

# ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.391

М. М. Климаш, О. М. Шпур, М. О. Селюченко,  
Б. В. Киричук, Т. В. Мельник  
Національний університет “Львівська політехніка”

## МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ МЕРЕЖЕВИХ РЕСУРСІВ ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ

© Климаш М. М., Шпур О. М., Селюченко М. О., Киричук Б. В., Мельник Т. В., 2015

Запропоновано метод локального розподілу та управління сегментом мережі, що приведе до оптимізації використання оптичного ресурсу фізичного тракту, зменшення імовірності блокування під час прокладання нових логічних каналів. Разом з цим, використання цього методу дає змогу оператору суттєво зменшити капітальні витрати, пов'язані з наперед закупленими чи зарезервованими ресурсами, та операційні витрати, основна частина яких – ресурси транспортної мережі, що не використовуються.

Ключові слова: IP/MPLS, оптимізація фізичних ресурсів оптичного тракту, MPLS/OTN

М. М. Klymash, О. М. Shpur, М. О. Seliuchenko,  
В. В. Kyrychuk, Т. V. Melnyk  
Lviv Polytechnic National University

## THE METHOD OF INCREASE EFFICIENCY TO USE NETWORK RESOURCES IN INFORMATION AND TELECOMMUNICATIONS SYSTEMS

© Klymash M. M., Shpur O. M., Seliuchenko M. O., Kyrychuk B. V., Melnyk T. V., 2015

For optimization of using physical resources of optical path, reducing the probability of blocking when laying new logical channels in this paper has been developed method of local distribution and control segment multiservice network, which enables easier transport network management system. Using this method allows the operator to significantly reduce capital costs related to purchased in advance or reserved resources and operating costs, which make up the bulk of transport network resources that are not used.

In the simulation confirmed that local resource allocation method provides a substantial reduction of congestion network device and its power, about 1.5 times. Using the algorithm laying cross tunnels, the method made it possible to unload wavelength, which has been downloaded more than 60 %, and used one of the available wavelengths with high atomic number for making the through the tunnel between nodes. Switch to transparent transmission enabled partially relieve the busiest junction. This is particularly important in an environment where the network transferred large amounts of traffic. In such circumstances, the network node has to handle both own and transit, in the electrical domain, but also very often at the

**network level. With integrated switching MPLS / OTN managed to avoid high packet time delay and power consumption caused by switching to IP / MPLS level. Quality monitoring service shows that after switching transparently transmitting the average packet delay from end to end decreased from 82 to 28 microseconds, which is almost four times.**

**Key words: IP/MPLS, optimization of using physical resources of optical path, MPLS/OTN.**

### **Вступ**

Інформатизація суспільства відбувається швидкими темпами. Людство переживає швидке зростання обсягів використання відео- та аудіоконтенту, а кожен з користувачів очікує отримати високоякісні IP послуги в будь-якій мережі та в будь-який час. Такі сервіси можуть бути доступними лише за умови надійної взаємодії пристроїв у мережі передавання даних. Сучасні архітектурні рішення мереж не мають змоги швидко пристосовуватися до зростання обсягу IP трафіку. Основною вимогою щодо надання послуг IP є передача трафіку через мережу зі споживанням якомога менше ресурсів – як апаратних, так і програмних. Вибір адекватної архітектури мережі має вирішальне значення як для надання послуг користувачам, так і з погляду продуктивності мережі та балансу між експлуатаційними витратами і прибутком. Втім, одним із ключових при цьому є вибір технологій, наприклад, для ефективного і збалансованого використання ресурсів під час роботи компонентів мережі, що впливає також і на вартість.

Сьогодні існує безліч технологій, які дають змогу ефективно використовувати як апаратні, так і телекомунікаційні ресурси. Так, для прикладу, на транспортній мережі України вже реалізовано та впроваджено DWDM та IP/MPLS технології. Проблема полягає в тому, що вони функціонують незалежно одна від одної, а їх взаємодія та управління викликають великі труднощі.

DWDM мережа сформована на базі діючої оптоволоконної мережі, загальна протяжність якої сягає 31 тис. км. Її вузли розташовані у всіх обласних центрах та великих містах, більше ніж 80 точок введення-виведення трафіку в кожному регіоні. Можливості DWDM поки що не використовуються сповна, оскільки по ній передається трафік лише від синхронних транспортних мереж.

В Україні SDH технологія є основною технологією передавання даних у транспортних мережах. Основні її переваги такі:

- порівняно простий процес мультиплексування/демультиплексування;
- доступ до низькошвидкісних потоків без необхідності мультиплексування/демультиплексування всього високошвидкісного каналу, що дозволяє легко підключати клієнтське обладнання та здійснювати крос-комутацію потоків;
- можливість створення “прозорих” каналів зв’язку, які необхідні для виконання певних завдань.

Однак ця технологія має і недоліки, через які вона втрачає свою актуальність. Зокрема, SDH погано підходить для передавання пакетного трафіку, передусім через відсутність засобів гнучкого та масштабованого виділення каналних ресурсів. Для технології SDH характерне неефективне використання пропускної здатності каналів зв’язку, тобто є необхідність резервування смуги на випадок відмов, ця технологія не здатна динамічно виділяти смугу пропускання під різні додатки та не має механізмів пріоритетизації трафіку. Для передавання пакетного трафіку у транспортних мережах постає проблема її комутації та перетворення у фізичну форму. В процесі оптичної комутації пакети перебувають в оптичному домені на всьому шляху передавання від першого до останнього мережевого вузла. Цей метод забезпечує високу продуктивність та швидкість передавання інформації, проте його реалізація потребує розв’язання певних задач. Однією з таких задач є блокування в оптичній мережі, що, зазвичай, вирішується встановленням хвильових конверторів та буферизацією сигналу в оптичному домені, з використанням оптичних ліній затримки, що призводить до складності інтеграції такого рішення.

Електрична комутація (сигнал конвертується з оптичного в електричний, комутується, і конвертується в оптичний) – досі єдиний спосіб виконання комутації на сублямбда-рівні. Майже 70 % всього трафіку, який надходить у вузол транспортної мережі, є транзитним (цей трафік призначений для іншого вузла) [8]. IP маршрутизатори змушені обробляти увесь транзитний трафік. IP-маршрутизація працює на основі опрацювання заголовка кожного пакета, що надходить на вузол. Збільшення обсягу трафіку як власного (трафік адресований вузлу, на якому він міститься), так і транзитного вимагає підвищення потужності IP маршрутизатора.

Як відомо, IP маршрутизатори для обробки кожного біта інформації витрачають чимало енергії [10]. Розробники і постачальники мережевого обладнання, такі, наприклад, як Alcatel-Lucent чи Cisco, часто дотримуються позиції “Здійснити краще комутацію, де це можливо, а маршрутизацію – лише там, де необхідно”. Агрегація великих обсягів даних на рівні комутації, а не маршрутизація окремих пакетів, стає все перспективнішим рішенням у мережах з IP трафіком. Це дозволить заощадити і на вартості обладнання, і на роботі мережі загалом (споживання електроенергії). В таких мережах пропонується використовувати технологію OTN. Результати останніх досліджень показують перевагу OTN комутації загалом і акцентують на необхідності інтеграції OTN та WDM інтерфейсів у тій самій апаратній платформі до 2016 р. [6]. І навіть більше, це дає можливість перейти на сіткову та частково сіткову топологію мережі, що дасть змогу постачальникам зекономити на дорогому мережевому обладнанні та підвищити захищеність мережі.

