

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-61-37>

УДК 621.391.8:621.315.617

Якимчук Наталія Миколаївна, к.т.н., доцент<https://orcid.org/0000-0002-8173-449X>**Лучук Володимир Віталійович**, студент

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна.

АЛГОРИТМІЧНИЙ ПІДХІД ДО ВИБОРУ КІЛЬКОСТІ ТА ПАРАМЕТРІВ ПІДСИЛЮВАЧІВ У WDM МАГІСТРАЛЯХ З ВИКОРИСТАННЯМ OPTISYSTEM

Якимчук Н. М., Лучук В. В. Алгоритмічний підхід до вибору кількості та параметрів підсилювачів у WDM магістралях з використанням OptiSystem. У статті розглянуто алгоритмічний підхід до визначення оптимальної кількості, місцеположення та параметрів оптичних підсилювачів у волоконно-оптичних магістралях з мультиплексуванням за довжиною хвилі (WDM). Для дослідження застосовано програмне середовище OptiSystem, яке дозволяє проводити моделювання фізичних процесів у волокні з урахуванням дисперсії, нелінійних ефектів, втрат та шуму підсилювачів типу EDFA. Запропонована методика базується на поетапному алгоритмі оптимізації енергетичного бюджету, розподілу коефіцієнтів підсилення та оцінки співвідношення сигнал/шум (OSNR), що забезпечує досягнення заданої якості передавання при мінімальній кількості підсилювачів. Проведені моделювання показали, що надмірне підсилення одного каскаду призводить до зростання шуму ASE та погіршення Q-фактора, тоді як оптимальний розподіл підсилення і розташування EDFA забезпечують найкращі параметри системи. Для довгих магістралей встановлено межу ефективного підсилення, після якої спостерігається деградація OSNR, що вимагає додаткових підсилювальних секцій або регенерації. Запропонований підхід може бути використаний для проектування енергоефективних WDM-ліній довжиною до 1000 км і створення автоматизованих процедур оптимізації телекомунікаційних систем нового покоління.

Ключові слова: WDM-система, оптичний підсилювач EDFA, OptiSystem, OSNR, Q-фактор, оптимізація енергетичного бюджету.

Yakymchuk N., Luchuk V. Algorithmic Approach to Selecting the Number and Parameters of Amplifiers in WDM Trunk Lines Using OptiSystem. The article presents an algorithmic approach to determining the optimal number, placement, and parameters of optical amplifiers in wavelength-division multiplexing (WDM) fiber-optic transmission lines. The OptiSystem simulation environment was used to model the physical processes in the fiber, including dispersion, nonlinear effects, losses, and noise generated by EDFA amplifiers. The proposed methodology is based on a step-by-step algorithm for optimizing the power budget, gain distribution, and signal-to-noise ratio (OSNR), ensuring the required transmission quality with a minimal number of amplifiers. Simulation results show that excessive gain in one stage leads to an increase in ASE noise and degradation of the Q-factor, while the optimal gain distribution and proper EDFA placement provide the best system performance. For long-haul links, a limit of effective amplification was identified, beyond which OSNR degradation occurs, requiring additional amplifier stages or signal regeneration. The proposed approach can be applied to the design of energy-efficient WDM lines up to 1000 km long and to the development of automated optimization procedures for next-generation telecommunication systems.

Keywords: WDM system, EDFA optical amplifier, OptiSystem, OSNR, Q-factor, power budget optimization.

Постановка наукової проблеми. Зростання пропускної здатності сучасних телекомунікаційних мереж безпосередньо пов'язане з активним впровадженням спектрально-ефективних систем мультиплексування за довжинами хвиль (WDM). У таких системах якість передавання суттєво залежить від оптимального вибору параметрів оптичних компонентів – лазерних джерел, мультиплексорів та демультиплексорів, підсилювачів EDFA, волоконних ліній та фільтраційних вузлів. Невірні налаштування ширини спектральних фільтрів, рівня підсилення, спектральної відстані каналів або довжини регенераційних ділянок призводять до зростання взаємних перешкод, міжканальних нелінійних ефектів, погіршення OSNR та зниження показників BER/Q-фактора. Проте безпосередній експеримент у реальних волоконно-оптичних сегментах часто є складним, дорогим і потребує значних ресурсів.

За цих умов застосування програмного моделювання стає ключовим підходом для дослідження характеристик WDM-систем та пошуку оптимальних інженерних рішень. Оптичний симулятор OptiSystem забезпечує можливість варіативного й точного аналізу взаємозв'язку параметрів компонентів та їх впливу на якість передачі інформації, враховуючи нелінійні ефекти, спектральні перекриття й частотні обмеження. Разом з тим проблема полягає в тому, що існує велика кількість параметрів, які впливають на результати; при цьому процес їх оптимізації не є тривіальним і потребує формалізованого підходу.

Таким чином, виникає задача визначення оптимальних значень параметрів WDM-систем (зокрема параметрів EDFA, ширини спектральних фільтрів та каналного рознесу), використовуючи програмне моделювання в OptiSystem, з метою покращення загальної якості передачі та мінімізації міжканальних спотворень.

Аналіз досліджень. Сучасні дослідження у сфері WDM-оптичних систем демонструють чіткий зсув від класичних підходів до проектування підсилювальних ділянок до формалізованої

оптимізації параметрів лінійного тракту та конфігурацій підсилювачів у просторі багатоцільових критеріїв (QoT / енергоспоживання / CAPEX / досяжність). Ряд робіт зосереджується на оптимізації розміщення гібридних EDFA/Raman підсилювачів у довгих магістралях та мережах із підвищеною спектральною щільністю, включно з (C+L)-діапазонними системами [1–4]. В цих роботах показано, що вибір місця встановлення підсилювачів та їхнього підсилення не може спиратися на статичні правила «кожні 80–100 км», а повинен враховувати нелінійні обмеження, профіль загасання волокон і характер обмежень OSNR.

Інший напрямок – моделі точного опису EDFA, як індивідуальних компонентів в контексті інструментального моделювання (OptiSystem та ін.) [5,7]. Показано, що спрощені моделі EDFA призводять до некоректних прогнозів OSNR і помилкових рішень при оптимізації топології, а точні моделі підсилення й спектральної характеристики дозволяють уточнити критерії вибору типу підсилювачів, DCF-компенсації та схем фільтрації. Водночас залишається відкритою проблема узгодженого уніфікованого критерію оптимальності – більшість робіт оптимізують або потужність, або досяжність, або CAPEX/енерговитрати; практично відсутні дослідження, що забезпечують одночасну оптимізацію при заданих обмеженнях на OSNR та швидкість передачі.

