

УДК 621.391

**М.М. Климаш (докт. техн. наук, проф.), О.В. Красько, Т.А. Максимюк**

Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів

кафедра телекомунікацій

E-mail: mklimash@lp.edu.ua, krasko.lena@gmail.com, taras.maksymyuk.ua@ieee.org

**МЕТОД СПЕКТРАЛЬНО-ЧАСОВОГО МУЛЬТИПЛЕКСУВАННЯ  
ІНФОРМАЦІЙНИХ ПОТОКІВ В ОПТИЧНИХ МЕРЕЖАХ ДОСТУПУ**

*Запропоновано метод спектрально-часового мультиплексування (OWTDM) в оптичних мережах доступу. На відміну від існуючих рішень, заснованих на використанні часового або спектрального мультиплексування, даний метод забезпечує гнучкість керування ресурсами, і забезпечує ефективне функціонування системи при різких стрибках інтенсивності навантаження. Результати моделювання показали, що метод спектрально-часового мультиплексування забезпечує вигаи на 7% з точки зору коефіцієнту використання каналу.*

**Ключові слова:** OWTDM, IPoDWDM, оптичні мережі доступу, коефіцієнт використання каналу.

**Загальна постановка задачі**

Стрімкий розвиток інформаційних сервісів в останні роки спричиняє зростання вимог до пропускної здатності каналів зв'язку, які під'єднані до кінцевих абонентів. На сьогоднішній час однією із найперспективніших технологій доступу є технології «волокно в дім» (FTTH – Fiber-to-the-Home) на основі пасивних оптичних мереж доступу (PON – Passive Optical Network) [1]. Існуючі пасивні оптичні мережі використовують часове мультиплексування каналів між різними користувачами, яке частково дозволяє регулювати пропускну здатність між окремими користувачами. Фактично, адаптивне регулювання пропускної здатності зводиться до зміни тривалості зайняття каналу кожним користувачем. Проте, при часовому регулюванні пропускної здатності порушується синхронізація кадрів Ethernet, що вимагає повторної ініціалізації часових інтервалів. Недоліком таких мереж є невисокий коефіцієнт використання корисної пропускної здатності у висхідному каналі, а також необхідність постійної синхронізації часових інтервалів між термінальним вузлом (OLT – Optical Line Terminal) та абонентським вузлом (ONU – Optical Network Unit), що потребує передавання значних обсягів службової інформації між цими вузлами. Саме тому необхідно розробити нові підходи до організації зв'язку в оптичних мережах доступу, які б дозволили усунути вище вказані недоліки. В [2] запропоновано кілька підходів різної складності, які дозволяють подолати проблеми неефективного використання смуги пропускання оптичних ліній зв'язку та великої затримки кадрів. В роботі [3] показано варіант застосування спектрального розділення каналів у пасивних оптичних мережах доступу.

В даній статті пропонується новий метод спектрально-часового мультиплексування каналів в пасивних оптичних мережах доступу, який дозволяє поєднати переваги як часового так і спектрального розділення каналів шляхом організації ресурсних блоків, які дозволяють адаптивне регулювання каналу зв'язку в залежності від вимог сервісу.

**Принципи передавання даних в пасивних оптичних мережах доступу**

Для організації взаємодії центрального вузла з абонентськими був розроблений протокол управління множиною вузлів MPCP (Multi-Point Control Protocol) [4]. Протокол базується на двох типах керуючих повідомлень: GATE і REPORT. Повідомлення GATE йдуть від OLT до всіх ONU. У них міститься інформація про режими мовлення,

ідентифікатор одержувача, часові мітки, тощо. У відповідь вузли ONU посилають на OLT повідомлення REPORT, в яких передають інформацію про свій стан. Протокольна діаграма взаємодії OLT та ONU показана на рис. 1.