Комутація за технологією OTN пропонує гнучкість комутації в електричній формі. Комутація по довжинах хвиль, що виконується оптичними крос-конекторами, не може забезпечити комбінацію та розбиття різних класів трафіку. OTN комутація, з іншого боку, має змогу об'єднувати і розбивати сигнали від різних потоків на OTN рівні. Вона поєднує в собі швидкість комутації апаратного рівня з особливостями маршрутизації рівня IP, досягаючи високої продуктивності вузла. Особливість технології OTN полягає у тому, що комутуються блоки ODU. Як відомо, в стандарті OTN існує декілька швидкісних потоків. Такі потоки не відрізняються розміром фрейму чи його структурою, яка для всіх потоків однакова. Відмінність полягає у тривалості біта під час передавання, тобто швидкості передавання фрейму. У комутаторах OTN для комутації блоків ODU використовується стандартна матриця комутації. У більшості OTN комутаторів використовується високопродуктивна комутаційна фабрика.

Враховуючи особливості функціонування технології OTN та можливість її впровадження для інтеграції пакетного трафіку у транспортну DWDM мережу, необхідно запропонувати способи передавання даних та розподілу фізичних ресурсів і їх управління, що дозволить забезпечити передачу IP трафіку з різними параметрами якості обслуговування.

### **Принципи передачі трафіку в телекомунікаційній мережі**

Значна частина досліджень в області мобільного зв'язку здійснюється на повністю оптичній пакетній комутації. В процесі оптичної комутації пакети містяться в оптичному домені від мережевого входу до мережевого виходу. Це забезпечує високу продуктивність та швидкість передачі інформації, але реалізація цього підходу вимагає розв'язання складних задач, однією з яких є буферизація пакетів у оптичній формі (використання оптичних ліній затримки).

Ієрархія мультиплексування в OTN основана на організації даних у блоки ODUs. Основною перевагою цієї структури мультиплексування є те, що ODUs нижчих порядків, які відображаються у ODUs вищих порядків, можна комутувати індивідуально. Це дозволяє деталізувати швидкості комутації ODU. OTN пропонує комутацію на різних ODU швидкостях: 1.25, 2.5, 10, 40 та 100 Гбіт/с.

Враховуючи можливості комутації в OTN, у цій роботі пропонується використання двох режимів передачі:

1. Стандартний. У цьому режимі передачі значення мітки записується в поле OPU з 1 по 48 біти. OPU з міткою виступає клієнтським навантаженням, з якого формується OTN фрейм. На кожному проміжному вузлі здійснюється оптоелектронне перетворення для фрейму.

2. Прозорий. Сигнальна інформація передається для певної групи блоків, відкриваючи наскрізний оптичний канал на деякий визначений інтервал часу. Часовий інтервал, протягом якого буде здійснюватися передача інформації, залежить від інтенсивності надходження пакетів та параметрів QoS.

Зазначимо, що весь службовий трафік (таблиці комутації, інформація про стан оптичних каналів тощо) передається на окремо виділеній довжині хвилі  $I_{\text{службова}}$ .

### Стандартний режим передавання

Відповідно до стандартного режиму передавання даних, пакети, наприклад, від мереж доступу IP/MPLS з міткою передаються в заголовок ODU разом з OTU блоком. Заголовок ODU містить вільні поля для передавання службової інформації: перше поле розміром 24 біт і друге – 40 біт. Цього цілком достатньо для передавання мітки. Однак стандартна мітка таких мереж доступу не містить інформації про те, в яку довжину хвилі необхідно перенаправити пакет. Для вирішення цієї проблеми пропонуємо модифікувати таку мітку. “Модифікована” мітка відрізняється від класичної MPLS мітки наявністю двох додаткових полів: поле номера оптичного волокна і, відповідно, поле номера довжини хвилі у цьому волокні. Присвоєння 8 біт кожному полю цілком достатньо для забезпечення нумерації волокон і хвиль (по 256 кожного). Це дозволить забезпечити процес комутації як на логічному MPLS рівні, так і на фізичному рівні DWDM, тобто комутацію в ідеальному випадку будь-якого волокна і будь-якої довжини хвилі. Модифікована мітка зображена на рис. 1 та має розмір 48 біт.



Рис. 1. Структура модифікованої мітки (довжини полів вказано в бітах)

Оскільки стандартний режим передавання даних використовує оптоелектронне перетворення, то задача запису/зчитування мітки у вільні поля заголовка ODU відсутня – це реалізується програмним способом.

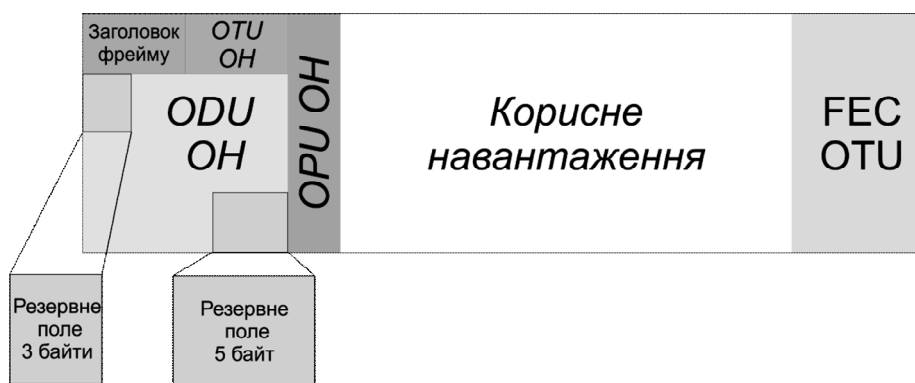
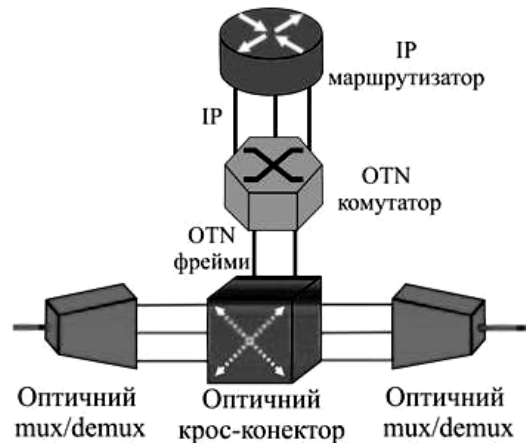


Рис. 2. Структура OTN фрейму

Стандартний режим комутації відбувається на OTN рівні, що дозволяє чітко розділити процес обробки та комутації корисної інформації. Рис. 3 ілюструє, як комутатор OTN, розташований між оптичним крос-конектором та IP маршрутизатором у вузлі мережі, здійснює комутацію OTN фреймів на основі модифікованої MPLS мітки замість комутації окремих пакетів.

