("Формат: <початкова вершина> <кінцева вершина> <довжина, км>
<інтенсивність відмов (без  $\times 10^{-7}$ )>")

adj_matrix = [[0.0 for _ in range(n)] for _ in range(n)]
distance_matrix = [[float('inf') for _ in range(n)] for _ in range(n)]
edge_list = []

for i in range(m):
    raw = input(f'Ребро {i+1}: ').replace(',', '.')

```

```

u, v, length, intensity = map(float, raw.split())
u, v = int(u) - 1, int(v) - 1
lambda_value = intensity * 1e-7
weight = lambda_value * length
adj_matrix[u][v] = weight
adj_matrix[v][u] = weight
distance_matrix[u][v] = length
distance_matrix[v][u] = length
edge_list.append((u, v, weight))

shortest_paths = floyd_warshall(n, adj_matrix)
shortest_km = floyd_warshall(n, distance_matrix)
print_matrix(adj_matrix, "Матриця ваг ( $\lambda \times L$ ")
print_matrix(shortest_paths, "Матриця найкоротших шляхів (за вагою)")

vertex_weights = [sum(shortest_paths[i][j] for j in range(n) if i != j) for i in range(n)]
assignment = [[] for _ in range(n)]
for u, v, w in edge_list:
    if vertex_weights[u] <= vertex_weights[v]:
        assignment[u].append(w)
    else:
        assignment[v].append(w)

assigned_weight = [sum(assignment[i]) for i in range(n)]
candidate_indices = [i for i in range(n) if any(shortest_km[i][j] <= max_distance_km
for j in range(n) if i != j)]

best_comb = []
best_cover_weight = -1
for comb in combinations(candidate_indices, k):

```



```

covered_nodes = set()
total_weight = 0
for center in comb:
    for j in range(n):
        if shortest_km[center][j] <= max_distance_km:
            covered_nodes.add(j)
    total_weight += assigned_weight[center]
if len(covered_nodes) == n and total_weight > best_cover_weight:
    best_cover_weight = total_weight
    best_comb = comb

print("\nСума потоків відмов для кожної вершини (за призначеними ребрами):")
for i, val in enumerate(assignment):
    print(f"Вершина {i+1}: {sum(val)*1e7:.3f}")

if best_comb:
    selected = [v + 1 for v in best_comb]
    print(f"\n Вибрані вершини для розміщення {k} складів ЗІП (з покриттям усієї мережі): {selected}")
else:
    print("\n Не вдалося знайти {k} вершин, які покривають всю мережу в заданому радіусі.")

