

**МОДЕЛІ ТА АЛГОРИТМИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ  
КОМУТАЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПОТОКІВ В ПОВНІСТЮ  
ОПТИЧНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ**

© Корецький О.В., Думич С.С., 2013

O.V. Koretsky, S.S. Dumych  
Lviv Polytechnic National University**MODELS AND ALGORITHMS OF DATA FLOWS SWITCHING  
EFFICIENCY IMPROVING IN ALL-OPTICAL TELECOMMUNICATIONS  
SYSTEMS**

© Koretsky O.V., Dumych S.S., 2013

Modern optical networks still in development to AON (All-Optical Networks). The main goal of all related works is providing the state-of-the-art optical switching techniques, designing of new solutions and applications. The first stage in this development was circuit-switched optical networks. In those types of networks the incoming request would dropped in case of channel blocking. Another case – packet-switched optical networks. In those networks, the data flows divided onto many independent packets. Nowadays, this technique is the most famous. The main advantage of this technique is possibilities of queues. In case of channel blocking, the packet stills in buffer, until it will sent or dropped. The next generation of optical switching is Optical Burst Switching technology. Optical burst switching (OBS) is a promising solution for all-optical wavelength-division multiplexing (WDM) networks. It offers to some extent the flexibility and efficient bandwidth usage of optical packet switching networks, while taking into account the limitations of the current all-optical technology. For this reason, it could seen as an intermediate technique between all-optical wavelength routing networks and optical packet switching networks. The OBS technology allows satisfying requirements of IPoDWDM conceptions, because of full compatibility with IP/Ethernet networks. The ingress edge node assembles incoming packets from the client terminals into bursts. The assembled bursts transmitted all-optically over OBS core routers, without any storage at intermediate nodes within the core. The signaling scheme in an optical burst-switched network is typically implemented using out-of-band burst header packets. In an out-of-band signaling scheme, the header associated with a burst transmitting on a different wavelength from the burst itself. The out-of-band header packet travels along the same route as the burst, informing each node along the route to configure its optical cross connect to open the necessary virtual channel for transmitting the burst with variable size. The mathematical model of the core node in the network with switching units, which describes the sequence of signaling packet processing, proposed in this paper. This model based on the matrix calculation, and able to implement on field programmable gate arrays. Furthermore, the model of IP-packet aggregation in the ingress node network that takes into account probability distribution of IP-traffic proposed. Simulation results determined that proposed algorithm 10 times reduces the IP-packet losses, providing the same bandwidth. We provide the simulation of optical burst switching network for different signaling schemes. Our experiment shows that the INI scheme is more flexible, and able to reconfiguration in dependence of traffic requirements. INI is able to combine advantages of both JET and TAW schemes. Using the INI signaling technique allows to increase the efficiency of wavelength routed networks taking into account properties of traffic.

**Keywords - traffic, OBS, IP, virtual channel.**

Розроблено математичну модель функціонування проміжного вузла в мережі з комутацією блоків, яка описує послідовність обробки сигналізаційного пакету. Дана модель адаптована під матричні обчислення, що дозволяє реалізувати її на основі програмованих логічних інтегральних схем. Крім того, запропоновано модель агрегації IP-пакетів у крайовому вузлі мережі яка враховує ймовірнісний розподіл IP-трафіку, та дозволяє оцінити ймовірнісні характеристики блоків. В результаті моделювання було визначено, що при Пуассонівському розподілі вхідного IP-трафіку, розподіл розмірів блоків прямує до Гаусівського, за умови достатньої кількості пакетів у блоці. Запропонований алгоритм формування дозволяє знизити втрати IP-пакетів у 10 разів, при збереженні пропускну здатності каналу.

**Ключові слова – трафік, OBS, IP, віртуальний канал.**

### **Вступ**

З розвитком технології спектрального ущільнення каналів стрімко зросли обсяги пропускну здатностей, доступних на волоконно-оптичних лініях, однак, існуючі оптичні мережеві архітектури не в змозі в повній мірі використовувати цю пропускну здатність для підтримки динамічного та пульсуючого трафіку.