Рис. 3. Принцип OTN комутації



Група вхідних мультиплексованих довжин хвиль надходить у вузол. Демультимплексор виділяє окремі довжини хвиль та вводить їх у оптичний крос-конектор. Оптичний крос-конектор налаштований на крос-комутацію довжин хвиль, що надходять на певні вхідні порти. Довжини хвиль, що переносять дані, які повинні бути опрацьовані в поточному мережевому вузлі, крос-комутуються на OTN рівень. Комутатор OTN приймає оптичні сигнали (набір певних довжин хвиль), перетворює їх в електричну форму та відновлює фрейми OTN на основі методу попереднього кодування. У процесі надходження фреймів OTN комутатор здійснює демультимплексування блоків, аналізує їх заголовки та зчитує з них модифіковану MPLS мітку. Відповідно до принципу MPLS комутації OTN комутатор здійснює пошук зчитаної мітки в таблиці комутації (аналог таблиці MPLS комутації на OTN рівні) і замінює її на нову. Після цього комутаційна фабрика передає фрейм на відповідний вихід, де знову відбувається процес мультиплексування. У контексті транспортної мережі комутація на OTN рівні має велику кількість переваг, порівняно з комутацією на IP/MPLS рівні. Зокрема, комутуються цілі блоки, а не окремі пакети. Це позитивно впливає на швидкість комутації (обробки), і відповідно, підвищується продуктивність мережі. Варто зазначити, що OTN комутатор підвищує ефективність використання довжин хвиль за рахунок мультиплексування низькошвидкісних потоків у високошвидкісні потоки. Використовуючи запропоновану MPLS мітку, комутатор OTN гарантує, що тільки IP-трафік, який призначений для поточного вузла, передається на IP рівень. Отже, можна уникнути обробки транзитного трафіку на IP маршрутизаторах.

### Прозорий режим передавання

Прозорий режим роботи являє собою передавання OTN фреймів без здійснення оптоелектронного перетворення на проміжних вузлах. У цьому випадку передбачається відкриття наскрізного каналу для передавання даних між двома вузлами з резервуванням необхідної пропускної здатності. За допомогою протоколу CSPF (Constrained Shortest Path First) визначаються проміжні вузли, які формують оптимальний маршрут. Вузол-ініціатор відсилає запит PATH на встановлення з'єднання, згідно з протоколом RSVP-TE. Повідомлення PATH використовуватиме протокол RSVP для резервування спектральних і часових ресурсів кожного сегмента мережі. Вузол-одержувач, отримавши PATH, формує повідомлення RESV і відсилає його до вузла-ініціатора, повідомляючи його про відкриття наскрізного каналу.

Передача OTN фреймів здійснюється на тій самій довжині хвилі або їх сукупності на кожному сегменті мережі. У місцях, де необхідні довжини хвиль відсутні, пропонується встановити хвильові конвертори. Якщо хвильові конвертори не можуть вирішити проблему пошуку вільної хвилі, протокол CSPF вибирає інший маршрут.

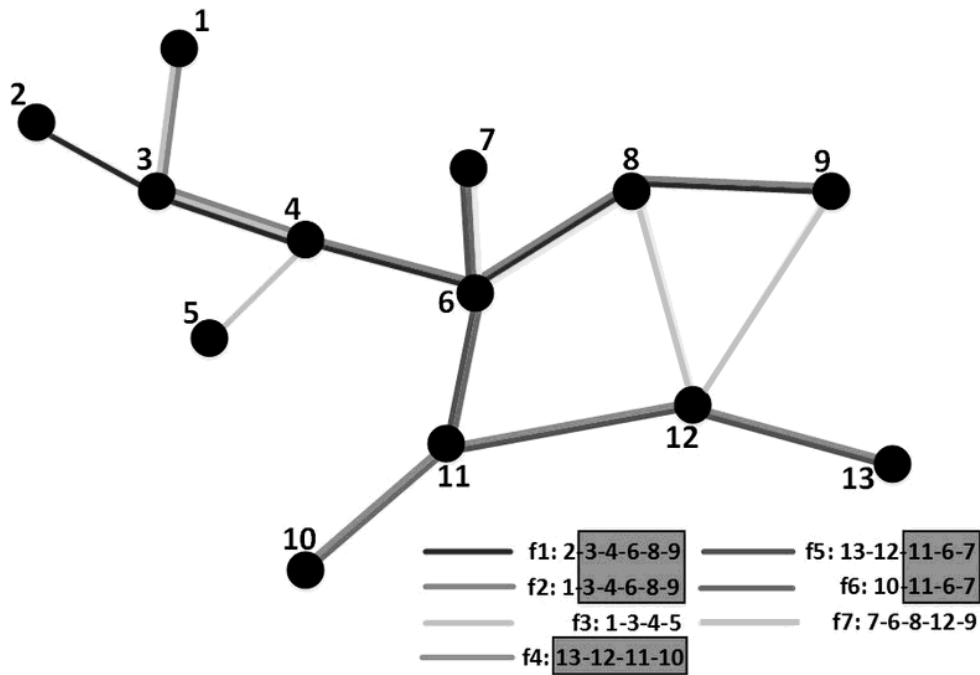


Рис. 4. Приклад графу мережі із потоками, які проходять через її вузли

В цьому режимі вузли можуть виступати як в ролі кінцевих вузлів, так і в ролі проміжних. Прозорий режим передавання може встановлюватися між двома кінцевими вузлами (наскрізний канал буде відкриватися на вимогу користувачів, які за нього сплачують гроші) або формуватися посеред процесу передавання інформації (у випадку, коли інтенсивність надходження блоків спричиняє збільшення ймовірності блокування роботи цього вузла). На рис. 4 наведено приклад мережі у формі графа, де через вузли проходять потоки  $f_i$ . Розглянемо потоки  $f_1$  і  $f_2$ , які направлені від інших мереж доступу до вузла 9. На вузлі 3 відбувається агрегація цих потоків і відкривається наскрізний канал до вузла 9 через проміжні вузли 4, 6, 8. Такий самий принцип формування прозорого каналу для потоків  $f_5$  і  $f_6$ . Вузол 13 відкриває наскрізний канал на замовлення до вузла 10, що відображається потоком  $f_4$ .

#### Удосконалення площини управління на основі методу локального розподілу та управління оптичними ресурсами сегмента мережі

Відповідно до принципів пакетної передачі, кількість шляхів у одному напрямку може бути більша, ніж 1. Це дозволяє балансувати навантаження, що дає змогу ефективніше використовувати ресурси фізичних каналів. Проблема полягає у відсутності методів моніторингу завантаження каналів та оптимального розподілу смуги пропускання кожної хвилі (логічного каналу) одного фізичного каналу мережами з пакетною комутацією. Це пов'язано з гранульованістю тунелів, які резервуються протоколом RSVP. Прокладання тунелів через мережу ґрунтується лише на критерії мінімального завантаження каналів протоколу OSPF. Враховуючи те, що між двома вузлами оптичної мережі існує багато фізичних каналів, у цій роботі пропонується метод локального розподілу та управління оптичними ресурсами.