build_and_draw_graph(n, adj_matrix)

```

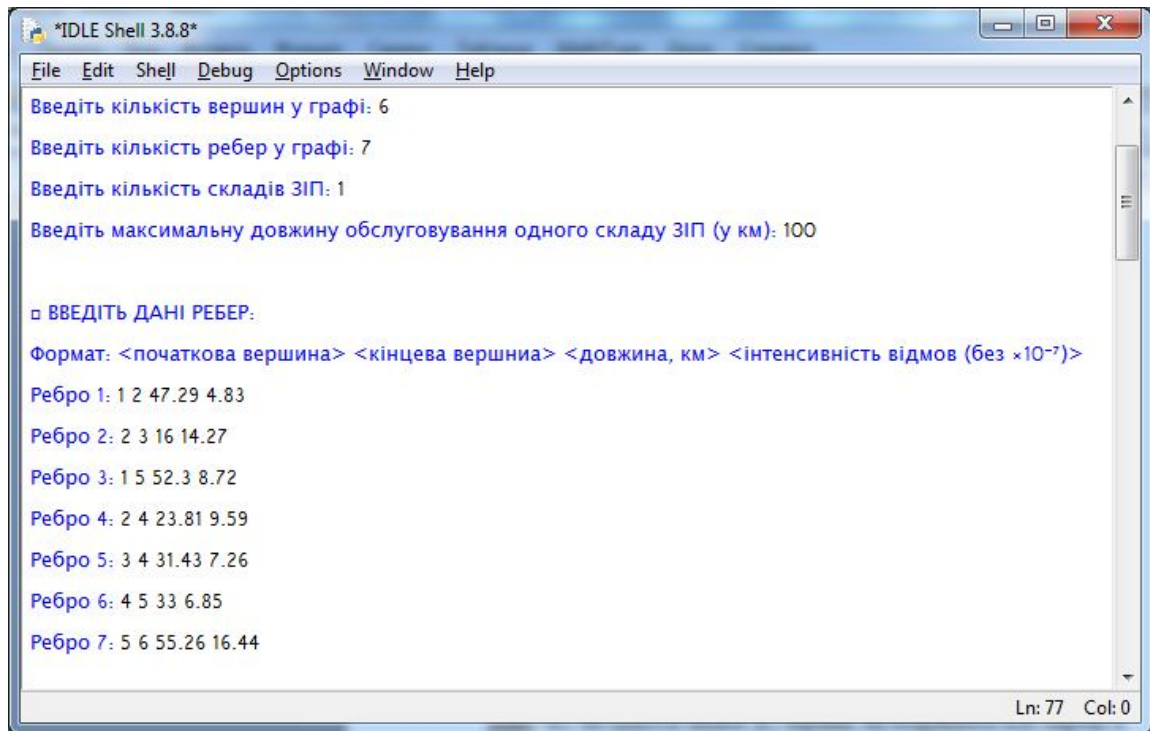


Рисунок Д.5 – Вихідні дані для визначення місця розташування ЗІП на ТЕКМ зв'язку за запропонованим методом

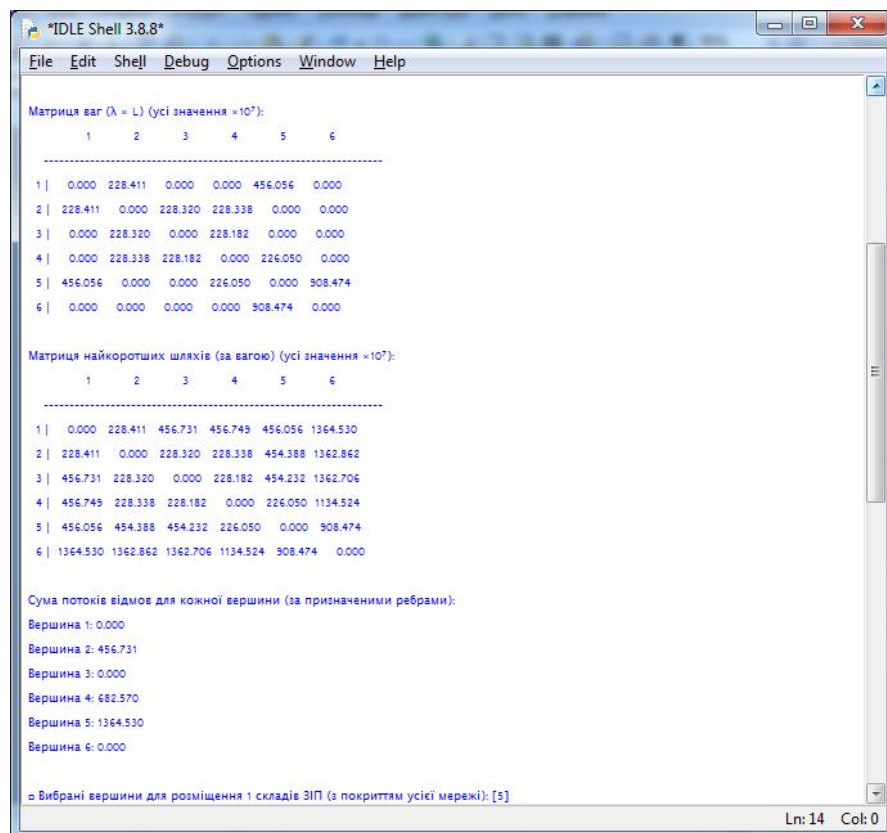


Рисунок Д.6 – Результати розрахунку комп'ютерної програми при визначенні місця розташування ЗІП на ТЕКМ зв'язку за відстанню між вузлами та інтенсивністю відмов ВОЛЗ

Д.7 Програмний код мовою Python для визначення місця розташування ЗП за сумарним часом відновлення зв'язку та коефіцієнтом готовності

```
import heapq

# --- Алгоритм Дейкстри ---
def dijkstra(graph, start_node):
    distances = {node: float('inf') for node in graph}
    distances[start_node] = 0
    queue = [(0, start_node)]
    while queue:
        current_distance, current_node = heapq.heappop(queue)
        if current_distance > distances[current_node]:
            continue
        for neighbor, weight in graph[current_node]:
            distance = current_distance + weight
            if distance < distances[neighbor]:
                distances[neighbor] = distance
                heapq.heappush(queue, (distance, neighbor))
    return distances