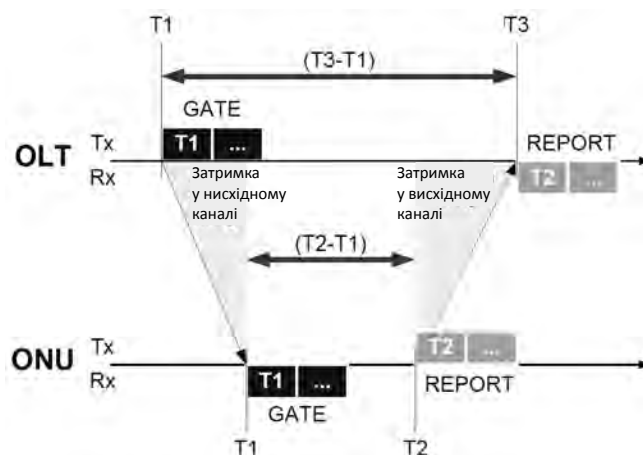


Рисунок 1 – Протокольна діаграма взаємодії OLT та ONU.

Повідомлення REPORT допомагають OLT правильно розподіляти смугу у зворотному потоці. Протокол MPCP має два режими роботи: режим ініціалізації і нормальний режим роботи. Відповідно, абонентські вузли можуть знаходитися в двох станах. Режим ініціалізації необхідний для того, щоб OLT міг виявити і зареєструвати нові вузли ONU.

У лінії вниз від OLT до користувачів здійснюється широкомовна розсилка кадрів. Кожен ONU виділяє свій кадр у проміжок часу який заздалегідь узгоджується з OLT (рис. 2).

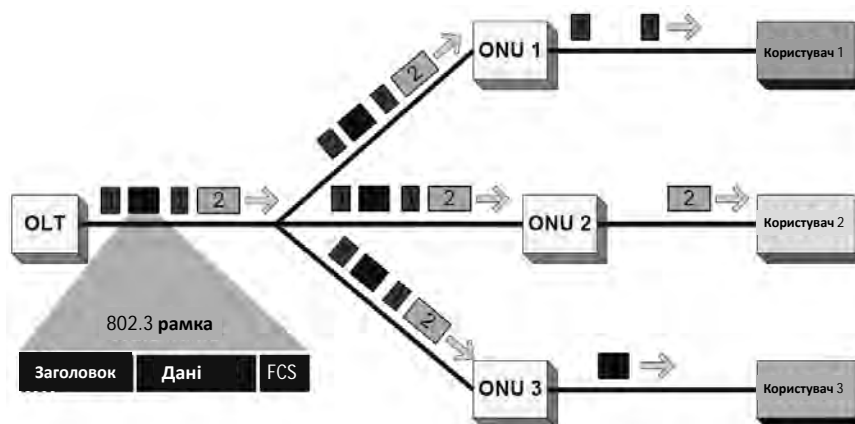


Рисунок 2 – Принцип часового мультиплексування в низхідному каналі

У лінії вгору, користувачі здійснюють одночасне передавання кадрів, проте кожен ONU формує їх у кадри фіксованого розміру, і передає в узгоджений з OLT проміжок часу (рис. 3).

При чому, якщо обсяг корисних даних є меншим від стандартного часового кадру, то він доповнюється нулями для того, щоб не порушувати синхронізацію. Це спричиняє суттєве погіршення коефіцієнту використання пропускної здатності каналів у транспортній мережі.

**Нова концепція взаємодії рівнів транспорту та доступу в оптичних телекомунікаційних мережах**

Архітектура IPoDWDM для транспортного рівня мережі, дозволяє знизити вимоги до рівня агрегації з точки зору сумісності форматів представлення інформаційних потоків [5].