Для прикладу, візьмо випадок коли два комутатори можуть самостійно керувати оптичними каналами, які їх з'єднують. Для цього використовується протокол LMP (Link Management Protocol). У випадку відкриття/прокладання нового LSP кожна пара комутаторів намагається максимально ущільнити потоки у довжинах хвиль та волокнах, починаючи з першого номера (рис. 5). Отже, правий квадрат завжди вільний для прокладання наскрізних тунелів. Графічно це можна відобразити, як на рис. 5.

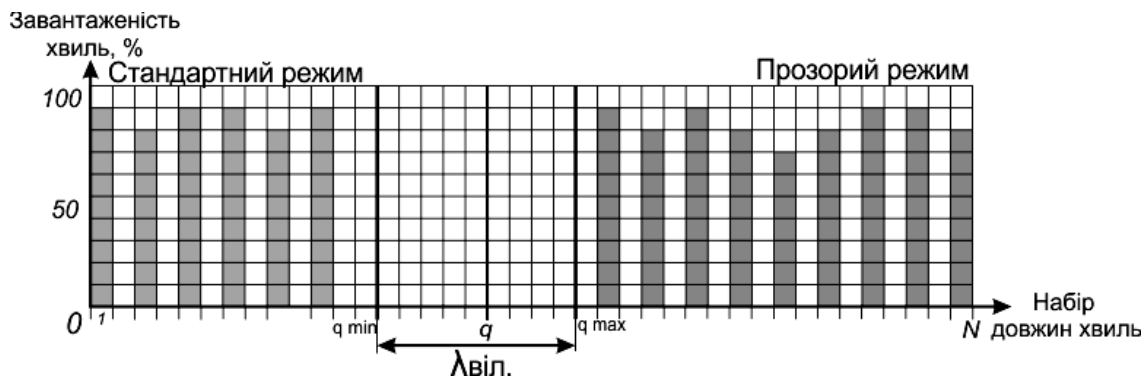


Рис. 5. Графічне представлення локального розподілу оптичних ресурсів

Завдяки цьому на більшості сегментів мережі хвилі з великими порядковими номерами (у другому квадраті) використовуватимуться для прокладання наскрізних каналів. Також треба визначити мінімальний  $q_{min}$  та максимальний  $q_{max}$  поріг довжин хвиль, який унеможливить випадки, коли у стандартному чи у прозорому режимі не виявиться жодної вільної несучої для передавання необхідної інформації, тобто довжини хвиль, що належать проміжку  $[q_{min}; q_{max}]$ , будуть вільними для використання. Параметри  $q_{min}$  і  $q_{max}$  залежать від властивостей мережі.

Для визначення можливості прокладання наскрізного тунелю використовується протокол модифікований OSPF, відповідно до якого вузол-ініціатор у режимі пошуку оптимального маршруту отримує всі можливі доступні довжини хвиль для наскрізного передавання. Модифікація OSPF полягає у врахуванні довжини наскрізного каналу в метриці протоколу, що дасть змогу уникнути прокладання наскрізного каналу, довжина якого негативно вплине на показник відношення сигнал/шум та коефіцієнт бітових помилок. Після цього використовується протокол RSVP, щоб зарезервувати наскрізний канал на кожному комутаторі шляху. При цьому кожному вузлу передається адреса вузла-ініціатора. У таблиці кожного комутатора MPLS на шляху блокуються відповідні мітки для зарезервованої довжини хвилі.

#### Алгоритм відкриття наскрізного каналу

Відкриття наскрізного каналу потребує чітко визначених умов. Є дві основні умови його відкриття:

– Відкриття на вимогу:

- Компанія, яка хоче забезпечити передавання певної кількості власної інформації з необхідною швидкістю і якістю, може замовити передачу даних по одній (або більше) довжині хвилі. Якщо є потреба в передаванні таких даних протягом тривалого терміну, то компанія може брати довжини хвиль в оренду. Це допоможе забезпечити постійну якість надання послуг з імовірністю 99,99 %.
- Адміністратор мережі, за потреби, між двома довільними вузлами мережі може відкрити наскрізний канал передавання даних для балансування навантаження.
- Висока інтенсивність інформації, що передається між вузлами  $i$  та  $j$ .

Відкриття наскрізного каналу на вимогу не потребує додаткових умов (крок 1, див. рис. 6) оскільки компанія оплачує оренду за використання однієї (або більше) довжини хвилі

Висока інтенсивність трафіку, що передається між двома конкретними вузлами  $R_i - R_j$  (LSP, що належать до одного FEC), є другою причиною відкриття наскрізного каналу, що обмежена деякими умовами. Враховують, що кожен вузол, у стандартному режимі передавання, може здійснювати перегрупування потоків, максимально завантажувати довжини хвилі, починаючи з першого номера. Крім того, ці вузли повинні формувати масив даних  $M_{LSP}[\ ]$ , який містить інформацію про пропускні здатності кожного LSP, що проходять через нього. Оновлення цього масиву здійснюватиметься через певний сталий проміжок часу  $t$ . Визначаються LSP, що проходять між вузлами  $R_i - R_j$ , тобто належать до одного FEC. З цих LSP формує новий масив  $M_{FEC_j}[\ ]$  (2). Тому доцільно згрупувати LSP, які спрямовуються до одного FEC, коли їхня сумарна пропускна

здатність  $BW_j = \sum_{s=0}^{s=k} C(LSP_{s(j)})$  (3) не менша, ніж  $k_l \cdot C$  (4), де  $C$  – пропускна здатність однієї

довжини хвилі,  $k_l$  – коефіцієнт використання довжини хвилі, за якого буде здійснюватися відкриття наскрізного каналу, за умови  $0,5 < k_l < 1$ . Параметр  $k_l$  вибирає адміністратор мережі, оскільки різні мережі характеризуються різними типами трафіку. Для відкриття наскрізного каналу, спільного для різних  $LSP$ , формується масив проміжних вузлів шляху  $M_{R_i-R_j} = \{R_{i+1} \dots R_{j-1}\}$  (5).