Повністю оптичні мережі з комутацією каналів дають можливість будувати оптичні магістралі, прозорі до використання будь-яких додатків з боку кінцевих мережевих вузлів. Але поряд з цією перевагою, відзначається і один їх недолік – мережі з комутацією каналів не можуть працювати з "вибуховим трафіком" від локальних мереж передачі даних [1]. У такому випадку впровадження повністю оптичних мереж з комутацією пакетів було б ідеальним, оскільки вони дозволяють значно ефективніше використовувати відведену смугу пропускання волоконно-оптичних каналів зв'язку.

Проте, практична реалізація оптичної пакетної комутації все ще обходиться занадто дорого. Це пов'язано зі значними витратами на розробку, а також із певними технологічними бар'єрами. Найбільш характерна проблема – недостатній ресурс оптичного запам'ятовуючого пристрою з довільною вибіркою (буфера) [2]. Ще одна серйозна проблема – забезпечення вимог щодо синхронізації між численними IP-пакетами, які надходять на різні порти оптичного комутаційного пристрою, а також між заголовками пакетів і їх корисним навантаженням.

З метою усунення проблем, пов'язаних із складністю пакетної комутації, а також спрощення мережевого устаткування, виникла нова концепція – оптична комутація блоків (OBS). Дана концепція поєднує кращі сторони оптичної каналної та пакетної комутації, і, що важливо, одночасно виключає властиві їм недоліки. Однією з існуючих базових проблем комутації в мережах OBS є перевантаження на вузлах, зумовлене стрибками інтенсивності вхідного трафіку.

### **Архітектура та принципи функціонування оптичної мережі з комутацією блоків**

Технологія OBS дає змогу ефективно використовувати смугу пропускання завдяки статичному мультиплексуванню блоків. При цьому посилка по окремому каналу управління керуючих пакетів, що несуть інформацію про маршрутизацію, а також можливість передачі відповідних блоків із затримкою (offset time) можуть взагалі усунути потребу у використанні FDL. Водночас, використання спеціальних форматів сигналізаційних пакетів дозволяє знизити вимоги до синхронізації в мережі. Технологія OBS призводить до появи довгоочікуваного інтегрованого рішення IP over DWDM, яке дозволяє поступово позбуватися від надмірності мережевих ресурсів і збільшує ефективність функціонування мережі.

На сучасному етапі розвитку транспортних мереж можна виділити три основні відмінності комутації блоків від каналної та пакетної комутації:

- блок займає проміжне (за розміром/тривалістю) місце між такими фундаментальними об'єктами інших видів комутації, як виклик (сеанс) і пакет;
- блок може бути відправлений без підтвердження здійснення успішної комутації (односторонній процес), а в разі каналної комутації дані відправляються тільки після отримання інформації про

стан каналу (двосторонній процес). Тому процес виділення необхідної смуги пропускання для блоку є більш оперативним;

- у процесі комутації блоків їх проходження через транзитні мережеві вузли здійснюється без буферизації, в той час як при пакетній комутації пакет повинен спочатку запам'ятовуватися, а лише потім прямує далі (в результаті цього складність вузла зростає).

У мережі з комутацією блоків вхідний трафік від терміналів мережі доступу збирається на вхідному вузлі, сортується та групується у блоки змінної довжини [3]. Перед передачею блоку контрольний пакет направляється до вузла призначення для попереднього резервування оптичного шляху з підтвердженням або без нього в залежності від протоколів транспортного рівня. Розділення контрольної та інформаційної частин дозволяє уникнути необхідності в оптичних буферах пам'яті та оптичній логіці. На вихідному вузлі блоки розбираються на пакети та спрямовуються по відповідних напрямках у мережі доступу (рис.1).