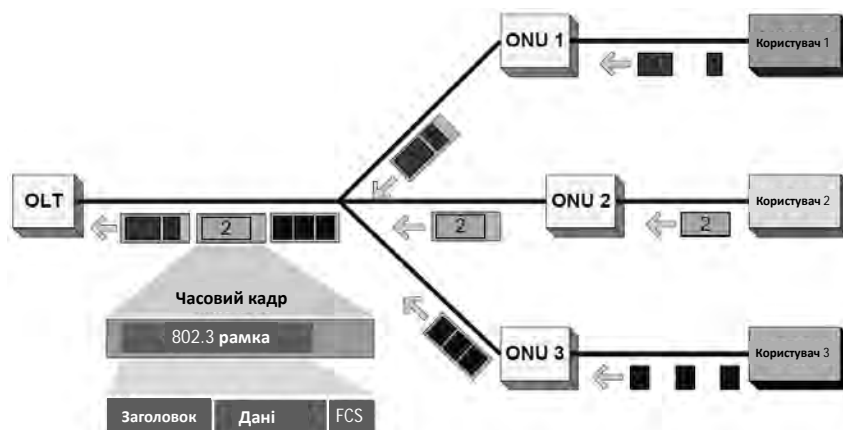


Рисунок 3 – Принцип часового мультиплексування у висхідному каналі

При використанні IPoDWDM на транспортному рівні, зникає необхідність виведення окремих каналів з транспортних модулів STM-n на рівні доступу, або потреба у виділенні окремих довжин хвиль [6].

Це з одного боку знижує вимоги до синхронізації, а з іншого підвищує коефіцієнт використання пропускної здатності системи за рахунок введення комбінованого методу спектрально-часового мультиплексування (OWTDM – Optical Wavelength Time Division Multiplexing) [7]. На рис. 4. представлено відмінності між старою (рис.4,а) та новою (рис.4, б) архітектурами оптичної мережі.

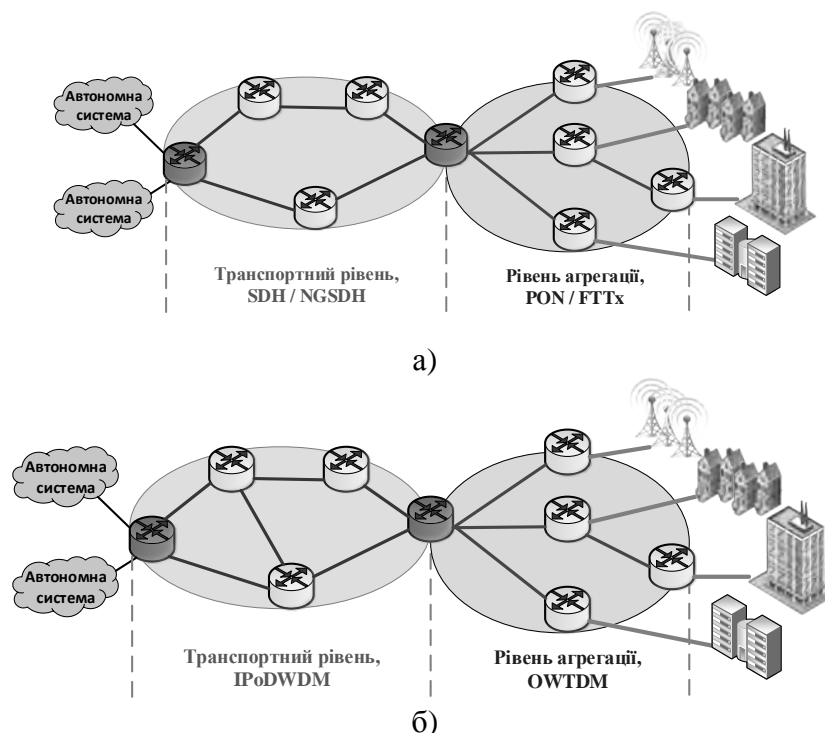


Рисунок 4 – Архітектура оптичної мережі SDH/PON – а) та нової архітектури IPoDWDM/OWTDM – б).