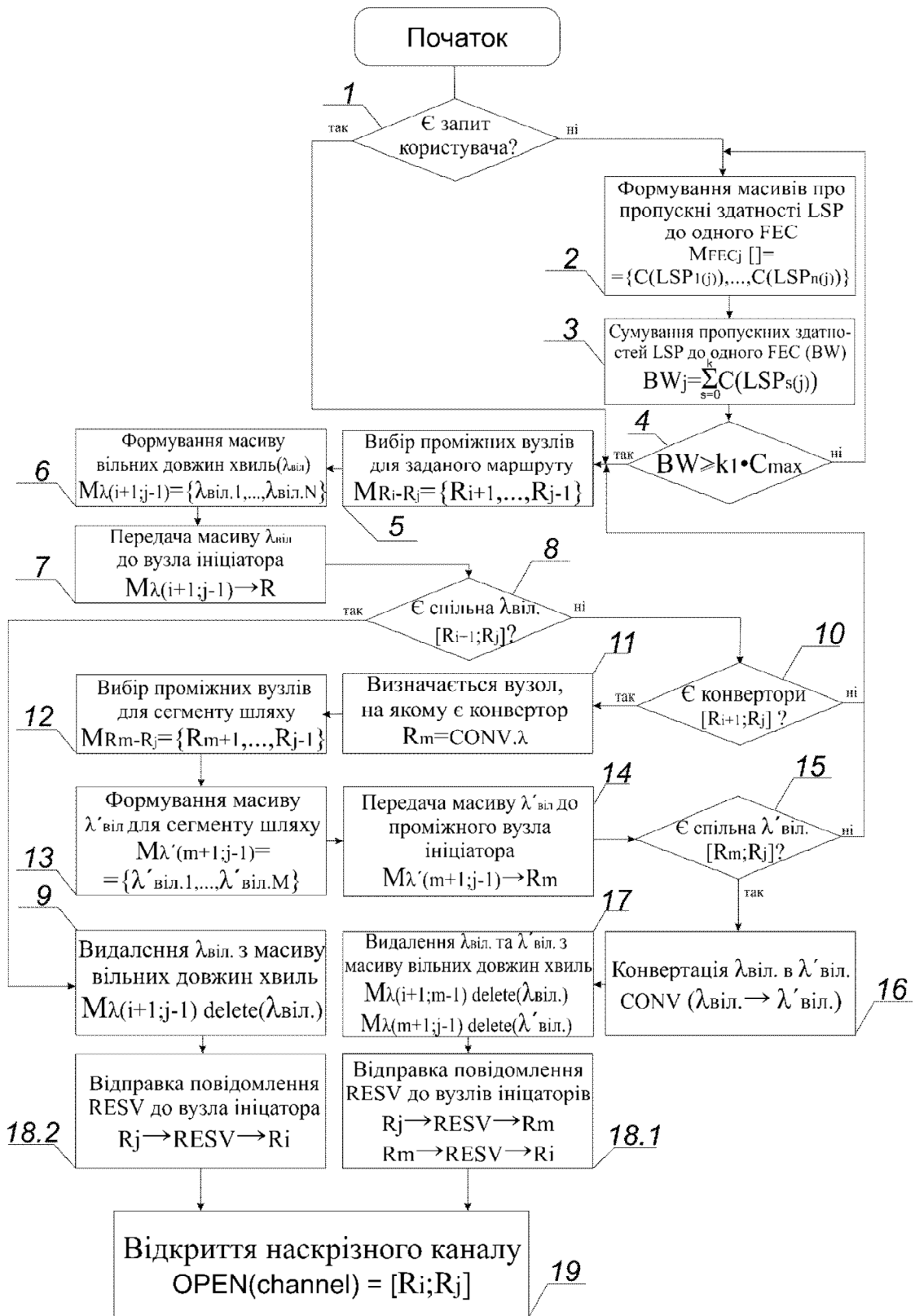


Рис. 6. Алгоритм відкриття наскрізного каналу



Наскрізний канал вздовж всього маршруту передаватиме дані на одній довжині хвилі. Тому кожен вузол формує масив даних  $M_{I(i+1;j-1)} = \{I_{вил.1} \dots I_{вил.N}\}$ , в якому міститься інформація про вільні довжини хвиль на певний момент часу (6). Вузли, які задіяні для вибраного *LSP*, передають дані з цього масиву по службовій довжині хвилі до вузла-ініціатора встановлення наскрізного каналу (7). Вузол-ініціатор після отримання службової інформації від усіх проміжних вузлів починає пошук спільної вільної довжини хвилі для всього маршруту (8). Якщо таку хвилю знайдено, то вона видаляється з масиву вільних довжин хвиль на кожному проміжному вузлі (9). Вузол  $R_j$  відсилає повідомлення *RESV* до вузла-ініціатора наскрізного каналу про підтвердження встановлення тунелю (18.1). Тепер вузол-ініціатор має необхідний набір даних для відкриття наскрізного каналу (19).

Проте у цьому випадку, можливе використання хвильової конвертації для заміни довжин хвиль оптичних сигналів. Основною перевагою хвильових конверторів є забезпечення більшої кількості оптичних шляхів та відкриття наскрізних каналів, що переносять дані на одній довжині хвилі. Своєю чергою, велика вартість та складність реалізації обмежують їхнє використання в мережах. Тому конвертацію довжин хвиль оптичних сигналів пропонується здійснювати на окремих попередньо визначених вузлах. Отже, окремі мережеві вузли виконуватимуть заміну всієї довжини хвилі за потреби. Такий варіант зменшить складність та капітальні витрати апаратного забезпечення, порівняно зі здійсненням конвертації на кожному із вузлів, а також забезпечить ефективніше використання ресурсів каналу, порівняно із мережами без хвильової конвертації. Пропонується розміщувати хвильові конвертори у вузлах мережі, де висока імовірність відсутності вільної спільної довжини хвилі.

Якщо спільну вільну хвилю не знайдено, то відбувається пошук конверторів на цьому маршруті (10). За наявності конвертора в певному вузлі  $R_m$  цей вузол повторює кроки (5–7) тільки в ролі ініціатора відкриття наскрізного каналу (11–14). Якщо спільна вільна хвиля  $I'_{вил.}$  була знайдена (15) на проміжку  $R_m - R_j$ , то здійснюється конвертація  $I_{вил.}$  в  $I'_{вил.}$  на вузлі  $R_m$  (18). Наступний крок полягає в тому, що з масивів  $M_{I(i+1;m-1)}$  і  $M_{I(m+1;j-1)}$  відбувається видалення  $I_{вил.}$  і  $I'_{вил.}$  відповідно (17). Вузол  $R_j$  відсилає повідомлення *RESV* до вузла-ініціатора наскрізного каналу про підтвердження встановлення тунелю (18.2). Тоді вузол-ініціатор матиме необхідний набір даних для відкриття наскрізного каналу (19).

Якщо спільну вільну хвилю не знайдено і немає конверторів на цьому шляху, то відбувається вибір нових проміжних вузлів для цього *LSP*.

Закриття наскрізного каналу відбудеться, коли пропускна здатність довжини хвилі буде меншою за  $k_2 \cdot C$ , де  $k_2$  – коефіцієнт використання довжини хвилі, за якого здійснюватиметься закриття наскрізного каналу. Повинна виконуватись умова, що  $k_2 < 0,3$ , оскільки закриття наскрізного каналу має відбутися у разі суттєвого зниження трафіку, що надходить, з урахуванням його сплесковості й нерівномірності.