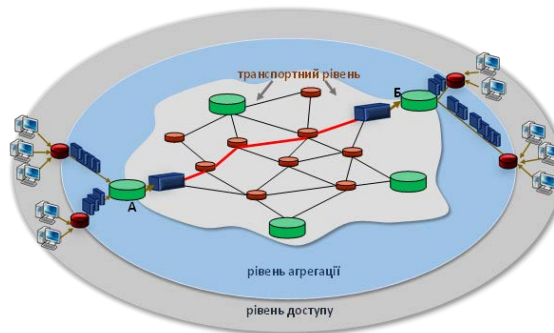


Рис. 1. Архітектура оптичної мережі з комутацією блоків

Оптична мережа з комутацією блоків складається з двох основних типів функціональних елементів: крайових вузлів та проміжних (прозорих) вузлів [4]. Крайові вузли відповідають за агрегацію низькошвидкісних потоків від мереж доступу та формування блокового трафіку.

### Функціональна модель крайового вузла та порівняння схем агрегації блоків

Крайовий вузол мережі з комутацією блоків призначений для формування оптичних блоків з IP пакетів які надходять в електричному представленні від класичних IP-мереж. Функціональна схема крайового вузла мережі OBS зображена на рис. 2.

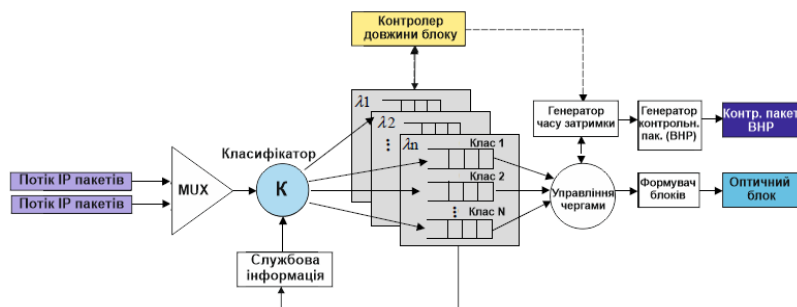


Рис. 2. Функціональна модель крайового вузла OBS мережі

Представлена на рис. 2 модель крайового вузла описує послідовність процесу утворення оптичного блоку та генерації контрольного пакету. Першим кроком є агрегація IP трафіку з мережі доступу в один потік, складові якого класифікуються у відповідності до пріоритетності. В IPv4 поле типу сервісу (Type of Service, TOS) в заголовку містить інформацію про один з можливих класів сервісу: низька затримка, висока пропускна здатність, висока надійність тощо. Можливо отримати до 8 різних класів сервісу. При переході до стандарту IPv6 поле TOS замінилось полем пріоритету (Prio), що дозволяє відправникові призначати данограмі певний рівень пріоритету по відношенню до інших пакетів. Можливі 16 значень цього поля розділені на дві категорії: значення поля від 0 до

7 використовується для данограм, які можуть не передаватися при занадто переповненій лінії. Сюди відноситься TCP – трафік, передача e-mail, FTP, NFS, TELNET, X-interactive. Значення поля від 8 до 15 призначаються пакетам, які повинні бути відправлені при будь-якому стані (крім обриву) лінії. Наприклад, пріоритет 8 користувач може призначити пакетам, які він може дозволити собі відправити в останню чергу при перевантаженій лінії, а пріоритет 15 – в першу. Останні представляють собою пакети реального часу з відео-, аудіо-та аналогічними даними, які повинні передаватися з постійною швидкістю.

Другою ознакою класифікації виступає інформація маршрутизації про комбінацію волокна (номера порту) та довжини хвилі. Довжина блоку визначається контролером виходячи з інтенсивності вхідного трафіку (довжини черги з IP пакетів) та класу пакетів (QoS). Час затримки між посиланням контрольного пакету та блоку даних залежить від класу пакету, та, як наслідок, параметрів схеми сигналізації.

Запропонована структура контрольного пакету зображена на рис.3. ВНР містить індекс довжини хвилі для комутації та хвильової конверсії.