Після проходження IP-пакетів до термінального вузла OLT, виникає необхідність швидкого їх розділення між вузлами призначення [8]. Однією з існуючих проблем яка виникає у термінальному вузлі мережі є затримка при перетворенні агрегованого трафіку в абонентський трафік [9]. Дана затримка зумовлена тим, що вхідні пакети поступають на вхід послідовно. Термінальний вузол обробляє заголовок кожного пакету, аналізуючи його адресу

призначення та пріоритет [10]. При послідовному розподілі пакетів виникає затримка, зумовлена часом очікування окремих пакетів у буфері. Зменшення часу затримки, можна досягти двома шляхами: підвищення швидкості передавання в одному хвильовому каналі або збільшення кількості хвильових каналів [11]. Перший варіант є неприйнятним, оскільки подальше підвищення швидкості передавання даних в одному каналі суттєво обмежується нелінійними ефектами та дисперсією. Другий варіант більш ефективний з точки зору нарощування пропускної здатності каналу, але спричиняє неефективне використання ресурсів мережі.

Для того щоб ефективно використовувати пропускну спроможність мережі, і при цьому знизити затримку пакетів у термінальному вузлі OLT пропонується новий метод передавання зі спектрально-часовим мультиплексуванням каналів (OWTDM – Optical Wavelength-Time Division Multiplexing). Даний метод полягає у формуванні на виході крайового вузла спектрально-часової ресурсної сітки. Перевагою даного методу є можливість зміни кількості ресурсних елементів, які виділяються для одного користувача, що забезпечує гнучкість в керуванні пропускну здатністю каналу та покращує масштабованість мереж доступу.

Фізично це не ускладнює процес передавання, оскільки для оптичного волокна характеристики сигналу OWTDM аналогічні до характеристик звичайного сигналу WDM. Проте на каналному рівні дані розподіляються по ресурсним елементам які представляються у вигляді часових символів на окремих довжинах хвиль (рис. 5).

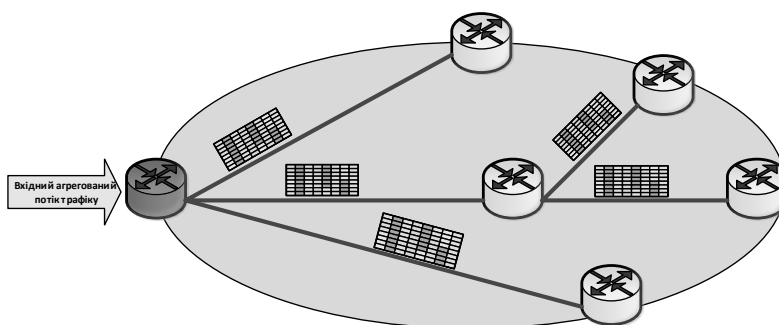


Рисунок 5 – Структурна схема організації потоків в оптичних мережах доступу

Відповідно, структура вихідного каскаду термінального вузла модифікується наступним чином (рис.6).

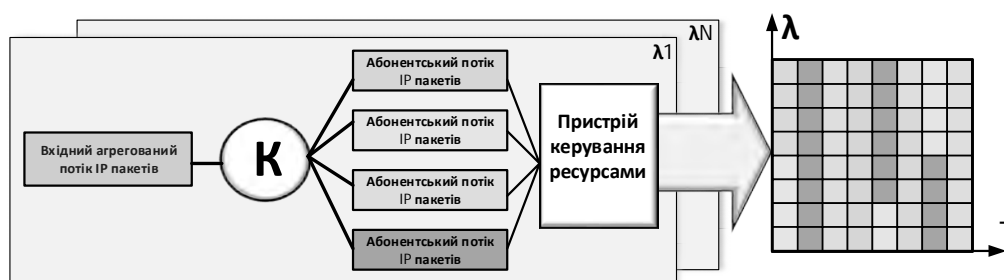


Рисунок 6 – Функціональна модель вихідного каскаду крайового вузла OBS мережі

Вхідний агрегований потік IP-пакетів подається на класифікатор, який формує з нього окремі абонентські потоки IP-пакетів, які мають різні адреси призначення та вимоги до пропускної здатності. Після цього, пристрій керування ресурсами розподіляє потоки по ресурсних елементах в залежності від вимог до пропускної здатності.

