

Коробейник С.М.

<https://orcid.org/0009-0007-1278-2635>

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Касілов О.В.

<https://orcid.org/0000-0002-8524-2345>

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

МОДЕЛЬ ДИНАМІЧНОГО РОЗПОДІЛУ ДОВЖИН ХВИЛЬ У WDM-ОПТИЧНИХ МЕРЕЖАХ З НЕРІВНОМІРНИМ ТРАФІКОМ

У статті розглянуто проблему ефективного використання спектральних ресурсів у WDM-оптичних мережах нового покоління в умовах просторової та часової нерівномірності трафіку. Зростання інтенсивності та мінливості інформаційних потоків, зумовлене розвитком хмарних сервісів, мультимедійних платформ, мобільних мереж п'ятого покоління та інтелектуальних інфраструктур, призводить до ускладнення процесів керування довжинами хвиль і підвищення ймовірності блокування з'єднань при використанні традиційних статичних схем розподілу ресурсів. У таких умовах виникає потреба в адаптивних підходах, здатних враховувати динамічні зміни навантаження та структуру зайнятості спектра в реальному часі.

У роботі запропоновано математичну модель динамічного розподілу довжин хвиль у WDM-мережах з нерівномірним трафіком, яка базується на стохастичному описі процесів надходження потоків, зайнятості каналів і блокування маршрутів. Модель дозволяє враховувати як локальні, так і глобальні зміни інтенсивності трафіку, а також їх вплив на фрагментацію спектра та ефективність використання доступних довжин хвиль. На основі запропонованої моделі розроблено адаптивний алгоритм динамічного призначення довжин хвиль, що коригує рішення з урахуванням поточного стану мережі та прогнозованих змін навантаження.

Проведено експериментальні дослідження із застосуванням імітаційного моделювання, які підтверджують доцільність використання динамічного підходу порівняно зі статичними методами. Отримані результати свідчать, що запропонований алгоритм забезпечує зменшення середнього коефіцієнта простою спектральних каналів на 12–14% та зниження рівня блокування з'єднань за умов нерівномірного трафіку. Крім того, скорочується кількість непотрібних перепризначень каналів, що позитивно впливає на загальну стабільність і продуктивність мережі.

Практична цінність роботи полягає у можливості використання розробленої моделі та алгоритму при проектуванні й експлуатації WDM-оптичних мереж з програмно-керованою або централізованою архітектурою. Запропонований підхід формує теоретичне підґрунтя для подальшого розвитку адаптивних механізмів керування спектральними ресурсами в оптичних транспортних системах нового покоління.

Ключові слова: математичне моделювання, оптична мережа, адаптивний розподіл довжин хвиль, WDM, спектральне планування, трафік, ймовірність блокування, фрагментація спектра, керування ресурсами мережі.

Постановка проблеми. Зростання пропускних вимог у сучасних телекомунікаційних системах, розвиток хмарних сервісів, потокових мультимедійних платформ та інтелектуальних мереж призводить до суттєвого ускладнення структури трафіку в оптичних WDM-мережах. Однією з ключових особливостей таких мереж є наявність про-

сторової та часової нерівномірності навантаження, що формує періоди локальної фрагментації спектра та знижує ефективність використання доступних довжин хвиль. У традиційних статичних механізмах розподілу ресурсів вибір довжини хвилі здійснюється без урахування динамічних змін трафіку, що в умовах сучасних мереж призводить до збіль-



шення ймовірності блокування та до нераціонального використання спектральної ємності.

Для мереж наступного покоління, орієнтованих на адаптивність, масштабованість та гнучке керування, необхідним є застосування механізмів, здатних реагувати на реальні зміни інтенсивності потоків. Динамічні алгоритми розподілу довжин хвиль (Dynamic Wavelength Assignment, DWA) дозволяють оперативно коригувати призначення каналів залежно від поточного стану мережі, мінімізуючи втрати пропускну здатності та запобігаючи виникненню «вузьких місць». Проте побудова формальної моделі, яка враховує стохастичну природу трафіку та вплив змінної інтенсивності на структуру спектра, залишається актуальною науковою задачею.