Рис.3. Структура контрольного пакету

Враховуючи, що в одному волокні можна ущільнювати понад 100 довжин хвиль, під індекс довжини хвилі виділяється 8 біт. Для 8 різних класів сервісу при отриманні пакетів IPv4 необхідно 3 біти. Проте, як зазначено вище, при переході до IPv6 можливо до 16 значень пріоритетності, що окреслює необхідність використання 4 бітів під це поле. Час затримки визначає інтервал часу, між приходом контрольного пакету та блоку даних. Час затримки має бути квантованим до дискретного переліку величин, кратного 256. На кожному проміжному вузлі вздовж шляху даний параметр набуває меншого значення. Час затримки (offset time) може бути використаний як «час існування» (аналог поля Time to Live в IPv4) в OBS мережі. Між контрольними пакетами встановлюються захисні інтервали, що дозволяє подолати невизначеність в часі прибуття пакетів.

Фаза збирання блоків з IP-пакетів на крайових вузлах OBS мережі є однією з найбільш вагомих частин процесу оптичної комутації блоків. Важливим фактором при агрегації пакетів у блоки є критерій визначення оптимального розміру блоку. Даний критерій суттєво впливатиме на зміну характеристик трафіку у мережі. Алгоритм формування блоків не повинен затримувати IP пакети занадто довго для формування великого блоку та, в той самий час, не повинен призводити до створення великої кількості малих блоків. Зазвичай використовуються алгоритми, що формують блок за критерієм максимального часу формування або мінімального розміру блоку, або враховують обидва фіксовані обмеження. В реальних мережах неможливо досягнути ідеальних результатів продуктивності мережі з точки зору ймовірності втрати пакетів, затримки, та пропускну здатності. З однієї сторони більший розмір блоку дає перевагу оскільки для передавання певного обсягу даних необхідна менша кількість блоків. Це дає перевагу з точки зору затримки, оскільки зменшується кількість ВНР пакетів, кожен з яких вносить додатковий час очікування. Ця перевага чітко виражена при передаванні великої кількості пакетів, які вимагають підтвердження, на значні відстані. Однак, переваги великого розміру блоку втрачаються, якщо має місце передавання пакетів, які потребують мінімальної затримки. При такому трафіку більш визначальним стає допустимий час очікування пакету в буфері під час агрегації блоку. Ця проблема спричинила появу численної кількості наукових праць, пов'язаних із вибором оптимального методу формування блоку для конкретних умов в мережі [5].

Як було доведено в ряді літературних джерел [6,7], інтенсивність надходження вхідних пакетів у крайовий вузол розподілена за нормальним законом, а трафік є самоподібним, що дозволяє припустити, що крайовий вузол мережі працює як система масового обслуговування G/M/1 із нормально розподіленим вхідним потоком та Пуассонівським розподілом розмірів вхідних IP-пакетів. Для даної моделі проведено моделювання процесу агрегації блоку при трьох різних методах формування (рис.4 – рис.6).

Отримані результати показують, що при використанні алгоритму формування блоку за критерієм завантаженості буфера, втрати пакетів в мережі відсутні (рис. 4,б). Однак, кількість блоків, які були передані перевищила 2000, у зв'язку із малими розмірами самих блоків (рис. 4,а), що негативно впливає на пропускну здатність мережі OBS. При використанні методу формування за критерієм часу очікування, розмір блоку був максимальним, а кількість блоків становила менше 1000, при тому ж обсязі переданих даних (рис. 5,а). Тобто, пропускну здатність в мережі для такого методу максимальна. Проте, при високій інтенсивності трафіку, даний метод допускає перевантаження буфера і, як наслідок, втрати вхідних IP пакетів – близько 30% (рис. 5,б).