Низка праць оцінює вплив нелінійних ефектів та міжканальних взаємодій (FWM, XPM, SPM), та демонструє, що саме вони визначають верхні межі підсилення й максимально можливу дальність [6,8,10]. З іншого боку, частина експериментальних досліджень демонструє, що при коректній оптимізації місця підсилювачів та врахуванні реального профілю загасання (у тому числі з DCF) можна суттєво скоротити число підсилювачів або зменшити необхідне середнє підсилення без деградації QoT.

Таким чином, незважаючи на значну кількість робіт, відсутній єдиний відтворюваний формалізований алгоритм, який би дозволяв безпосередньо за вхідними параметрами системи (вихідна/вхідна потужність, довжина лінії, коефіцієнти загасання, NF підсилювачів) – однозначно визначити оптимальну кількість підсилювачів, їх місце розміщення та індивідуальні коефіцієнти підсилення. Саме цю наукову і практичну прогалину заповнює запропонована методика: ми пропонуємо алгоритмічно-замкнений підхід із обмеженням на OSNR та урахуванням шумової фігури, що може бути реалізований у OptiSystem та інтегрований у процес проектування. Це робить дослідження релевантним як у науковому контексті (розширення теорії оптимального проектування), так і у промислових застосуваннях, оскільки дозволяє уникати надлишкового підсилення та надмірної кількості підсилювачів у лініях 10–800 км.

Перспективи подальшого розвитку – поширення підходу на multi-band (C+L+S) передачу, спільна оптимізація нелінійностей (GN-модель) та автоматизований вибір компромісу між OSNR, NLI та CAPEX, що сьогодні практично не представлено у літературі.

Метою дослідження є розроблення та валідація формалізованої методики визначення оптимальної кількості, місцеположення та робочих параметрів оптичних підсилювачів у WDM-лініях передачі. Методика має забезпечувати досягнення заданої якості передавання (QoT), у першу чергу в частині рівня вихідної OSNR, з урахуванням фізичних обмежень компонентів – зокрема максимальної потужності підсилювача, шумової фігури, втрат волокон (NZ та DCF сегментів) та впливу нелінійних ефектів. Додатковою метою є формулювання алгоритмічного процесу у вигляді послідовних правил/кроків, що можуть бути реалізовані в OptiSystem (або інших CAE-системах) як проектна процедура для мереж різної довжини, що дозволяє скоротити кількість підсилювачів без деградації OSNR та створює передумови до energy-efficient / CAPEX-efficient проектування нових WDM магістралей.

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження.

Оптична програмна платформа OptiSystem відіграє ключову роль у моделюванні WDM-систем та дозволяє проводити комплексну оптимізацію архітектури без необхідності виконання дорогих натурних експериментів. Ця система забезпечує точне відтворення фізичних процесів у волокну, зокрема врахування нелінійності, дисперсії, втрат, шумів підсилювачів EDFA та механізмів генерації ASE, що робить її придатною для аналізу реалістичних сценаріїв перед впровадженням у мережу [7]. Важливою перевагою є можливість конфігурувати структуру магістралі із змінною кількістю спанів, узгоджувати параметри каналів, налаштовувати коефіцієнти підсилення, розподіляти регенераційні вузли та проводити сценарні дослідження. OptiSystem забезпечує інструменти для автоматичного збору даних у формі таблиць та спектрального аналізу через WDM-аналізатор та оптичний аналізатор спектру OSA, що дозволяє порівнювати альтернативні конфігурації та проводити пошук оптимальних режимів на основі кількісних критеріїв. У підсумку,

OptiSystem виступає не лише інструментом візуалізації, а насамперед – експериментально-аналітичною платформою, яка дає можливість побудувати методику прийняття рішень, оптимізувати параметри розміщення та числа підсилювачів, отримати числові залежності OSNR, BER та Q-фактора і сформулювати алгоритм проектування WDM-ліній з прогнозованою якістю передачі для різних довжин і режимів експлуатації.

За допомогою OptiSystem була створена модель волоконно-оптичної системи 40 Гбіт з мультиплексуванням за довжиною хвилі (WDM) (рис. 1). У передавальній частині системи кожен канал формує свій оптичний сигнал за допомогою когерентного лазера, який випромінює на окремій частоті в діапазоні від 193,1 до 193,4 ТГц. Потік даних у кожному каналі генерується псевдовипадковою послідовністю бітів, що подається на модулятор Маха-Цендера, де відбувається модуляція оптичного сигналу. Таким чином, створюються кілька незалежних оптичних потоків, які потім об'єднуються за допомогою WDM-мультиплексора в єдиний багатоканальний сигнал.