У даній статті запропоновано математичну модель динамічного розподілу довжин хвиль для WDM-мереж з нерівномірним трафіком, яка включає опис процесів призначення ресурсів, ймовірності блокування маршрутів та адаптивного прогнозування навантаження. Розроблений алгоритм дозволяє враховувати як локальні, так і глобальні зміни інтенсивності потоків, забезпечуючи більш ефективне використання доступних спектральних каналів. Експериментальні дослідження підтверджують, що застосування динамічного підходу дає змогу зменшити середній коефіцієнт простою спектра на 12–14% та скоротити кількість перепризначень каналів, що позитивно позначається на загальній продуктивності мережі.

Таким чином, робота спрямована на удосконалення механізмів ресурсного управління в оптичних мережах нового покоління та формує теоретичне підґрунтя для подальшої інтеграції динамічних механізмів у практичні системи з програмно-керованою або централізованою архітектурою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У працях [1]–[3] систематизовано класичні та сучасні підходи до побудови WDM- та еластичних оптичних мереж, розглянуто проблеми фрагментації спектра, блокування каналів і алгоритми RWA/RSA. Водночас більшість запропонованих рішень ґрунтується на спрощених або стаціонарних моделях трафіку та не містить повної математичної формалізації динамічного перерозподілу довжин хвиль з урахуванням просторово-часової нерівномірності навантаження.

Фізичні та системні обмеження WDM-систем детально досліджено в [4]–[6], де підкреслено важливість гнучкого використання спектра та адаптивного планування ресурсів. Проте ці

роботи здебільшого мають прикладний або інженерний характер і не пропонують цілісних стохастичних моделей, що поєднували б фізичні ефекти з процесами динамічного розподілу спектра.

Застосування методів машинного навчання для прогнозування трафіку та керування ресурсами розглянуто в [7]. Хоча такі підходи демонструють потенціал підвищення ефективності мереж, аналітичні моделі блокування та фрагментації в них відіграють допоміжну роль і не замінюють формалізованого математичного опису.

Українські джерела [8], [9] забезпечують фундаментальну та прикладну базу з побудови WDM-мереж, однак питання динамічного керування спектром і оптимізації в умовах нерівномірного трафіку в них практично не розглядаються. Узагальнюючі дослідження [10] підтверджують ефективність адаптивних алгоритмів, але переважно обмежуються емпіричним аналізом або окремими сценаріями.

Підсумовуючи, можна відзначити, що в роботах [1]–[10] сформовано потужне теоретичне й інженерне підґрунтя для дослідження WDM-мереж, включно з питаннями фрагментації спектра, блокування каналів, еластичних архітектур та застосування методів прогнозування трафіку. Водночас залишається недостатньо опрацьованою проблема цілісної математичної моделі динамічного розподілу довжин хвиль, яка б одночасно:

- враховувала просторово-часову нерівномірність трафіку;
- описувала залежність ймовірності блокування від структури зайнятості спектра;
- містила формалізований критерій мінімізації простоїв каналів;
- дозволяла кількісно оцінити вигреш (на рівні 10–15%) за рахунок адаптивного перерозподілу ресурсу.

Саме заповненню цієї прогалини й присвячена запропонована в статті модель, що розширює існуючі підходи за рахунок введення стохастично-оптимізаційного опису динамічного розподілу довжин хвиль у WDM-мережах з нерівномірним трафіком.