### Дослідження ефективності запропонованих методів та алгоритмів

Для дослідження ефективності запропонованих у роботі рішень розроблено імітаційну модель транспортної оптичної мережі. Основна частина симуляторів телекомунікаційних систем та мереж функціонує за принципом дискретних подій, що не завжди повною мірою відображає особливості процесів, які відбуваються в мережі. В основу розроблення запропонованої архітектури покладено модель мережевого крайового вузла, який дає змогу забезпечити інтеграцію технологій різного рівня (IP/MPLS, OTN, DWDM). Структурна схема моделі такого вузла, розроблена з використанням засобів UML, відображена на рис.7.

Основні елементи моделі, які представляють логічні рівні запропонованої архітектури транспортної мережі, такі:

- ROADM – реконфігурований мультиплексор вводу/виводу. Він має набір портів для підключення оптичних волокон та таблицю комутації, відповідно до якої хвиля комутується або для перетворення в електричний сигнал, або для спрямування в інше волокно. Таблиця комутації формується та змінюється системою керування, яка розташована на IP рівні, та використовує службові інтерфейси ROADM.

- OTN комутатор – складається з комутаційної фабрики, таблиці комутації, агрегатора IP/MPLS фреймів, мультиплексора та демультимплексора. Налаштування параметрів роботи усіх комутаторів мережі здійснює система керування IP/MPLS рівня. Комутатор з підтримкою технології OTN має здатність адаптуватися під будь-які режими передавання даних (може перемикатися як у звичайний режим передавання потоків, так і в будь-який із запропонованих у роботі).

- IP/MPLS комутатор – формує для заданої роботи мережі таблицю комутації, має функції менеджера управління трафіком та складається із комутаційної матриці й генератора трафіку від мереж доступу.

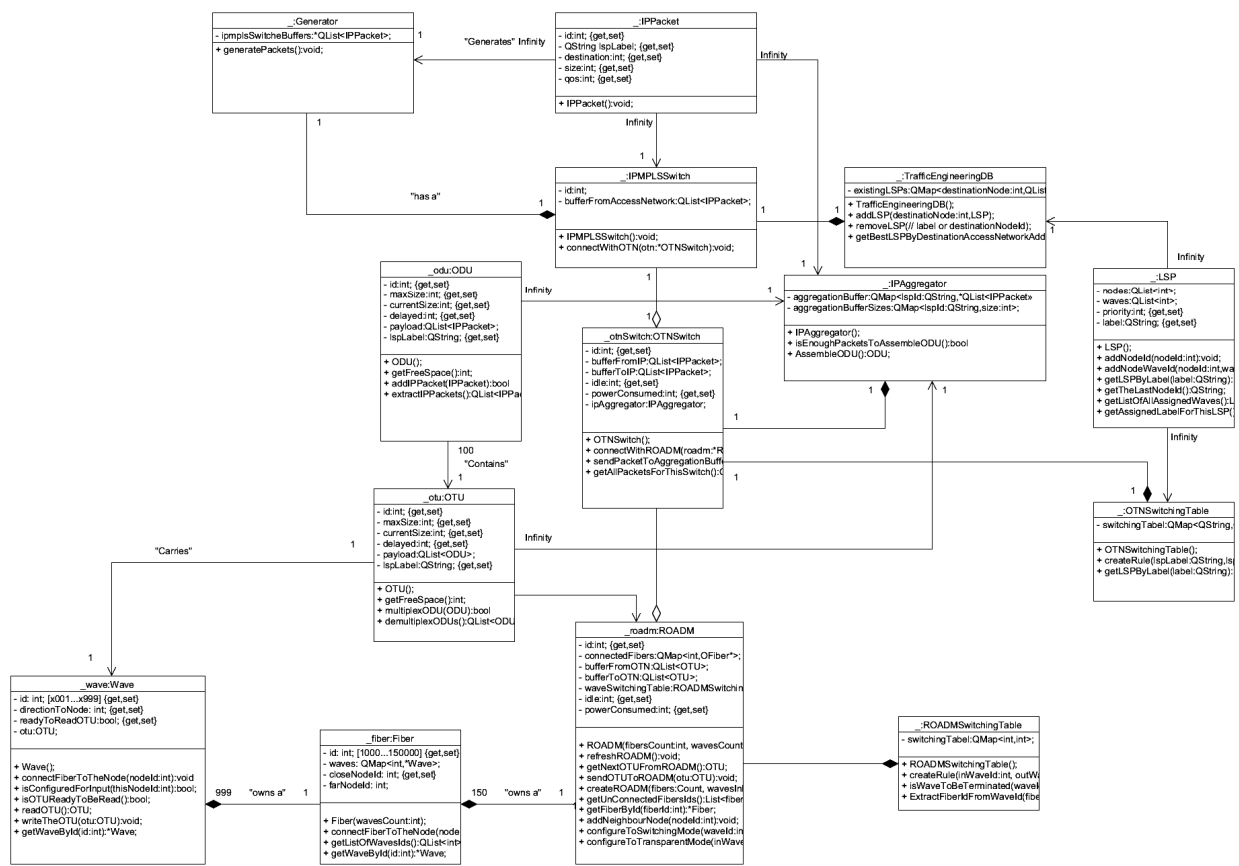


Рис. 7. Структурна схема імітаційної моделі вузла транспортної мережі IP over OTN over DWDM

Для передавання як службових, так і інформаційних повідомлень між рівнями використовують буфери. Отже, використовуючи розроблену модель вузла, можна створити модель оптичної мережі довільної конфігурації.

На основі представлені імітаційної моделі у роботі розроблено програмний інструмент з використанням мови програмування C++ та середовища програмування Qt5.4. Для створення мережі довільної конфігурації можна задати необхідні параметри в таблиці, яка відіграє роль матриці суміжності. Всі вузли мережі можуть бути незалежно налаштовані, хоча мають однакоvu конфігурацію за замовчуванням. З'єднання між вузлами формуються на основі заповненої матриці суміжності. Для створення зв'язку між вузлами необхідно на перехресті відповідного номера рядка

та стовпця задати з використанням розділового знака “/” такі параметри: кількість волокон, кількість довжин хвиль чи пропускну здатність довжини хвилі.

У мережі в ручному режимі створено набір тунелів, які комутуються за мітками. Параметри цих тунелів подано у табл. 1.

Таблиця 1

### Параметри тунелів

LSP	Колір	Вузли	Пріоритет	Режим	Середня інтенсивність навантаження, Гбіт/с	Зарезервована пропускна здатність, Гбіт/с
1	Червоний	1-2-3-4	1	Стандартний/Наскрізний	4,3	6
2	Синій	1-2-3	2	Стандартний	3,6	5
3	Зелений	1-2-5	3	Стандартний	5,4	8
4	Жовтий	1-2-6	1	Стандартний	2,3	4

Для генерації трафіку використовуються генератори на основі логнормального (міжпакетний інтервал) та експоненціального (розмір пакета) законів розподілу, які у поєднанні дають змогу отримати мультисервісний трафік з характеристиками, близькими до трафіку реальних транспортних мереж, а також мережі Інтернет.

Всі тунелі й генератори трафіку для кожного тунелю активовано одночасно. Тривалість існування тунелів не обмежена. Моделювання відбувається в три етапи.