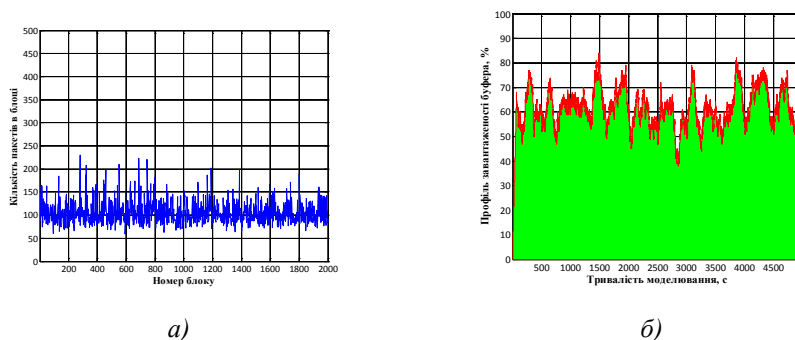


Рис.4. Розподіл кількості пакетів в блоці – а), та завантаженість буфера – б), для методу формування по критерію завантаженості буфера.

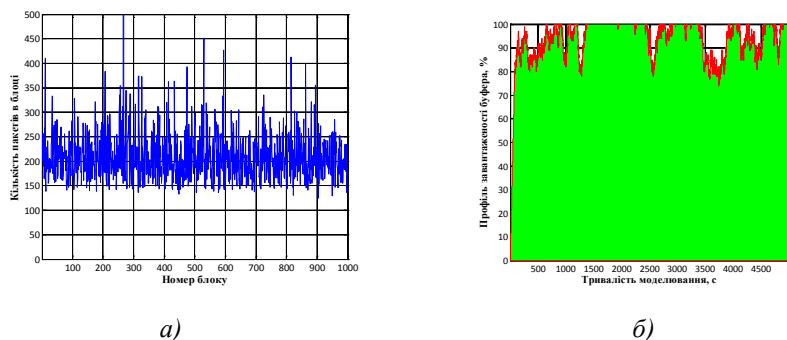


Рис.5. Залежність кількості пакетів в блоці – а), та завантаженість буфера – б), для методу формування по критерію часу очікування.

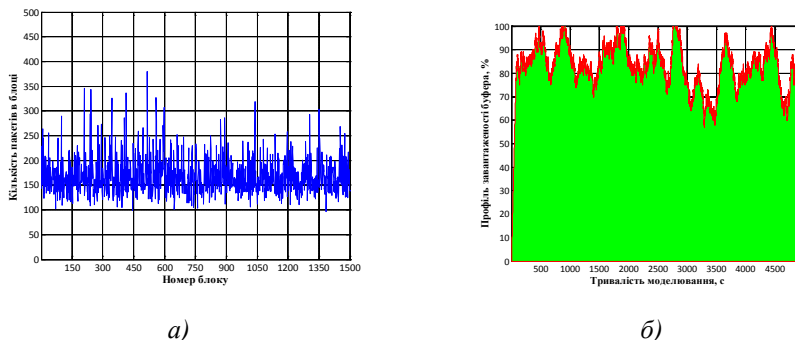


Рис.6. Залежність кількості пакетів в блоці – а), та завантаженість буфера – б), для адаптивного методу формування.

За адаптивного методу формування, критерій готовності блоку до відправки вибирається в залежності від конкретних умов. При невисокій інтенсивності вхідного навантаження блок формується по критерію часу очікування. Однак, при зростанні інтенсивності надходження пакетів у буфер, виникають перевантаження, і вузол автоматично змінює критерій формування блоку. Як показано на рис. 6,а розмір блоку коливається, і може приймати значення характерні для обох розглянутих вище методів. При такому методі формування, досягається оптимальний баланс між пропускною здатністю мережі OBS та ймовірністю втрати пакету, яка для даного випадку становить 3%, що є допустимою величиною.

### Функціональна модель проміжного вузла мережі з комутацією блоків

Проміжний вузол мережі OBS складається з двох паралельних ланок. Перша ланка є повністю прозорою, і відповідає за комутацію блоків з одного із вхідних портів, на один з вихідних. Друга ланка є опто-електро-оптичною та відповідає за наступні операції [8]: оброблення вхідних контрольних пакетів ВНР, аналіз класу QoS кожного оптичного блоку який необхідно передати, вибір віртуального каналу за алгоритмом маршрутизації блоків, формування комутаційної матриці перемикачів оптичного комутатора, перерахунок часу затримки для блоків, генерація та передавання контрольних пакетів до наступних вузлів згідно попередньо визначених маршрутів.