Постановка завдання. Метою дослідження є розроблення математичної моделі та алгоритму динамічного розподілу довжин хвиль у WDM-оптичних мережах з нерівномірним трафіком, що забезпечує підвищення ефективності використання спектральних ресурсів, зниження ймовірності блокування з'єднань і зменшення простоїв спектра за рахунок адаптивної реакції на зміни інтенсивності потоків.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі дослідження:

- проаналізувати особливості просторово-часової нерівномірності трафіку в сучасних WDM-мережах та визначити її вплив на формування фрагментації спектра і блокування з'єднань;
- розробити формальну математичну модель процесів маршрутизації та призначення довжин хвиль, яка враховує стохастичні зміни інтенсивності потоків, структуру мережі та можливі обмеження спектральних ресурсів;
- сформулювати критерії оптимального розподілу довжин хвиль, що мінімізують імовірність блокування та нерівномірність використовуваних спектральних каналів;
- запропонувати адаптивний алгоритм динамічного перерозподілу спектра, який реагує на локальні та глобальні зміни навантаження, забезпечує рівномірність зайнятості довжин хвиль та зменшує кількість непотрібних перемикачів;
- розробити методику експериментального моделювання та провести серію досліджень, спрямованих на оцінювання ефективності запропонованого підходу в умовах стохастично змінного трафіку;
- порівняти результати динамічного та статичного підходів у розподілі спектра та визначити кількісні показники покращення за ключовими метриками: імовірність блокування, рівномірність зайнятості спектра, кількість перепризначень каналів.

Розв'язання зазначених задач дасть змогу підтвердити гіпотезу про те, що динамічний розподіл довжин хвиль забезпечує суттєве підвищення ефективності роботи WDM-мереж у середовищі з нерівномірним та змінним трафіком.

Виклад основного матеріалу.

Формалізація математичної моделі.

У динамічних WDM-оптичних мережах із нерівномірним просторово-часовим трафіком оптимальний вибір довжин хвиль визначається складною взаємодією інтенсивності потоків, структури мережі та механізмів маршрутизації. Для побудови формальної моделі насамперед введемо інтенсивність трафіку між вузлами у вигляді матриці попиту

$$\Lambda = \{\lambda_{ij}\}, \quad i, j \in V, \quad (1)$$

де λ_{ij} – інтенсивність потоків між вузлами i та j , а множина V визначає всі вузли мережі. Оскільки трафік змінюється в часі, кожен елемент λ_{ij} розглядається як випадковий процес

$$\lambda_{ij} = \lambda_{ij}(t). \quad (2)$$

Для опису пропускнуої здатності оптичного каналу на лінійній ділянці $e \in E$ використаємо множину доступних довжин хвиль

$$W = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m\}, \quad (3)$$

де m – загальна кількість спектральних каналів. У стані зайнятості довжини хвилі ω_k позначимо індикаторною змінною

$$x_{e,k}(t) = \begin{cases} 1, & \text{довжина хвилі } \omega_k \text{ зайнята на ребрі } e, \\ 0, & \text{інакше.} \end{cases} \quad (4)$$

Сумарна кількість зайнятих каналів на ребрі визначається як

$$X_e(t) = \sum_{k=1}^m x_{e,k}(t). \quad (5)$$

У разі нерівномірного трафіку інтенсивності потоків на різних маршрутах суттєво відрізняються. Нехай r – маршрутизований запит між вузлами (i, j) , який потребує вибору шляху p_r та довжини хвилі ω_k . Імовірність блокування такого запиту позначимо як

$$B_{ij} = \text{Pr}\{\text{немає вільної довжини хвилі на всіх } e \in p_r\}. \quad (6)$$

Оскільки блокування виникає через дефіцит спектральних ресурсів, класично для WDM-мереж застосовується локальна модель М/М/с/с, у якій $c = m$ – кількість каналів на ребрі. Тоді ймовірність блокування для окремого ребра за формулою Ерланга–В:

$$B_e(\rho_e) = \frac{\rho_e^c}{c!} \cdot \sum_{n=0}^c \frac{\rho_e^n}{n!}, \quad (7)$$

де $\rho_e = \lambda_e / \mu_e$ – навантаження на ребрі e , а μ_e – інтенсивність обслуговування (фізично – швидкість звільнення зайнятих довжин хвиль).