**Метод передавання даних зі спектрально-часовим мультиплексуванням в оптичних мережах доступу**

Для усунення недоліків мереж Gigabit Ethernet, запропонований метод OWTDM, який передбачає формування спектрально-часової ресурсної сітки, що дозволяє адаптивно

регулювати пропускну здатність для окремих користувачів. Практично цей метод реалізується на основі існуючих пасивних оптичних мереж, з незначною видозміною каналного рівня.

При використанні методу OWTDM OLT передає до окремих ONU ресурсні блоки розміром  $8 \times 8$ , що відповідає 8-м часовим інтервалам та 8-м використовуваним довжинам хвиль. Таким чином кожен ресурсний елемент буде мати розмірність  $t \times \Delta\lambda$ , а ресурсний блок буде мати розміри:

$$ORB = [(8 \cdot t) \times (8 \cdot \Delta\lambda)], \quad (1)$$

де  $t, \Delta\lambda$  – тривалість і рознесення по довжинам хвиль, відповідно.

Схема організації ресурсного поля системи OWTDM представлена на рис. 7.

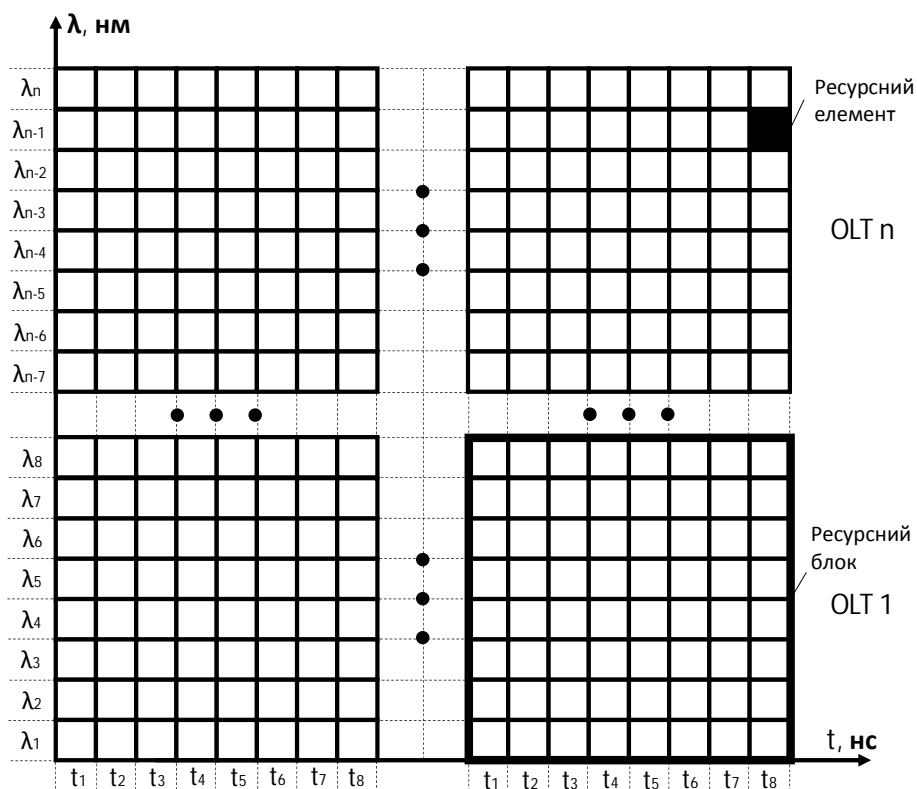


Рисунок 7 – Організація спектрально-часових ресурсів пасивної оптичної мережі доступу

Як зображено на рис.7, дані окремих користувачів розподіляються по часових інтервалах та довжинах хвиль відповідно. Дані, які призначені для різних OLT передаються різними наборами довжин хвиль які не перекриваються між собою, і можуть передаватись паралельно в одному волокні у транспортних сегментах мережі. Принцип функціонування пасивної мережі OWTDM показаний на рис.8.

Для порівняння ефективності запропонованого методу з існуючими було проведено порівняння коефіцієнту використання висхідного каналу при варіації інтенсивності навантаження для наступних вхідних умов:

- середній розмір пакету: 1 кб;
- кількість вхідних потоків: 24;
- інтенсивність вхідних потоків: 10 гбіт/с;
- тривалість моделювання: 50 год.