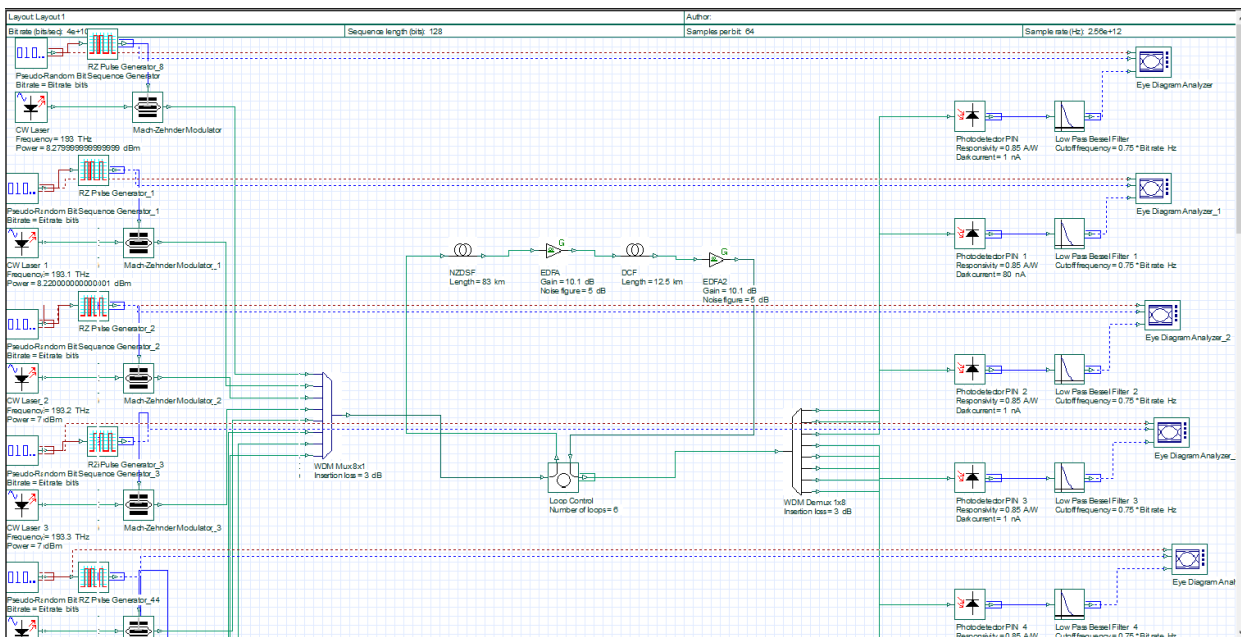


Рис. 1 Частина моделі 8-канальної системи WDM

Після мультиплексування об'єднаний сигнал надходить у досліджувану волоконно-оптичну лінію передачі, яка містить ділянку неметалізованого одномодового волокна (NZDSF), компенсуючий модуль дисперсії (DCF) та оптичні підсилювальні секції EDFA. Таке компонування повинне компенсувати хроматичну дисперсію та втрати потужності в лінії, забезпечуючи стабільну передачу сигналу на великі відстані.

На приймальному боці сигнал розділяється за допомогою WDM-демультиплексора, який виділяє кожен канал на окремій довжині хвилі. Далі кожен канал надходить на фотодетектор PIN, де оптичний сигнал перетворюється в електричний, проходить через низькочастотний фільтр і подається на аналізатор око-діаграм. За допомогою цих аналізаторів оцінюється якість переданих сигналів, зокрема рівень спотворень, завад і часових зсувів. Уся модель відтворює реальну структуру WDM-системи з урахуванням оптичного підсилення, компенсації дисперсії та багатоканального передавання даних, що дозволяє дослідити її роботу при різних параметрах волокна та підсилювачів.

Для забезпечення повної компенсації дисперсії накопиченої в основному волокні (NZDSF) розраховувалась довжина компенсаційного волокна (DCF):

$$D_{DSF} * L_{DSF} + D_{DCF} * L_{DCF} = 0, \quad (1)$$

$$L_{DSF} + L_{DCF} = L, \quad (2)$$

де: D_{DSF} – дисперсія основного волокна (приблизно +4...6 пс/(нм·км) для NZDSF), L_{DSF} – довжина основного волокна, D_{DCF} – дисперсія компенсаційного волокна (від'ємна, зазвичай -20...-100 пс/(нм·км)), L_{DCF} – довжина компенсаційного волокна, L – загальна довжина ділянки.

Для вибраної моделі $D_{DSF} = 4,5$ пс/(нм·км), $D_{DCF} = -30$ пс/(нм·км), $L = 100$ км отримали розподіл довжин основного і компенсаційного волокна для різних значень для різних значень запасу компенсації дисперсії (Таблиця 1).

Таблиця 1 – Зміна залишкової дисперсії оптичного тракту

Запас ρ (%)	L_{DSF} , км	L_{DCF} , км	Залишкова дисперсія D_{res} , пс/нм
0%	86.95	13.04	≈ 0.0
5%	86.30	13.69	-22.5
10%	85.65	14.34	-45.0
15%	85.00	15.00	-67.5

Для компенсації втрат потужності, що виникають під час проходження сигналу через волокно передбачено оптичні підсилювачі потужності EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier). Вибір саме EDFA зумовлений тим, що він забезпечує високий коефіцієнт підсилення у діапазоні довжин хвиль 1550 нм, де мають найменше загасання сучасні оптичні волокна [4]. Значення підсилення підбирається таким чином, щоб компенсувати втрати на попередній ділянці NZDSF, з урахуванням допустимого рівня шуму та нелінійних ефектів.

$$P_{rx}(dBm) = P_{tx}(dBm) - \Sigma IL(dB) + \Sigma G(dB). \quad (3)$$

де P_{tx} – потужність передавача, P_{rx} – потужність приймача, ΣIL – сума всіх введених втрат в тракті, що включає втрати демультиплексора, втрати в з'єднаннях і втрати у волокні, а ΣG – сума всіх підсилень, зокрема підсилення EDFA.

Для забезпечення допустимого рівня потужності на вході фотодетектора $P_{rx} = 1$ дБм, при заданому значенні вхідної потужності та встановлених втратах в лінії розраховане загальне підсилення ΣG близько 20 дБ.

При проєктуванні ліній передачі з каскадуванням декількох оптичних підсилювачів необхідно враховувати ефект накопичення шуму спонтанного випромінювання (ASE – Amplified Spontaneous Emission) [10]. Особливо це актуально для довгих оптичних трактів, у яких сумарне загасання волокна є значним і потребує підсилення у декількох точках. Оптичний підсилювач вводить шум ASE разом із корисним сигналом. Якщо перший підсилювач має надмірно високе підсилення G_1 , то рівень шуму ASE після нього буде суттєвим, і цей шум надалі ще додатково підсилюватиметься наступним каскадом підсилення. Тому оптимальною є стратегія розподіленого підсилення – коли загальне підсилення між двома підсилювачами розподіляється більш рівномірно, а не концентрується в одному каскаді. Такий підхід мінімізує внесок ASE від першого підсилювача і зменшує посилення шуму у другому підсилювачі.

Окремо слід враховувати вплив волокна дисперсійної компенсації DCF. Даний елемент має суттєву вставну втрату, тому його розташування між підсилювачами напряду впливає на необхідні рівні підсилення у кожному каскаді. Вставні втрати DCF одразу після першого підсилювача можуть призвести до додаткового зниження потужності сигналу перед другим підсилювачем, що вимагатиме збільшення G_2 . Таким чином, при оптимізації значень G_1 та G_2 , обов'язково слід враховувати сумарні втрати в DCF, щоб забезпечити достатній рівень сигналу перед другим підсилювачем і уникнути перенасичення першого.