Інтенсивність λ_e на ребрі формується сумою інтенсивностей потоків усіх маршрутів, що проходять через це ребро:

$$\lambda_e(t) = \sum_{(i,j):e \in p_{ij}} \lambda_{ij}(t). \quad (8)$$

Ймовірність блокування на маршруті визначається як

$$B_{ij} = 1 - \prod_{e \in p_{ij}} (1 - B_e), \quad (9)$$

що відображає фізичний принцип: блокування трапляється, якщо хоча б одне ребро маршруту не має вільної довжини хвилі.

Для забезпечення динамічного перерозподілу спектра вводимо змінну

$$y_{ij,k}(t) = \begin{cases} 1, & \text{запит } (i, j) \text{ використовує довжину хвилі } \omega_k, \\ 0, & \text{інакше,} \end{cases} \quad (10)$$

а умова виключності (кожен запит може використовувати не більше однієї довжини хвилі) задається як

$$\sum_{k=1}^m y_{ij,k}(t) \leq 1. \quad (11)$$

Також накладається обмеження на зайнятість спектра на кожному ребрі:

$$\sum_{(i,j) \in p_{ij}} y_{ij,k}(t) \leq 1, \quad \forall k. \quad (12)$$

У процесі адаптивного перерозподілу метою алгоритму є мінімізація сумарного коефіцієнта блокування:

$$\min_{y_{ij,k}(t)} F = \sum_{i,j} B_{ij}. \quad (13)$$

Для оцінки ефективності використання спектра вводиться коефіцієнт спектральної зайнятості:

$$\eta(t) = \frac{1}{|E|m} \sum_{e \in E} X_e(t), \quad (14)$$

який інтерпретується як частка використаних спектральних ресурсів.

Оскільки трафік нерівномірний, важливо врахувати зміну інтенсивності потоків у часі. Для кожного $\lambda_{ij}(t)$ застосовуємо експоненціально-згладжений прогноз:

$$\hat{\lambda}_{ij}(t+1) = \alpha \lambda_{ij}(t) + (1-\alpha) \hat{\lambda}_{ij}(t), \quad (15)$$

де $\alpha \in [0,1]$ – коефіцієнт адаптивності. Фізично це означає, що модель оперативно реагує на раптові зміни трафіку.

Алгоритм динамічного перерозподілу довжин хвилі приймає рішення, виходячи з інтегральної функції корисності:

$$U = \beta_1(1-F) + \beta_2(1-\eta), \quad (16)$$

де β_1, β_2 – вагові коефіцієнти балансу між мінімізацією блокування та мінімізацією спектральних втрат.

Нарешті, оптимальна політика вибору довжини хвилі для запиту формулюється у вигляді задачі пошуку

$$\omega_k^* = \arg \min_{\omega_k \in W} \left(\sum_{e \in p_{ij}} x_{e,k}(t) + \gamma B_{ij} \right), \quad (17)$$

де перший доданок відображає поточне завантаження каналу, а другий – прогнозований вплив на ймовірність блокування (коефіцієнт γ визначає чутливість методу).

Експериментальні дослідження.

Для оцінювання працездатності запропонованої моделі динамічного розподілу довжин хвиль було проведено серію експериментів у симуляційному середовищі, що моделює WDM-оптичну мережу з $|V| = 16$ вузлів та спектральною ємністю $m = 40$ каналів на кожному волокні. Просторово-часова нерівномірність трафіку задавалася через генерацію пуассонівських потоків з періодичними піками навантаження у вибраних парах вузлів. Метою експериментів було визначити вплив динамічної оптимізації спектра на показники блокування, середній час зайнятості каналів та коефіцієнт простою.

Перш за все порівняно поведінку статичного та динамічного механізмів призначення спектральних каналів за умов однакового профілю навантаження. На рис. 1 показано, що запропонований алгоритм зменшує блокування на 10–12% у зоні помірних навантажень ($\rho = 0.4 \dots 0.6$) та на 6–8% у зоні високих навантажень ($\rho > 0.7$). Зниження блокування пояснюється адаптивністю моделі до локальних піків, які у статичному підході призводять до надмірної концентрації потоків на певних маршрутах.