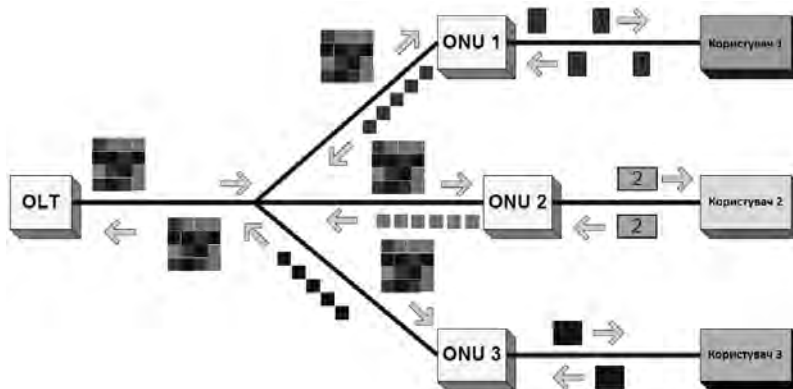


Рисунок 8 – Принцип мультиплексування в мережі OWTDM

На рис. 9 зображено профіль та густину розподілу ймовірності змодельованого вхідного трафіку:

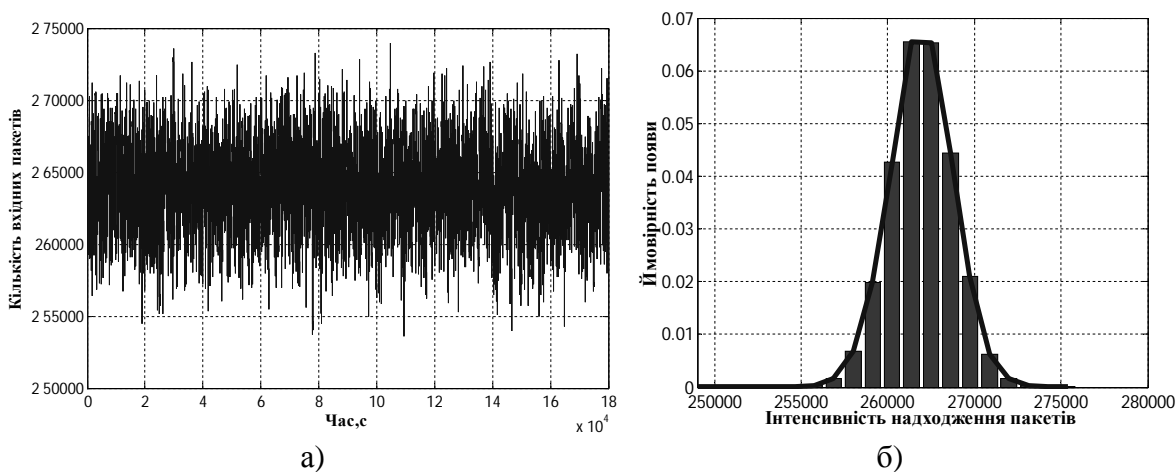


Рисунок 9 – Профіль – а) та густина розподілу ймовірності для змодельованого трафіку

Параметр Херста для змодельованого трафіку становить  $H=0.92$ . Інтенсивність надходження викликів розподілена за нормальним законом. Порівняльна залежність коефіцієнта використання пропускної здатності оптичних ліній зв'язку показана на рис. 9.