На першому етапі проводиться аналіз роботи мережі, що функціонує відповідно до існуючої архітектури, та принципів транспортної оптичної мережі. А саме: на кожному вузлі здійснюється демультимплексування потоків та комутація IP/MPLS фреймів. На цьому етапі аналізується використання фізичних ресурсів комутаторів всіх рівнів, проводиться порівняльний аналіз їх енергоспоживання, затримки проходження пакетів з кінця в кінець. Особлива увага у розробленому сценарії відводиться сегменту мережі, сформованому вузлами 1 та 2, та вузлу 2, оскільки саме через них проходять створені тунелі.

На другому етапі вмикається комутація на рівні OTN, з використанням міток MPLS. Комутація на рівні OTN повинна забезпечити зменшення часу передавання пакетів з кінця в кінець, знизити завантаження комутаторів IP/MPLS та OTN.

На третьому етапі вмикається алгоритм прокладання наскрізних тунелів та метод локального розподілу та управління ресурсами сегмента мережі. Завдяки узгодженій роботі алгоритму прокладання наскрізних тунелів, методів локального управління та OTN комутації очікується зменшення кількості задіяних довжин хвиль, затримка передавання для пакетів першого LSP, що загалом має підвищити продуктивність і якість мережі та розвантажити другий вузол.

Для проведення описаних вище експериментів встановлюються параметри моделі (табл. 2).

Таблиця 2

### Вихідні параметри моделювання

Параметр	Значення
Кількість вузлів	6
Кількість волокон між двома сусідніми вузлами	2
Кількість довжин хвиль в одному волокні	10
Максимальна швидкість передавання на одній довжині хвилі	10 Гбіт/с
Максимальна продуктивність мережевого вузла	200 Гбіт/с
Характеристики транспортного потоку (відповідно до стандарту G.709)	OPU2 – 10 Гбіт/с; розмір фрейму OTU – 121856 біт (сталий); тривалість фрейму – змінна.

Використовуючи наведені в табл. 1 та 2 параметри, на основі графового представлення мережі, формують матрицю суміжності. Основна панель керування програмною імітаційною моделлю відображена на рис. 8, а.

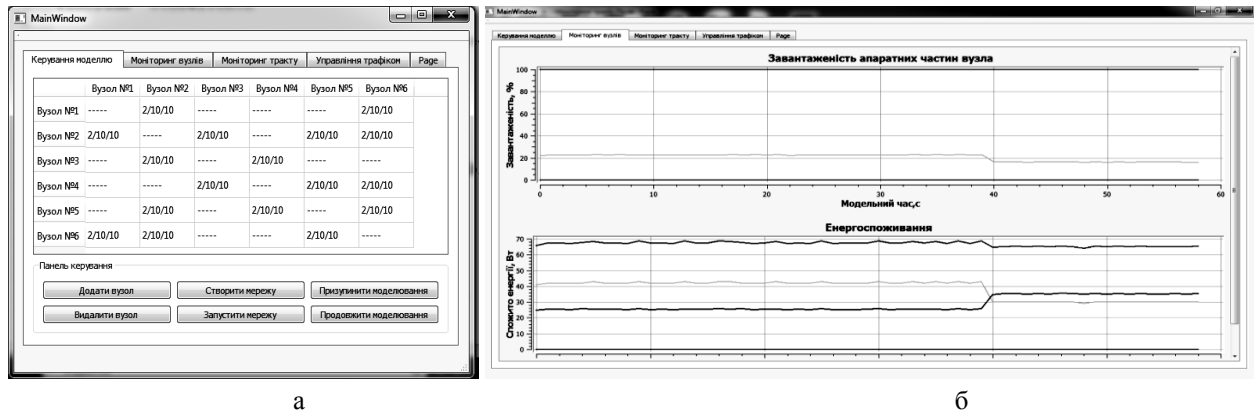


Рис. 8. Головна панель керування програмною імітаційною моделлю (а); ефективність використання ресурсів мережевого вузла та його енергоспоживання (б)

Моделювання проводилося у два етапи, без застосування запропонованих рішень та з їх застосуванням. На рис. 8, б відображено ефективність використання ресурсів мережевого вузла.

Ефективність використання ресурсів довжин хвиль та оптичних волокон для секції (1–2) відображено на рис. 9. На кожному графіку кожна крива відповідає довжині хвилі, що використовує мережа у конкретний момент. У таблиці робочої панелі є можливість вибирати окрему довжину хвилі та проглядати її параметри і характеристики. Програмна модель дає змогу проводити моніторинг завантаження всіх волокон та довжин хвиль, які з'єднують два сусідні вузли.

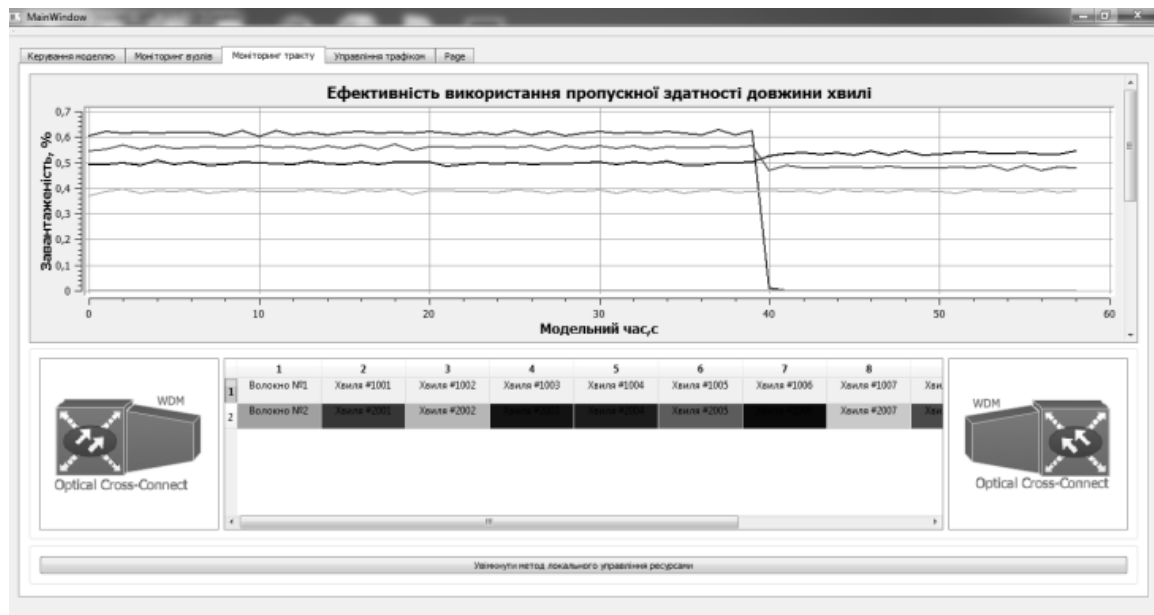
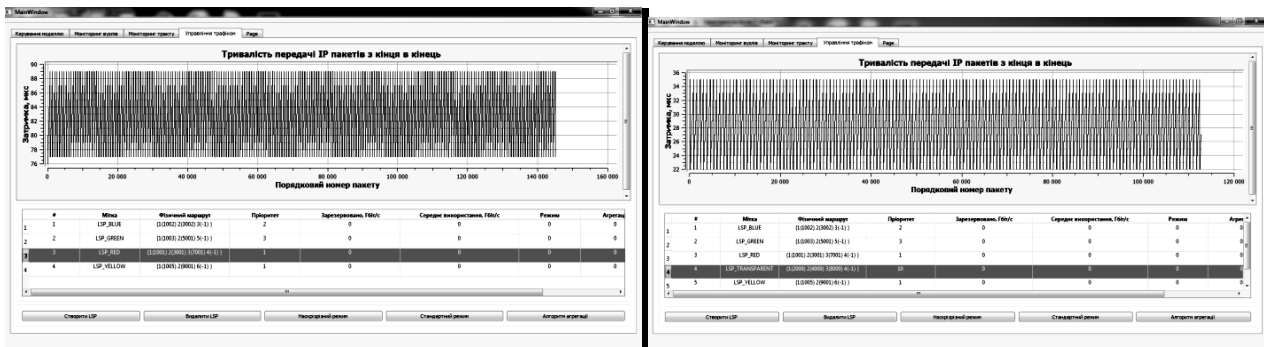