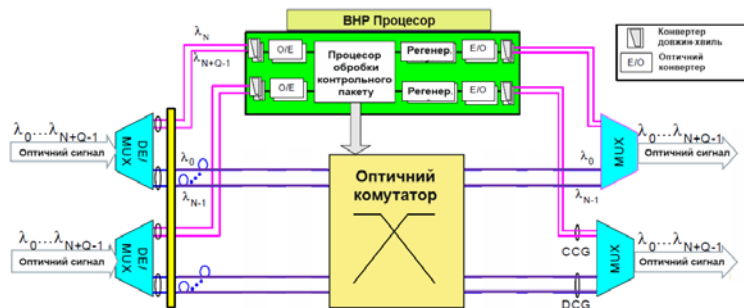


Рис. 7 Функціональна модель проміжного вузла

Розглянемо по кроках процес функціонування вузла зображеного на рис. 7.

**Крок 1.** Вхідні контрольні пакети, структура яких була представлена на рис.3, перетворюються з оптичного представлення в електричне для подальшої їхньої обробки процесором контрольних пакетів, який реалізований на програмованих логічних інтегральних схемах (ПЛІС). За рахунок паралельності ПЛІС всі блоки передаються на обробку одночасно, без черг.

**Крок 2.** В ПЛІС зчитуються поля пакетів ВНР, і дані отримані з цих полів передаються для подальшого оброблення. Поля контрольного пакету містять інформацію про адресу вузла призначення, номер проміжного вузла, клас сервісу, час затримки та розмір блоку.

**Крок 3.** За алгоритмом маршрутизації, визначається множина із шляхів до вузла призначення, для вхідного блоку.

**Крок 4.** ПЛІС реконфігурує оптичний комутатор для вхідних блоків.

**Крок 5.** Генерація та відправлення нових ВНР пакетів до вузлів призначення згідно з визначеними каналами.

### Моделювання характеристик оптичної мережі з комутацією блоків

Для моделювання затримки та ймовірності втрати блоку в програмному пакеті NS-2 було реалізовано довільну топологією з великою кількістю вузлів (рис.8). Крайовий вузол вибирає шлях за яким буде відправлений блок маючи інформацію про топологію до певного рангу. Однак з його сторони неможливо визначити інформацію про завантаженість каналу в певний момент часу. Крім того, мережі з оптичною комутацією блоків базуються на розділенні інформаційних та службових каналів. Як вже було сказано у попередньому пункті, інформаційні канали є повністю прозорі для передавання блоків, а службові – здійснюють обробку пакетів ВНР. Відповідно, основним

призначенням сигналізаційних схем є узгодження моментів приходу блоків на кожному комутаційному вузлі. Тому, вузол відправник повинен вибрати сигналізаційну схему, за якою він буде пересилати даний блок. У літературних джерелах [9] доведено, що схема сигналізації впливає на тривалість очікування блоку у крайовому вузлі, а також на ймовірність втрати блоку.