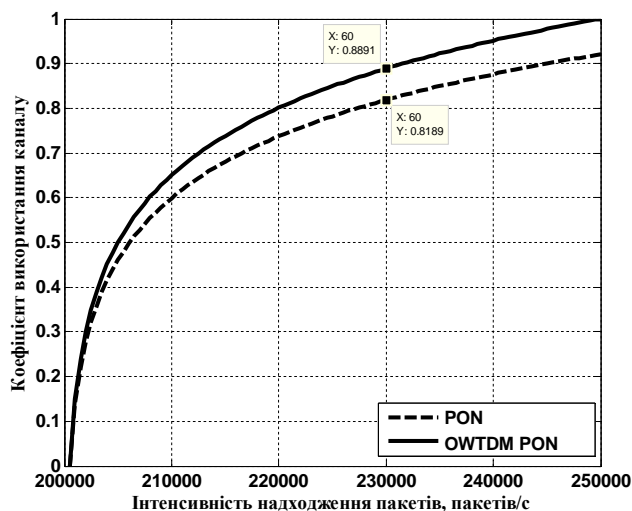


Рисунок 9 – Залежність коефіцієнту використання висхідного каналу від інтенсивності надходження пакетів

Результати моделювання підтверджують, що метод передавання OWTDM в пасивних оптичних мережах доступу ефективніше використовує доступну пропускну здатність. За рахунок переходу від часового мультиплексування до спектрально-часового покращується гнучкість використання ресурсів та усувається явище недовантаження висхідного каналу. Результати моделювання показують вигравш запропонованого методу приблизно на 7%, з точки зору коефіцієнту використання каналу.

#### **Висновки**

Запропоновано новий метод спектрально-часового мультиплексування (OWTDM) в оптичних мережах доступу. Даний метод реалізований на основі пасивних оптичних мереж, які інтегровані в загальну транспортну магістраль IPoDWDM. Особливістю запропонованого методу є використання технології спектрального-ущільнення каналів в мережі доступу, та формування спектрально-часової ресурсної сітки, згрупованої блоками з 8 довжин хвиль та восьми часових інтервалів. На відміну від існуючих рішень, заснованих на використанні часового або спектрального мультиплексування, даний метод забезпечує гнучкість керування ресурсами, і забезпечує ефективне функціонування системи при різких стрибках інтенсивності навантаження. Крім того, метод OWTDM уніфікує висхідний та низхідний канали в мережі PON, що зменшує кількість службової інформації та підвищує коефіцієнт використання висхідного каналу за рахунок усунення незайнятих часових інтервалів. Результати моделювання показали, що метод спектрально-часового мультиплексування забезпечує вигравш в коефіцієнті використання каналу на 7%.

#### **Список використаної літератури**

1. M. Nakamura. Proposal of networking by PON technologies for full and Ethernet services in FTTx / M. Nakamura, H. Ueda, S. Makino, T. Yokotani, K. Oshima // *Journal of lightwave technology*, vol. 22, No. 11, 2004, P. 2631.
2. K. Kanonakis. Improving the efficiency of online upstream scheduling and wavelength assignment in hybrid WDM/TDMA EPON networks / K. Kanonakis, I. Tomkos // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 28, No.6, 2010, P. 838-848.
3. A. Banerjee. Wavelength-division-multiplexed passive optical network (WDM-PON) technologies for broadband access: a review / A. Banerjee Y. Park, F. Clarke, H. Song, S. Yang, G. Kramer, B. Mukherjee // *Journal of optical networking*, vol. 4, No.11, 2005, P. 737-758.
4. X. Liu. Multipoint Control Protocol with Look-Ahead for Wavelength Division Multiplexed Ethernet Passive Optical Network / X. Liu, G.N. Rouskas, F. He, H. Xion // *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 6, No. 2, 2014, P. 104-113.
5. R. Sabella. Impact of Transmission Performance on Path Routing in All-Optical Transport Networks / R. Sabella, E. Iannone, M. Listanti, M. Berdusco, S. Beinetti // *IEEE Journal of Lightwave Technology*, №11, vol.16, 1998, P.1965-1972.
6. Effectiveness of Virtual Concatenation Algorithms for Next Generation SDH/SONET Networks [O. Krasko]: In Int. Conference [Computer Science and Engineering], Lviv Polytechnic National Univ., – Ukraine, – Nov. 2013.
7. Advanced Multi-Wavelength Data Transmission Method for Optical Access Networks, [O. Krasko, P. Huskov, T. Maksymyuk]: In Proc. of IEEE International Conference [Modern Problems of Radio Engineering Telecommunications and Computer Science (TCSET'2014)] (Lviv-Slavske), Feb. 2014.
8. Simulation of characteristics of optical burst switched networks [S. Dumych, P. Guskov, T. Maksymyuk, M. Klymash]: In Proc. IEEE International Conference [Microwave & Telecommunication technology (CriMiCo'2013)], (Sevastopol, Crimea), P. 492-493, 2013.
9. Simulation of Burst Aggregation and Signaling schemes for Optical Burst Switched Networks [S. Dumych, T. Maksymyuk and P. Guskov]: In Int. Conf. [Computer Science and Engineering], (Lviv Polytechnic National Univ., Ukraine), Nov. 2013.