# --- Формула (6.42) ---
def calculate_KpZIP( $\Lambda$ , L, t):
     $\Lambda\_real = \Lambda * 1e-7$ 
    return ( $\Lambda\_real * t * L$ ) / (1 +  $\Lambda\_real * t * L$ ) # ← формула з нормалізацією

# --- Введення даних ---
num_edges = int(input("Скільки ділянок (ребер) у графі? "))

print("\nВведіть дані для кожної ділянки через пробіл:")
```

```

print("Формат: вузол_1 вузол_2 довжина_км інтенсивність_відмов (без  $10^{-7}$ )")

edges_data = []
nodes = set()
for i in range(1, num_edges + 1):
    parts = input(f'ребро {i}: ').split()
    u, v = parts[0], parts[1]
    L = float(parts[2])
     $\Lambda$  = float(parts[3])
    edges_data.append((u, v, L,  $\Lambda$ ))
    nodes.update([u, v])

# Введення параметрів ЗІП
speed = float(input("\nВведіть середню швидкість доставки ЗІП (км/год): "))
start_node = input("Введіть вузол, в якому зберігається ЗІП: ")

# --- Побудова графа ---
graph = {}
for u, v, L, _ in edges_data:
    graph.setdefault(u, []).append((v, L))
    graph.setdefault(v, []).append((u, L))

# --- Обчислення найкоротших шляхів ---
shortest_distances = dijkstra(graph, start_node)

# --- Розрахунок часу доставки та КпЗІП ---
results = []
downtime_coeffs = [] # Збираємо для подальшої зваженої суми

for u, v, L,  $\Lambda$  in edges_data:

```

```

dist_u = shortest_distances[u]
dist_v = shortest_distances[v]
min_dist = min(dist_u, dist_v)
if min_dist == 0:
    total_distance = L
else:
    total_distance = min_dist + L
t = total_distance / speed
Kp = calculate_KpZIP( $\Lambda$ , L, t)
downtime_coeffs.append(Kp)
results.append((f'{u}-{v}', L,  $\Lambda$ , total_distance, t, Kp))

# --- Обчислення зваженого сумарного КпЗІП ---
total_weighted = sum(Kp * L for (_, L, _, _, _, Kp) in results)
total_length = sum(L for (_, L, _, _, _, _) in results)
Kp_sum = total_weighted / total_length
Kg = 1 - Kp_sum

# --- Вивід результатів ---
print(f'\n Результати доставки ЗІП з вузла {start_node} (швидкість = {speed} км/год):\n')
print("{:<8} {:>10} {:>12} {:>14} {:>10} {:>14}".format(
    "Ділянка", "Довжина", " $\Lambda$  ( $\times 10^{-7}$ )", "Відстань (км)", "Час (год)", "КпЗІП ( $\times 10^{-5}$ )"
))
for name, L,  $\Lambda$ , dist, t, Kp in results:
    print("{:<8} {:>10.2f} {:>12.2f} {:>14.2f} {:>10.2f} {:>14.5f}".format(
        name, L,  $\Lambda$ , dist, t, Kp * 1e5
    ))

```

```
print(f"\n Зважений коефіцієнт простою КпЗІП = {Kp_sum:.8f}")
print(f" Коефіцієнт готовності Кг = {Kg:.6f}")
```

```

IDLE Shell 3.8.8
File Edit Shell Debug Options Window Help
Формат: вузол_1 вузол_2 довжина_км інтенсивність_відмов (без 10^-7)
ребро 1: 1 2 47.29 4.83
ребро 2: 2 3 16 14.27
ребро 3: 1 5 52.3 8.72
ребро 4: 2 4 23.81 9.59
ребро 5: 3 4 31.43 7.26
ребро 6: 4 5 33 6.85
ребро 7: 5 6 55.26 16.44

Введіть середню швидкість доставки ЗІП (км/год): 40
Введіть вузол, в якому зберігається ЗІП: 5

□ Результати доставки ЗІП з вузла 5 (швидкість = 40.0 км/год):