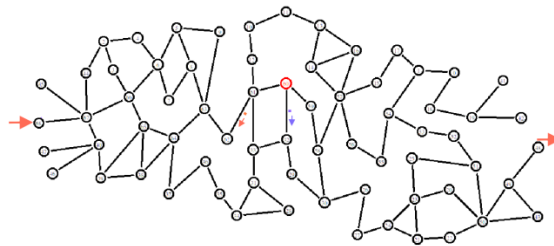


Рис. 8. Випадкова топологія мережі з 80 вузлами

Для спрощення процедури порівняння схем сигналізації, в усіх лініях встановлена затримка поширення – 1 мс (200 км). Затримка обробки ВНР в проміжному вузлі становить 1 мс. Затримка блоку у вузлі – 100 мкс. Вузол 68 вибирає шлях за яким буде відправлений блок маючи інформацію про топологію до певного рангу. Однак з його сторони неможливо визначити інформацію про завантаженість каналу в певний момент часу. Тому вузол відправник повинен вибрати сигналізаційну схему, за якою він буде пересилати даний блок. При виборі схеми JET, контрольний пакет пересилається до вузла 48 за обраним маршрутом без повернення. Для даного випадку алгоритм вибрав шлях 20 рангу: {68-67, 67-66, 66-65, 65-64, 64-63, 63-62, 62-61, 61-60, 60-59, 59-58, 58-57, 57-56, 56-55, 55-54, 54-53, 53-52, 52-51, 51-50, 50, 49, 49-48}, по якому був відправлений пакет ВНР. Для спрощення процедури порівняння схем сигналізації, в усіх лініях встановлена затримка поширення – 1 мс (200 км). Затримка обробки ВНР в проміжному вузлі становить 1 мс. Затримка блоку у вузлі – 100 мкс. Таким чином час очікування блоку у крайовому вузлі становить:

$$t_{OT\_JET} = (2n - 1) - (n + (n - 1) \cdot 0.1) = 39 - 21.9 = 17.1 \text{ мс} \quad (1)$$

$$t_{OT\_TAW} = (3n - 1) = 59 \text{ мс}$$

З (1) видно, що з точки зору часу резервування каналу оптимальнішою є схема JET. Однак, дана схема допускає втрати блоків, оскільки канал може не зарезервуватись на одному із вузлів. Тому, така схема доцільна лише для блоків, які можуть бути безповоротно втрачені. Для блоків, які потребують підтвердження, доцільно використовувати схему TAW. Дана схема не допускає втрати блоків, однак час очікування блоку значно більший (59 мс), що може привести до переповнення буфера. В якості альтернативи вибирається схема INI, яка полягає у встановленні проміжного вузла на шляху, до якого схема працює з підтвердженням як TAW, а після нього як JET. На рис. 8 показано як, після приходу до вузла 60, контрольний пакет обробляється у вузлі, після чого вузол відсилає новий ВНР до вузла 48, та пакет підтвердження до вузла 68. Причому, після 60го вузла, контрольний пакет ВНР передається до вузла призначення без підтвердження. Вузол 68 пересилає блок після отримання підтвердження від проміжного вузла 60. Час очікування блоку при такій схемі становить:

$$t_{OT\_INI} = n + 1 = 21 \text{ мс} \quad (2)$$

Як видно з (2) значення часу очікування блоку для INI значно нижче у порівнянні із TAW, і не набагато перевищує значення для JET. Однак, така схема дозволяє реалізувати підтвердження про те, що канал успішно зарезервований на ділянці мережі з максимальною ймовірністю блокування, що значно зменшує ймовірність втрати блоку в мережі OBS. Результати моделювання затримки та ймовірності втрати блоку в залежності від рангу шляху віртуального каналу представлені на рис.9.

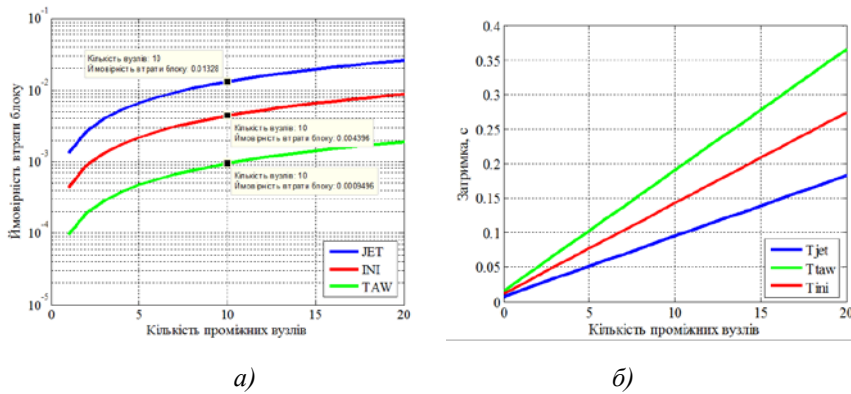


Рис. 9. Залежності величини затримки – а) та ймовірності втрати блоку – б)