Рис. 9. Завантаженість оптичного тракту між двома вузлами (1 та 2) мережі для першого волокна

На рис. 10, а, б відображено менеджер управління трафіком, який дає змогу створювати, модифікувати, видаляти віртуальні тунелі (LSP) та здійснювати моніторинг їх параметрів. На рис. 10, а відображено характеристику затримки пакетів для LSP 1 (табл. 2).



а

б

Рис. 10. Характеристики тривалості передавання трафіку: в стандартному режимі передавання (а) та трафіку в прозорому режимі (б)

Аналізуючи отримані результати, бачимо, що метод локального розподілу ресурсів забезпечив суттєве зменшення завантаженості мережевого пристрою та його енергоспоживання, приблизно у 1,5 разу. Завдяки використанню алгоритму прокладання наскрізних тунелів метод дав змогу розвантажити першу довжину хвилі, яка завантажена більше ніж на 60 %, та використав одну з вільних довжин хвиль з високим порядковим номером для прокладання наскрізного тунелю між вузлами 1–4. Перемикання у режим прозорого передавання дало змогу частково розвантажити найзавантаженіший вузол 2. Це особливо важливо в умовах, коли в мережі передаються великі обсяги трафіку. В таких умовах мережевий вузол змушений обробляти як власний, так і транзитний трафік. У цьому випадку завдяки інтегрованій комутації MPLS/OTN вдалося уникнути високої затримки пакетів та енергоспоживання, спричинених комутацією на IP/MPLS рівні.

Моніторинг якості обслуговування LSP 1 (рис. 11) показує, що після перемикання у прозорий режим передавання середня затримка пакетів з кінця в кінець зменшилася з 82 до 28 мкс, тобто майже у чотири рази. Зрозуміло, що чим більше оминається вузлів, де відбувається перетворення сигналу з оптичного домену в електричний, тим більшим буде вигравш у затримці та енергоспоживанні.

## Висновки

Для оптимізації використання оптичного ресурсу фізичного тракту та зменшення імовірності блокування під час прокладання нових логічних каналів у роботі розроблено метод локального розподілу та управління сегментом WDM мережі, який дає змогу спростити систему керування транспортною мережею. Разом з цим, використання цього методу дає змогу оператору суттєво зменшити капітальні витрати, пов'язані з наперед закупленими чи зарезервованими ресурсами, та операційні витрати, основну частину яких становлять ресурси транспортної мережі, що не використовуються. У процесі моделювання підтверджено, що метод локального розподілу ресурсів забезпечує істотне зменшення завантаженості мережевого пристрою та його енергоспоживання, приблизно у 1,5 разу. Завдяки використанню алгоритму прокладання наскрізних тунелів метод дав змогу розвантажити довжину хвилі, яка була завантажена більше ніж на 60 %, та використав одну з вільних довжин хвиль з високим порядковим номером для прокладання наскрізного тунелю між вузлами. Перемикання у режим прозорого передавання дало змогу частково розвантажити найзавантаженіший вузол. Це особливо важливо в умовах, коли в мережі передаються великі обсяги трафіку. Завдяки інтегрованій комутації MPLS/OTN вдалося уникнути значної часової затримки пакетів та енергоспоживання, спричинених комутацією на IP/MPLS рівні. Моніторинг якості

обслуговування показує: після перемикання у прозорий режим передавання середня затримка пакетів з кінця в кінець зменшилася з 82 до 28 мкс, тобто майже у чотири рази.

1. Matthias Berger et al. *Optical transport networks (otn) – technical trends and assessment*. ITG, 2006. URL: <http://www.eusar.de/NR/rdonlyres/6633CE02-7567-4143-A62A-99FC2E083C03/14356/ITGPosipapOTN1.pdf>. 2. Wette P., Karl H. *On the quality of selfish virtual topology reconfiguration in IP-over-WDM Networks*. 19th IEEE Workshop on Local & Metropolitan Area Networks (LANMAN) (10-12 April 2013). – P. 1–6. 3. Zhang Yi., Yang O., Wu J., Savoie M. *Lightpath reconfiguration in a semi-dynamic WDM network // Global Telecommunications Conference, GLOBECOM '06 (Nov. 27 2006-Dec. 1 2006)*. - San Francisco, CA. – P. 1–5. 4. Bennett G. *Analysis of network bandwidth efficiency for Next-Generation 100Gb/s WDM architectures*, Proc. TERENA Networking Conference, May 31 – June 3, 2010, Vilnius, Lithuania. 5. Ungerman J. *Evolved programmable network and unified MPLS*. 6. ITU-T Recommendation G.709 (2003), *Interfaces for the Optical Transport Network (OTN)*. 7. Schmitt A. *Integrated OTN switching virtualizes optical networks INC*. JUNE 2012 <http://www.infinera.com/pdfs/whitepapers/infinera-wp-infonetics-integrated-otn-switching.pdf>. 8. Charzinski J. *Internet client traffic measurement and characterisation results // Proceedings of the 13th International symposium on services and local access, 2000*. 9. Melle S., Deore A., Turkcu O., Ahuja S., Hand S. J. *Comparing optical & OTN switching architectures in Next-Gen 100Gb/s networks // Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference, OFC/NFOEC'2013 (17–21 March 2013)*. – Anaheim, CA. – P.1–5. 10. Baliga J., Ayre R., Hinton K., Sorin W. V., Tucker R. S. *Energy consumption in optical IP Networks*. *Journal of Lightwave Technology*, 27(13):2391–2403, 2009. 11. Idzikowski F. *Power consumption of network elements in IP over WDM networks*. – Berlin. – 2009. – 74 P. 12. O'Mahony M. J., Simeonidou D., Hunter D. K. and Tzanakaki A. *The application of optical packet switching in future communication networks // Communications Magazine, IEEE*, 39(3):128–135, mar 2001.