Для оцінки якості моделі будемо визначати параметри середнього співвідношення сигнал/шум на виході загального оптичного тракту, Q-фактор та BER на виході одного з каналів. BER є кінцевим показником якості системи, який безпосередньо визначає ефективність зв'язку. Відповідно, Q-фактор – це оптичний або електричний параметр, що кількісно оцінює роздільність рівнів логічних «0» і «1» у сигналі після детекції [11]. Ці два параметри визначаються через результати аналізатора око-діаграми для кожного вихідного каналу WDM.

Чим більший Q, тим краще розділяються рівні «1» і «0», і тим менше помилок при прийомі. При $Q > 6$ система зазвичай працює стабільно. Коли $Q < 4$, то навіть корекція помилок (FEC) не може забезпечити прийнятну якість сигналу.

Було проведено моделювання розподілу підсилення EDFA розміщених на кінцях відрізків основного та компенсаційного волокна (рис. 2). Результати показано в табл. 2 та на графіку рис. 3.

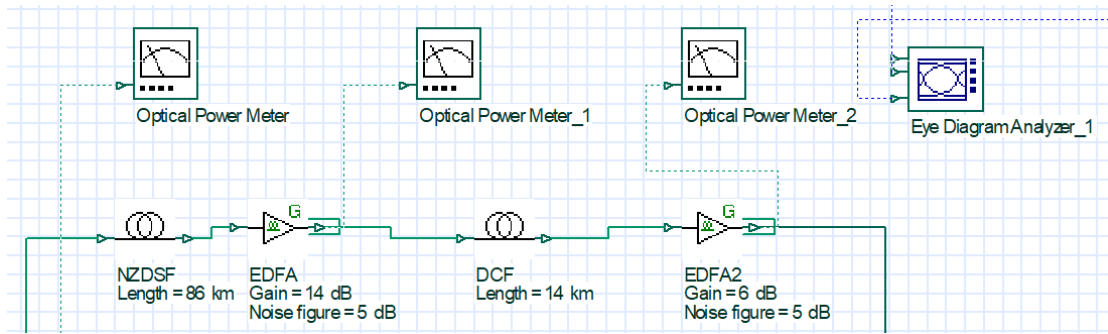


Рис. 2 Моделювання розподілу коефіцієнта підсилення EDFA для лінії 100 км

Таблиця 2 – Показники якості системи при зміні параметрів підсилювачів EDFA

G_1 , дБ	G_2 , дБ	P_1 (IN), дБм		P_2 (MID), дБм		P_3 (OUT), дБм		SNR, дБ	Max Q
		P_{signal}	P_{noise}	P_{signal}	P_{noise}	P_{signal}	P_{noise}		
4	16	5,639	-100	-6,700	-19,379	5,589	-3,947	9,536	8,29
6	14	5,610	-100	-4,730	-17,154	5,560	-4,734	10,294	8,42
8	12	5,604	-100	-2,736	-15,018	5,554	-5,315	10,869	8,105
10	10	5,628	-100	-0,711	-12,934	5,579	-5,727	11,306	7,807
12	8	5,518	-100	1,178	-10,881	5,468	-6,009	11,477	7,778
14	6	5,607	-100	3,267	-8,849	5,557	-6,195	11,752	7,56
16	4	5,564	-100	5,231	-6,828	5,521	-6,319	11,840	7,27

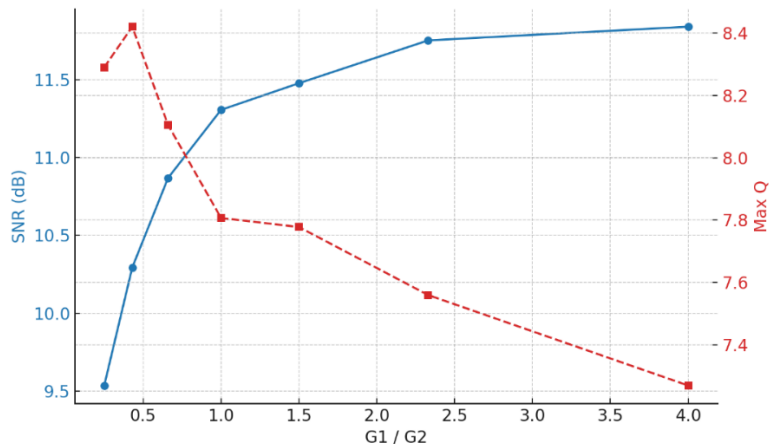


Рис. 3 Залежність SNR та Q-фактора від відношення рівнів підсилення EDFA

Аналіз показав, що при збільшенні підсилення EDFA1 відбувається суттєве збільшення шуму ASE перед DCF, який у подальшому додатково підсилюється EDFA2. Значення SNR поступово зростає, що свідчить про покращення співвідношення сигнал/шум завдяки більшій потужності сигналу. Водночас Q-фактор, який характеризує якість відновлення сигналу та рівень помилок (BER), навпаки зменшується. Це вказує на те, що надмірне збільшення підсилення одного з каскадів G_1 призводить до погіршення оптичного балансу системи, зростання нелінійних спотворень і, як наслідок, зниження якості переданого сигналу. Найвищий Q-фактор спостерігається при зменшенні G_1 до 6 дБ та збільшенні G_2 до 14 дБ, тобто при зміщенні більшої частини загального підсилення у другий каскад. Тому для даної довжини лінії оптимальним є варіант, коли перший підсилювач працює з меншим коефіцієнтом підсилення, а компенсація втрат виконується другим підсилювачем.

Наступний крок демонструє результати моделювання розміщення підсилювачів в різних точках оптоволоконного тракту при рівномірному розподілі коефіцієнта підсилення (табл. 3, рис 3-4).