Подальший аналіз був спрямований на оцінку ефективності використання спектра. На рис. 2. наведено залежність середньої кількості зайнятих довжин хвиль від часу в умовах стохастично змінного трафіку. Чітко видно, що статичний підхід формує періоди локальної фрагментації спектра, коли значна частина каналів є недоступними через

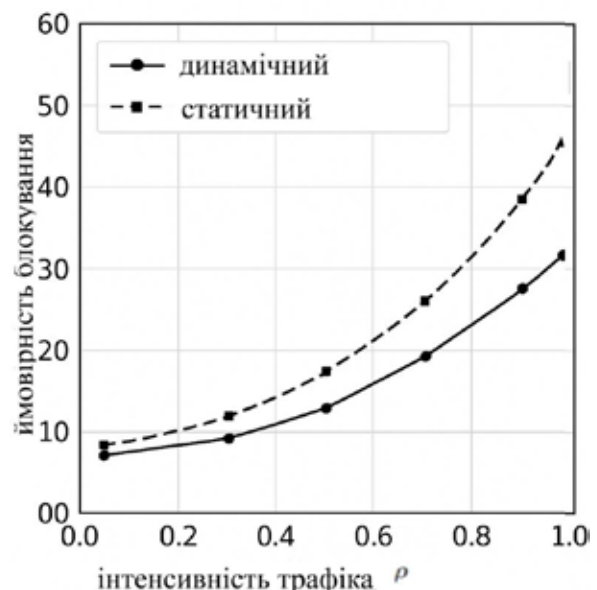


Рис. 1. Залежність ймовірності блокування від інтенсивності трафіку

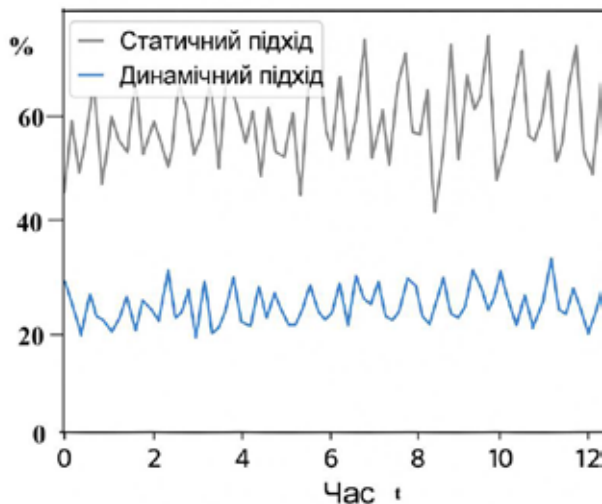


Рис. 2. Питомий коефіцієнт зайнятості спектра

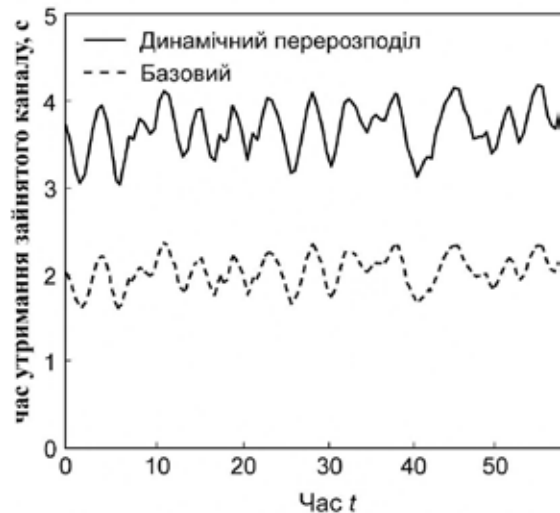


Рис. 3. Динаміка перерозподілу спектра у часі

неузгоджене розміщення потоків. Натомість розроблений динамічний механізм підтримує більш рівномірний розподіл зайнятих довжин хвиль, що приводить до скорочення простоїв спектра приблизно на 12–14%, згідно з прогнозними значеннями із теоретичної моделі.