Ділянка  Довжина  λ (×10^-7)  Відстань (км)  Час (год)  КпЗІП (×10^-5)
1-2      47.29      4.83      99.59      2.49      5.68653
2-3      16.00      14.27     72.81      1.82      4.15582
1-5      52.30      8.72      52.30      1.31      5.96258
2-4      23.81      9.59      56.81      1.42      3.24286
3-4      31.43      7.26      64.43      1.61      3.67530
4-5      33.00      6.85      33.00      0.82      1.86488
5-6      55.26     16.44     55.26      1.38     12.54900

□ Зважений коефіцієнт простою КпЗІП = 0.00006156
✓ Коефіцієнт готовності Кг = 0.999938
Ln: 56 Col: 73

```

Рисунок Д.8 – Результати розрахунку комп'ютерної програми при визначенні місця розташування ЗІП на ТЕКМ зв'язку за сумарним часом відновлення зв'язку та коефіцієнтом готовності

Додаток Е

Вибір математичних моделей визначення оптимального місця розташування запасних частин фрагменту мережі ВОЛЗ

Для досягнення даної мети можна використовувати такі математичні моделі:

1. Модель оптимізації лінійного програмування: задача лінійного програмування може бути сформульована для оптимізації розташування запасних частин. Мета – мінімізувати витрати, пов'язані з утриманням запасів та витратами на відновлення в разі відмови.

2. Модель теорії графів: моделі графів можуть використовуватися для визначення найкращих місць для розташування запасних частин на основі аналізу структури мережі та потенційних точок відмови.

3. Модель прогнозування ймовірності відмов: можна використовувати статистичні методи для прогнозування ймовірності відмов в різних точках мережі. Це може включати в себе використання методів часового ряду, стохастичних моделей та інших методів прогнозування.

4. Модель оптимізації інвентаризації: використання моделей оптимізації інвентаризації для визначення оптимальних рівнів запасів на різних точках мережі, щоб забезпечити баланс між затратами на утримання запасів та витратами на відновлення.

5. Модель динамічного програмування: моделі динамічного програмування можуть бути застосовані для оптимізації розташування запасних частин, враховуючи динаміку мережі та ймовірності відмов.

6. Модель імітації: моделі імітації можуть використовуватися для моделювання різних сценаріїв взаємодії запасних частин із системою, дозволяючи оцінити ефективність розташування.

7. Модель оптимізації часу відновлення: оптимізація розташування запасних частин може бути виконана для мінімізації часу відновлення мережі в разі відмови.

Додаток Ж

**Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про
апробацію результатів дисертації**

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Бондаренко О.В., Степанов Д.М., Боярова Г.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., Кіфорук 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 сигнал. *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>.

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).

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>.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

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. (Очна участь здобувача з доповіддю).

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. (Очна участь здобувача з доповіддю).

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. (Очна участь здобувача з доповіддю).

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. (Очна участь здобувача з доповіддю).

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. (Очна участь здобувача з доповіддю).

29. Бондаренко О.В., Степанов Д.М., Кіфорок 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. (Очна участь здобувача з доповіддю).

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. (Очна участь здобувача з доповіддю).

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. (Очна участь здобувача з доповіддю).

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. (Заочна участь здобувача з доповіддю).

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. (Заочна участь здобувача з доповіддю).

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. (Заочна участь здобувача з доповіддю).

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. (Очна участь здобувача з доповіддю).

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. (Очна участь здобувача з доповіддю).

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. (Заочна участь здобувача з доповіддю).

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. (Очна участь здобувача з доповіддю).

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. (Очна участь здобувача з доповіддю).

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. (Очна участь здобувача з доповіддю).

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. Лондон, 2020. С. 806 – 810. (Заочна участь здобувача з доповіддю).

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. (Заочна участь здобувача з доповіддю).

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. (Заочна участь здобувача з доповіддю).

44. Степанов Д.М., Горобець І.А. Порівняльна оцінка механічної міцності склопластикових стержнів силового елементу 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. (Заочна участь здобувача з доповіддю).

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. (Заочна участь здобувача з доповіддю).

46. Степанов Д.М., Свердлова 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. (Заочна участь здобувача з доповіддю).

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. (Заочна участь здобувача з доповіддю).

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. (Заочна участь здобувача з доповіддю).

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. (Заочна участь здобувача з доповіддю).

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

50. Волоконно-оптичний кабель з багатоповивною модульною конструкцією осердя: пат. 85703 Україна, МПК G 02 B 6/44, заявник та патентовласник Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова; заявл. 11.06.2013; опубл. 25.11.2013, Бюл. № 22.