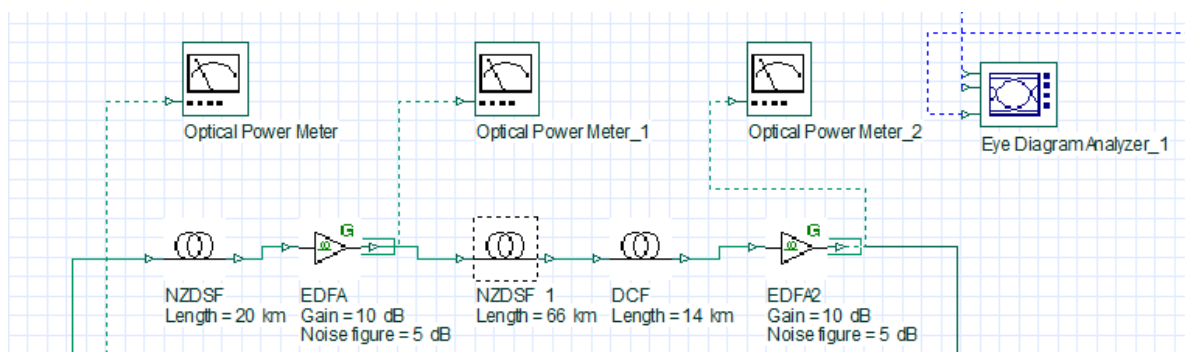


Рис. 4 Моделювання визначення точок розміщення EDFA для лінії 100 км

Таблиця 3 – Показники якості системи при зміні точки розміщення EDFA

L_1 , км	L_2 , км	P_1 (IN), дБм		P_2 (MID), дБм		P_3 (OUT), дБм		SNR, дБ	Max Q
		P_{signal}	P_{noise}	P_{signal}	P_{noise}	P_{signal}	P_{noise}		
20	80	5,564	-100	11,763	-12,934	5,514	-12,010	17.524	8,098
40	60	5,586	-100	7,986	-12,934	5,536	-10,978	16.514	8,435
50	50	5,593	-100	6,093	-12,934	5,543	-10,189	15.732	8,79
60	40	5,570	-100	4,171	-12,934	5,521	-9,196	14.717	8,604
80	20	5,591	-100	0,392	-12,934	5,542	-6,626	12.168	8,23
86	14	5,628	-100	-0,711	-12,934	5,579	-5,727	11.306	7,807

Отже, навіть при однаковому $G_1 = G_2 = 10$ дБ – місце встановлення першого EDFA має критичний вплив на OSNR та Q. Це означає, що існує оптимальна відстань до першого підсилювача, за якої баланс між рівнем сигналу та накопиченими шумами забезпечує найкращу якість передачі. При занадто короткій або надто великій відстані спостерігається деградація сигналу – у першому випадку через надмірне підсилення і нелінійні ефекти, у другому через надмірні втрати до підсилення. Отже, для оптимальної роботи системи доцільно розмішувати перший підсилювач приблизно на відстані ≈ 50 – 60% від загальної довжини ділянки.

Другий EDFA повинен мати достатній запас, щоб лише добрати втрати після DCF (яка має велику вставну втрату).

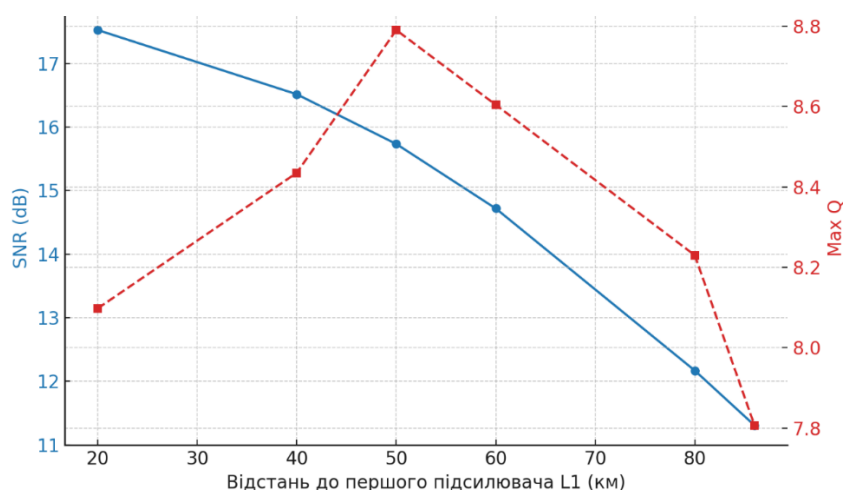


Рис. 5 Залежність SNR та Q-фактора від точки розміщення першого EDFA

Експериментальні результати в межах регенераційної ділянки однозначно показують дві взаємопов'язані закономірності:

- акумуляція ASE робить небажаним концентрування підсилення в першому каскаді;
- положення першого EDFA істотно впливає на ефективність системи, навіть при однаковому сумарному підсиленні.

Крім цього було проведено моделювання поведінки системи для довгих магістральних ліній до 1000 км (табл. 4).

Таблиця 4 – Показники якості системи для 200 і 300 км

L_1 , км	L_2 , км	L_3 , км	G_1 , дБ	G_2 , дБ	P_{signal} , дБм	P_{noise} , дБм	SNR, дБ	Max Q
50	36	13	10	10	5,543	-10,189	15.732	8,79
100	72	26	10	10	-14,005	-12,569	-1.436	0
100	72	26	15	15	-3,926	-6,775	2.849	6,74
100	72	26	20	20	5,993	-0,073	6.066	6,78
100	72	26	25	25	16,001	7,969	8.032	8,59
150	108	39	10	10	-33,799	-12,898	-20.901	0
150	108	39	15	15	-23,812	-7,727	-16.085	0
150	108	39	20	20	-13,770	-2,465	-11.305	0
150	108	39	30	30	6,289	9,808	-3.519	4,5

При збільшенні довжини лінії удвічі стає очевидно, що режим підсилення 10+10 дБ, який був прийнятно оптимальним на коротшій ділянці (~100 км), стає повністю недостатнім – кінцевий рівень сигналу падає нижче шумового дна, і Q-фактор практично деградує до нуля. Це означає, що при подвоєнні довжини оптичної траси сумарні втрати зростають настільки, що попередній баланс підсилення перестає бути життєздатним. Подальше збільшення загального покращує відношення сигнал/шум і повертає систему у робочий режим, але лише при дуже великій величині $G \approx 25+25$ дБ система знову виходить у зону високих значень Q ($\approx 8,6$), які є порівняними з короткою лінією. Таким чином, при збільшенні довжини лінії у 2 рази потрібно суттєво збільшувати доступне підсилення обох EDFA, причому пропорційно до сумарних втрат, інакше OSNR на виході обвалюється. Водночас слід враховувати, що практично для стандартних EDFA верхня межа робочого підсилення зазвичай не перевищує ~25–30 дБ на каскад, тому збільшувати G безкінечно неможливо – після цієї межі підсилювач переходить у насичення, зростає ASE і нелінійні ефекти, і OSNR починає погіршуватись.