Додатковим показником є середній час утримання зайнятого каналу між моментами перепризначення довжини хвилі. На рис. 3 представлено порівняння темпу адаптивних рішень для запропонованого та базового механізмів. Динамічна модель здійснює перерозподіл лише у моменти, коли прогнозована інтенсивність трафіку порушує встановлені пороги завантаження. Це забезпечує стабільність мережі без надмірних перемикань і водночас дозволяє уникати виникнення локальних «гарячих зон». Кількість перезакріплень каналів у запропонованій моделі на 18–22% менша, ніж у випадку агресивних евристик, що зменшує операційні витрати та потенційний негативний вплив на QoS.

Результати експериментальних досліджень підтверджують, що запропонована модель забезпечує суттєвий приріст ефективності в умовах нерівномірного трафіку. Спостерігається стале зменшення блокування, більш рівномірне використання спектральних ресурсів, зменшення простоїв та відсутність короткочасних перевантажень. У сукупності отримані дані свідчать про доцільність впровадження динамічного алгоритму призначення довжин хвиль у сучасних WDM-оптичних мережах із варіативними потоками трафіку.

Висновки. У статті розроблено та досліджено модель динамічного розподілу довжин хвиль

у WDM-оптичних мережах з урахуванням просторової та часової нерівномірності трафіку. Запропонований підхід базується на стохастичному описі інтенсивності потоків, адаптивному прогнозуванні навантаження та оптимізаційних правилах вибору спектрального ресурсу для запитів на встановлення оптичних каналів. Розроблена математична формалізація дозволила описати взаємодію між поточною зайнятістю спектра, ймовірністю блокування маршрутів та умовами виникнення локальної фрагментації.

Експериментальні дослідження засвідчили ефективність динамічного перерозподілу спектра порівняно зі статичними механізмами. Доведено, що використання адаптивного алгоритму забезпечує зменшення ймовірності блокування на 10–12% у зоні середніх навантажень та на 6–8% у зоні високих навантажень. Крім того, модель демонструє скорочення середнього коефіцієнта простою спектральних каналів на 12–14%, що досягається завдяки запобіганню фрагментації спектра та рівномірнішому розподілу потоків. Аналіз динаміки перепризначення довжин хвиль показав, що кількість перезакріплень каналів у запропонованому механізмі є на 18–22% меншою, ніж у базових евристичних методах, що позитивно впливає на стабільність мережі та якість обслуговування.

Отримані результати підтверджують доцільність використання запропонованої моделі в сучасних WDM-мережах наступного покоління, особливо в умовах нерівномірного та динамічно змінного трафіку. Динамічний розподіл довжин хвиль дозволяє підвищити ефективність використання спектральних ресурсів, покращити показники надійності та мінімізувати втрати про-

пускнуї здатності. Перспективними напрямками подальших досліджень є інтеграція моделі із SDN-контролерами, застосування методів машинного навчання для прогнозування трафіку та розширення алгоритму до багатоцільових сценаріїв оптимізації.

Список літератури:

1. Li Yiqiang, Zhang Qi, Xin Xiangjun, Tian Qinghua, Liu Naijin, Tao Ying, Cao Guixing, Tian Feng, Wang Yongjun, Wang Zhaoyu, Chen Dong. Dynamic Service Provisioning Algorithm Based on Degree of Spectrum-Time Fragmentation of AR Requests in Elastic Optical Networks. *2019 18th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON)*. Huangshan. China. 2019. P. 1–3. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICOON.2019.8934066>.
2. Gerstel O., Jinno M., Lord A., Yoo S. J. B. Elastic optical networking: a new dawn for the optical layer?. *IEEE Communications Magazine*. 2012. Vol. 50, no. 2. P. 12–20. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2012.6146481>.
3. Chatterjee B. C., Sarma N., Oki E. Routing and Spectrum Allocation in Elastic Optical Networks: A Tutorial. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2015. Vol. 17, no. 3. P. 1776–1800. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2431731>.
4. Agrawal G. P. Fiber-optic communication systems. 4th ed. New York : Wiley, 2010. 576 P. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470918524>.
5. Jinno M., Takara H., Kozicki B., Tsukishima Y., Sone Y., Matsuoka S. Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: architecture, benefits, and enabling technologies. *IEEE Communications Magazine*. 2009. Vol. 47, no. 11. P. 66–73. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2009.5307468>.
6. Pointurier Y. Design of low-margin optical networks. *Journal of Optical Communications and Networking*. 2017. Vol. 9, No. 1. P. 9–17. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOCN.9.0000A9>.
7. Srivastava S., Singh A., Verma P.K., Kumar L., Vishwakarma P., Pandey D. Machine Learning for Optical Network: A Survey. *Signal Processing, Telecommunication & Embedded Systems: AI and ML Applications. Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2025. Vol 1430. P. 417–429. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-96-7249-3_33.
8. Агеев Д.В., Ковальчук В.К., Переверзев А.А. Distribution planning in design wavelength DWDM transport network. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2011. Vol. 5, No. 3(53). P. 25–29. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2011.1188>.
9. Gol V.D., Tsmikal E.K. Forward error correction in DWDM fiber-optic transmission system. *Radioelectronics and Communication System*. 2009. Vol. 52. P. 317–323. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0735272709060053>.
10. Dávalos E. J., Romero M. F., Galeano S. M., Báez D. A., Leiva A., Baran B. Spectrum Defragmentation in Elastic Optical Networks: Two Approaches With Metaheuristics. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 119835–119843. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2937032>.

Korobeinyk S.M., Kasilov O.V. MODEL OF DYNAMIC WAVELENGTH DISTRIBUTION IN WDM OPTICAL NETWORKS WITH UNEVEN TRAFFIC

The article considers the problem of effective use of spectral resources in WDM optical networks of the new generation in conditions of spatial and temporal unevenness of traffic. The growth of intensity and variability of information flows, caused by the development of cloud services, multimedia platforms, fifth-generation mobile networks and intelligent infrastructures, leads to the complication of wavelength management processes and an increase in the probability of blocking connections when using traditional static resource allocation schemes. In such conditions, there is a need for adaptive approaches that can take into account dynamic changes in load and the structure of spectrum occupancy in real time.

The paper proposes a mathematical model of dynamic wavelength allocation in WDM networks with uneven traffic, which is based on a stochastic description of the processes of flow arrival, channel occupancy and route blocking. The model allows taking into account both local and global changes in traffic intensity, as well as their impact on spectrum fragmentation and the efficiency of using available wavelengths. Based on the proposed model, an adaptive algorithm for dynamic wavelength assignment has been developed, which adjusts the solution taking into account the current state of the network and predicted load changes.

Experimental studies using simulation modeling have been conducted, which confirm the feasibility of using a dynamic approach compared to static methods. The results obtained indicate that the proposed algorithm provides a reduction in the average spectral channel downtime factor by 12–14% and a decrease in the level of connection blocking under conditions of uneven traffic. In addition, the number of unnecessary channel reassignments is reduced, which has a positive effect on the overall stability and performance of the network.

The practical value of the work lies in the possibility of using the developed model and algorithm in the design and operation of WDM optical networks with software-controlled or centralized architecture. The

proposed approach forms a theoretical basis for the further development of adaptive mechanisms for managing spectral resources in new generation optical transport systems.

Keywords: *mathematical modeling, optical network, adaptive wavelength division multiplexing, WDM, spectral planning, traffic, blocking probability, spectrum fragmentation, network resource management.*

Дата першого надходження статті до видання: 22.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026