### Висновок

Розроблено математичну модель функціонування проміжного вузла в мережі з комутацією блоків, яка описує послідовність обробки сигналізаційного пакету. Структура полів сигналізаційного пакету розроблена таким чином, щоб враховувати вимоги до блоків, а також їхні параметри та моменти відправки. Дана модель адаптована під матричні обчислення, що дає змогу реалізувати її на основі програмованих логічних інтегральних схем. Запропоновано модель агрегації IP-пакетів у крайовому вузлі мережі яка враховує ймовірнісний розподіл IP-трафіку, та дозволяє оцінити ймовірнісні характеристики блоків. В результаті моделювання встановлено, що, за Пуассонівського розподілу вхідного IP-трафіку, розподіл розмірів блоків прямує до Гаусівського за умови достатньої кількості пакетів у блоці. Запропонований алгоритм формування дозволяє знизити втрати IP-пакетів у 10 разів зі збереженням пропускну здатності каналу. Порівнявши різні схеми сигналізації у оптичній мережі з комутацією блоків шляхом моделювання, встановлено, що недоліком схеми з підтвердженням (TAW) є великий час резервування каналу. Проте, дана схема гарантує доставку блоку. З іншого боку, в схемі без підтвердження (JET) доставка блоку не гарантується, але сумарна затримка значно менша. Тому найдоцільнішим рішенням є вибір схеми з частковим підтвердженням (INI), яка дає змогу розрахувати оптимальне співвідношення між тривалістю передавання та ймовірністю втрати блоку і динамічно підлаштовуватись під параметри вхідного трафіку.

1. T. Krause. "Migration to All-Optical Networks". Alcatel Network Systems, 1998, <http://www.usa.alcatel.com/telecom/transpt/optical/techpaps/migration/>. 2. A. Varma, C. J. Changhasnain, K. Y. Lau. "SWANET: A Novel Self-Routed Wavelength-Addressable Optical Switching Network". 3. Jason P. Jue, Vinod M. Vokkarane *Optical Burst Switched Networks*, 2005. 3. T. Battestilli, H. Perros: *An introduction to optical burst switching*, IEEE Optical Communications, August 2003. 4. Стрихалюк Б.М, Думич С.С, Кайдан Н.В., Максимюк Т.А., Красько Е.В., Гуськов П.О. Математическая модель виртуального канала полностью оптической сети// Вестник Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2013. 5. K.Dolzer, C. Gauger: *On burst assembly in optical burst switching networks – a performance evaluation of Just-Enough-Time*. In *Proceedings of ITC 18*, pages 149-161, September 2001. 6. Климаш, М. М., Лаврів, О. А., Бугиль, Б. А., Бак, Р. І. (2011). Модель забезпечення параметрів якості обслуговування системи розподілу мультисервісного трафіку. Вісник НУ «Львівська політехніка». *Радіоелектроніка та телекомунікації*, (705), 138-144. 7. Ge, A., Callegati, F., & Tamil, L. S. (2000). *On optical burst switching and self-similar traffic*. *Communications Letters, IEEE*, 4(3), 98-100. 8. S. Dumych, T. Maksymuk, O. Krasko, and P. Guskov "The Virtual Channel Parameters Calculation in All-Optical Network". In *Proc. IEEE International Conference on The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics 2013 (CADSM 2013)*, p.87, Feb. 2013. 9. Gail C. Hudek and Douglas J. Muder, "Signaling Analysis for a Multi-Switch All-Optical Network," IEEE, *Int'l Conf. in Communications*, vol. 2, 1995, pp. 1206-1210.