Можна зробити висновок, що оптимальний режим роботи EDFA існує лише для певної довжини; при збільшенні дистанції необхідно не тільки змінювати коефіцієнт підсилення, але й змінювати архітектуру лінії.

Для моделювання такого режиму використаємо блок Loop Control, який повторює зазначену конфігурацію волоконної ділянки кілька разів. Це дозволяє моделювати передавання сигналу на великі відстані, наприклад, до 1000 км, без необхідності фізичного дублювання однакових елементів у схемі (рис. 6).

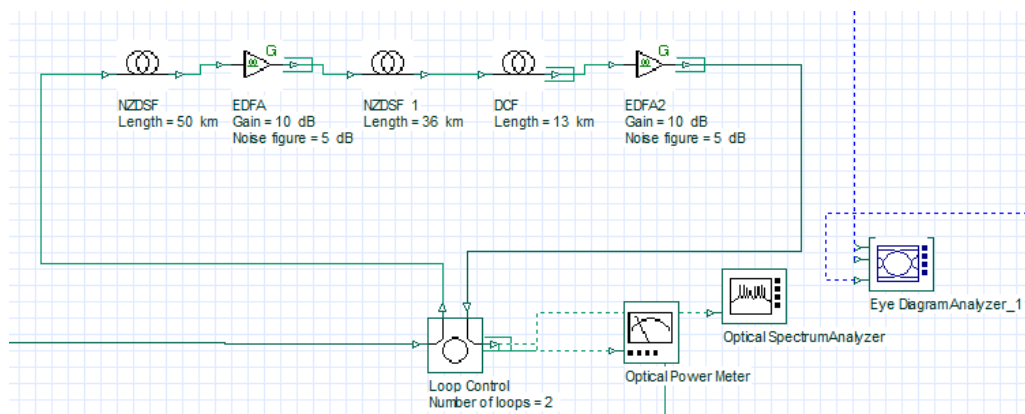


Рис. 6 Схема моделювання магістральних оптоволоконних ліній

При збільшенні кількості циклів (тобто ефективної довжини лінії) вихідний рівень сигналу дещо зростає за рахунок сумарного підсилення, але при цьому рівень шуму зростає значно швидше – відповідно SNR та Q-фактор спочатку покращуються (пікове значення спостерігається приблизно при 3–4 циклах), а далі стрімко погіршуються (табл.5, рис.7). Таким чином, система «виграє» на перших кількох прогонах за рахунок покращення балансу сигнал/шум після компенсації втрат, але після певної довжини шумова компонента стає домінуючою, і лінія переходить у режим деградації – різко росте BER, падає Q, а SNR втрачає стабільність. Отже, існує практична межа ефективної довжини лінії при заданій схемі підсилення без додаткових заходів регенерації, і подальше

збільшення дистанції потребує не просто підсилення, а повної О-Е-О регенерації або принаймні вставки додаткових EDFA/ROADM із оптимізованим шумовим бюджетом.

Таблиця 5 – Магістральні лінії до 1000 км.

Кількість циклів	Загальна довжина волокна, км	P_{signal} , дБм	P_{noise} , дБм	SNR	Max. Q	Min. BER
1	100	5,806	-10,064	15.870	7.881	$1.61126e^{-15}$
2	200	6,056	-6,945	13.001	8,59	$1.47155e^{-14}$
3	300	6,261	-5,074	11.335	10.3343	$2.12498e^{-25}$
4	400	6,463	-3,714	10.177	9.84607	$2.65435e^{-23}$
5	500	6,369	-2,632	9.001	9.20468	$1.4546e^{-20}$
6	600	6,876	-1,720	8.596	7.16373	$3.43601e^{-13}$
7	700	7,096	-0,946	8.042	5.36278	$3.62788e^{-08}$
8	800	7,295	-0,252	7.547	5.25961	$7.03936e^{-08}$
9	900	7,535	0,374	7.161	4.43944	$3.96226e^{-06}$
10	1000	7,745	0,948	6.797	3.7639	$8.20616e^{-05}$

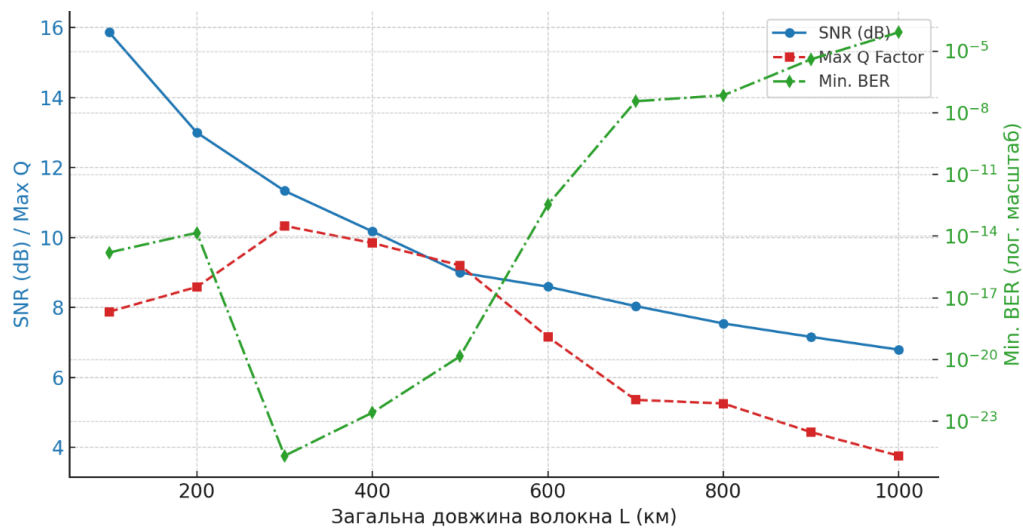


Рис. 7 Залежність SNR та Q-фактора від довжини лінії

В результаті аналізу отриманих результатів запропоновано формалізований алгоритм визначення кількості підсилювачів та їх оптимального розподілу підсилення (рис. 8).

Запропонований алгоритм ґрунтується на комбінації енергетичного бюджетування, моделювання шумової акумуляції ASE та контролю нелінійності фази у волокні, що дозволяє врахувати ключові фізичні обмеження WDM-лінії без проведення натурних експериментів. На відміну від класичної методики використання регенераційних ділянок (спанів) з фіксованою довжиною або підходів з рівномірним G-розподілом, ця процедура виконує адаптивний перерозподіл підсилення між етапами лінії з урахуванням взаємодії між накопиченням ASE та нелінійною фазою, що поліпшує OSNR за рахунок усунення перенасичення перших підсилювачів.

На першому кроці формується енергетичний бюджет, що базується на сумарних лінійних втратах основного та компенсаційного волокна, і визначається мінімальна необхідна кількість підсилювачів, виходячи з максимально доступного коефіцієнта підсилення та необхідного рівня потужності на приймачі. Це дозволяє отримати нижню оцінку числа EDFA у лінії.

На другому етапі здійснюється початкова розстановка спанів рівномірно по довжині траси, що служить базовою стартовою конфігурацією для подальшої оптимізації.

Третій крок передбачає для кожної кандидатної конфігурації послідовний розрахунок сигналу та шуму на виході кожного EDFA з урахуванням індивідуальних втрат спанів, ітеративне обчислення ASE на кожному каскаді та транспортування шуму до приймача. На основі цих даних визначається OSNR приймача, оцінюється відповідність мінімальним вимогам, і паралельно контролюється нелінійний фазовий набір на кожному інтервалі. Якщо хоча б одне обмеження не

виконується, здійснюється корекція конфігурації – збільшення кількості підсилювачів, перерозподіл коефіцієнтів підсилення на користь кінцевих каскадів.

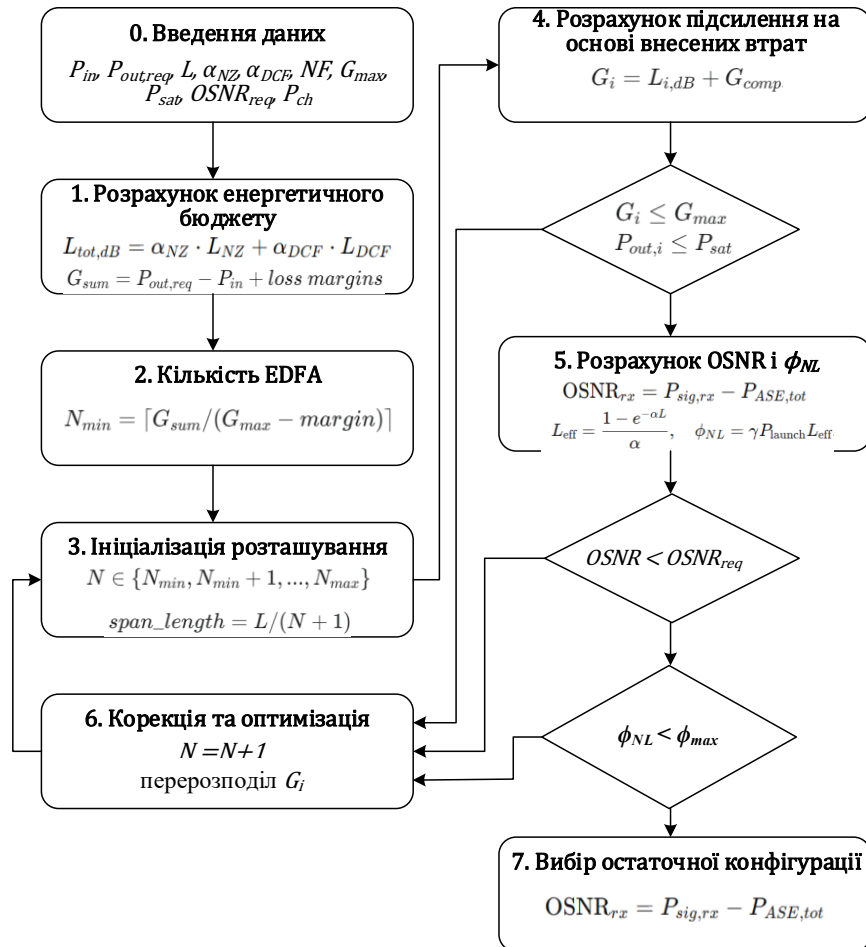


Рис. 8 Алгоритм проектування оптичної лінії з підсиленням EDFA

На завершальному етапі обирається конфігурація, яка забезпечує мінімальну кількість підсилювачів та мінімальні сумарні енергетичні витрати за умови виконання критеріїв OSNR та допустимого рівня нелінійних ефектів. Рекомендується додавати 1–2 дБ OSNR-запас для забезпечення стійкості до зміни умов експлуатації, таких як температурний дрейф, старіння компонентів та коливання коефіцієнта поглинання DCF. Саме такий підхід, у поєднанні з точним спектральним моделюванням в OptiSystem, формує практично застосовний алгоритм для проектування магістральних WDM-ліній довжиною у діапазоні 10–1000 км з передбачуваною якістю передачі та високою адаптивністю до конкретних технологічних вимог.

Результати моделювання демонструють можливість практичної інтеграції запропонованої методики у процес автоматизованого проектування магістральних оптичних систем, що підтверджує її прикладну значущість для сучасних телекомунікаційних мереж.

Висновки. У статті запропоновано формалізований підхід до вибору кількості, розміщення та параметрів оптичних підсилювачів у волоконно-оптичних WDM-лініях передачі з використанням середовища моделювання OptiSystem. У роботі створено детальну модель восьмиканальної WDM-системи, яка відтворює реальні процеси поширення сигналу, компенсації дисперсії та підсилення. На основі серії експериментів показано вплив коефіцієнтів підсилення та положення EDFA на показники SNR, Q-фактор і BER.

Результати моделювання довели, що надмірне підсилення першого каскаду призводить до накопичення шуму ASE та зниження якості сигналу, тоді як оптимальний розподіл підсилення між каскадами та правильний вибір місця розташування підсилювачів (приблизно на 50–60% довжини траси) забезпечують максимальний Q-фактор. Для довших ліній (>200 км) встановлено межу ефективного підсилення, після якої спостерігається деградація OSNR, що потребує введення додаткових EDFA або регенераційних вузлів.

Запропонований алгоритм поєднує розрахунок енергетичного бюджету, контроль накопичення ASE і нелінійної фази, забезпечуючи адаптивний вибір кількості підсилювачів та їх параметрів. Такий підхід підвищує ефективність проектування WDM-магістралей, мінімізує кількість компонентів і зменшує енергоспоживання без погіршення якості передавання.

Список бібліографічного опису

1. Ibrahim M., Sticca G. S., Musumeci F., Castoldi A., Pastorelli R., Tornatore M. Selective Hybrid EDFA/Raman Amplifier Placement to Avoid Lightpath Degradation in (C+L) Networks. *European Conference on Optical Communication (ECOC)*, 2022. URL: https://re.public.polimi.it/retrieve/01cebc99-c2a1-45ac-bf95-1d58a49732ea/ECOC_2022_GA_Raman_v1.pdf
2. Pedro J., Costa N. Optimized Hybrid Raman/EDFA Amplifier Placement for DWDM Mesh Networks. *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 9, pp. 1552-1561, 1 May1, 2018. DOI: 10.1109/JLT.2017.2783678.
3. Ebrahimzadeh A., Rahbar A., Alizadeh B. Cost Efficient Amplifier Placement and Gain Adjustment in All-Optical Networks: A Noise-Minimizing Approach. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 127 (3), 2016. DOI: 10.1016/j.ijleo.2016.09.029.
4. Lundberg L., Andrekson P., Karlsson M. Power Consumption Analysis of Hybrid EDFA/Raman Amplifiers in Long-Haul Transmission Systems. *Journal of Lightwave Technology*. PP. 1-1. 2017. DOI: 10.1109/JLT.2017.2668768.
5. Fei Y., Fumagalli A., Garrich Alabarce M., Sarti B., Moura U., Guerrero Gonzalez N., De Oliveira J. Estimating EDFA output power with an efficient numerical modeling framework. *IEEE ICC 2015 - Optical Networks and Systems Symposium*. Vol. 1, pp. 5222 – 5227, 2015. DOI: 10.1109/ICC.2015.7249153.
6. Kareem A. H. A., Murdas I. A. Performance evaluation of fiber impairment mitigation for high capacity communication systems using optical compensation method. *Results in Optics*, Volume 11, 100399, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rio.2023.100399>.
7. Dhaam H. Z. Optimization of 16-WDM channel 40 Gbps optical link using OptiSystem. *BIO Web of Conferences*, 00084, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1051/bioconf/20249700084>.
8. Ivaniga T., Ivaniga P. The In-Line placement of EDFA in CWDM/DWDM system for BER comparison at 1540 nm. *Journal of Engineering Science and Technology Review*. Vol. 12, pp. 1-7, 2019. DOI: 10.25103/jestr.125.01.
9. Uzunidis D., Matrakidis C., Stavdas A. Optimizing power, capacity, transmission reach and amplifier placement in coherent optical systems using a physical layer model. *PCI 2016*, 2016. DOI: 10.1145/3003733.3003755.
10. Durak F. Improving DWDM system performance through EDFA and DCF strategies. *Journal of Scientific Reports-A*, pp. 38-45. 2025. DOI: 10.59313/jsr-a.1602849.
11. Zablotskiy V., Selepyna Y., Lyshuk V., Yakymchuk N., Tkachuk A. Method for evaluation quality parameters of telecommunications services. *Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Srodowiska*, 12(2), 2022, pp. 30–33. DOI: <https://doi.org/10.35784/iapgos.2918>.

References

1. Ibrahim M., Sticca G. S., Musumeci F., Castoldi A., Pastorelli R., Tornatore M. Selective Hybrid EDFA/Raman Amplifier Placement to Avoid Lightpath Degradation in (C+L) Networks. *European Conference on Optical Communication (ECOC)*, 2022. URL: https://re.public.polimi.it/retrieve/01cebc99-c2a1-45ac-bf95-1d58a49732ea/ECOC_2022_GA_Raman_v1.pdf
2. Pedro J., Costa N. Optimized Hybrid Raman/EDFA Amplifier Placement for DWDM Mesh Networks. *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 9, pp. 1552-1561, 1 May1, 2018. DOI: 10.1109/JLT.2017.2783678.
3. Ebrahimzadeh A., Rahbar A., Alizadeh B. Cost Efficient Amplifier Placement and Gain Adjustment in All-Optical Networks: A Noise-Minimizing Approach. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 127 (3), 2016. DOI: 10.1016/j.ijleo.2016.09.029.
4. Lundberg L., Andrekson P., Karlsson M. Power Consumption Analysis of Hybrid EDFA/Raman Amplifiers in Long-Haul Transmission Systems. *Journal of Lightwave Technology*. PP. 1-1. 2017. DOI: 10.1109/JLT.2017.2668768.
5. Fei Y., Fumagalli A., Garrich Alabarce M., Sarti B., Moura U., Guerrero Gonzalez N., De Oliveira J. Estimating EDFA output power with an efficient numerical modeling framework. *IEEE ICC 2015 - Optical Networks and Systems Symposium*. Vol. 1, pp. 5222 – 5227, 2015. DOI: 10.1109/ICC.2015.7249153.
6. Kareem A. H. A., Murdas I. A. Performance evaluation of fiber impairment mitigation for high capacity communication systems using optical compensation method. *Results in Optics*, Volume 11, 100399, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rio.2023.100399>.
7. Dhaam H. Z. Optimization of 16-WDM channel 40 Gbps optical link using OptiSystem. *BIO Web of Conferences*, 00084, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1051/bioconf/20249700084>.
8. Ivaniga T., Ivaniga P. The In-Line placement of EDFA in CWDM/DWDM system for BER comparison at 1540 nm. *Journal of Engineering Science and Technology Review*. Vol. 12, pp. 1-7, 2019. DOI: 10.25103/jestr.125.01.
9. Uzunidis D., Matrakidis C., Stavdas A. Optimizing power, capacity, transmission reach and amplifier placement in coherent optical systems using a physical layer model. *PCI 2016*, 2016. DOI: 10.1145/3003733.3003755.
10. Durak F. Improving DWDM system performance through EDFA and DCF strategies. *Journal of Scientific Reports-A*, pp. 38-45. 2025. DOI: 10.59313/jsr-a.1602849.
11. Zablotskiy V., Selepyna Y., Lyshuk V., Yakymchuk N., Tkachuk A. Method for evaluation quality parameters of telecommunications services. *Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Srodowiska*, 12(2), 2022, pp. 30–33. DOI: <https://doi.org/10.35784/iapgos.2918>.