9. K. M. Kissa. AOTFs Route Traffic in WDM Networks/ K. M. Kissa, D. J. Fritz // Lightwave, June, 1996, P. 64-66.
10. The Virtual Channel Parameters Calculation in All-Optical Network [S. Dumych, T. Maksymyuk, O. Krasko, P. Guskov]: In Proc. IEEE International Conference [The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM 2013)], P.87, Feb. 2013.

### References

1. Nakamura, M., Ueda, H., Makino, S., Yokotani, T. and Oshima, K., (2004), Proposal of networking by PON technologies for full and ethernet services in FTTx, Journal of lightwave technology, 22(11), P. 2631, 2004.
2. Kanonakis, K. and Tomkos, I., (2010), Improving the efficiency of online upstream scheduling and wavelength assignment in hybrid WDM/TDMA EPON networks, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 28(6), P. 838-848.
3. Banerjee, A., Park, Y., Clarke, F., Song, H., Yang, S., Kramer, G. and Mukherjee, B., (2005), Wavelength-division-multiplexed passive optical network (WDM-PON) technologies for broadband access: a review, Journal of optical networking, 4(11), P. 737-758.
4. Liu, X., Rouskas, G.N., He, F. and Xiong H., (2014), Multipoint Control Protocol with Look-Ahead for Wavelength Division Multiplexed Ethernet Passive Optical Network, Journal of Optical Communications and Networking, 6(2), P.104-113.
5. Sabella, R., Iannone, E., Listanti, M., Berdusco, M. and Beinetti, S.,(1998), Impact of Transmission Performance on Path Routing in All-Optical Transport Networks, IEEE Journal of Lightwave Technology, 16(11), P.1965-1972.
6. Krasko O., (2013), Effectiveness of Virtual Concatenation Algorithms for Next Generation SDH/SONET Networks, In Int. Conf. Computer Science and Engineering, Lviv Polytechnic National Univ., Ukraine, Nov. 2013.
7. Krasko O., Huskov P. and Maksymyuk T., (2014), Advanced Multi-Wavelength Data Transmission Method for Optical Access Networks, In Proc. IEEE International Conference on the Modern Problems of Radio Engineering Telecommunications and Computer Science (TCSET'2014), Feb.- Mar. 2014
8. Dumych S., Guskov P., Maksymyuk T. and Klymash M., (2013) Simulation of characteristics of optical burst switched networks, In Proc. IEEE International Conference on Microwave & Telecommunication technology (CriMiCo'2013), Sevastopol, Crimea, P. 492-493, Sep. 2013.
9. Dumych S., Maksymyuk T. and Guskov P., Simulation of Burst Aggregation and Signaling schemes for Optical Burst Switched Networks, In Int. Conf. Computer Science and Engineering, Lviv Polytechnic National Univ., Ukraine, Nov. 2013.
10. Kissa, K., M. and Fritz, D., J., (1996), AOTFs Route Traffic in WDM Networks, Lightwave, June, P. 64-66.
11. Dumych, S., Maksymyuk, T., Krasko, O. and Guskov, P., 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 (CADSM 2013), P.87,2013.

Надійшла до редакції:  
30.04.2014 р.

Рецензент:  
канд. техн. наук, доц. Стрихалюк Б.М.

**М.М. Климаш, О.В. Красько, Т.А. Максимюк**

**Национальный университет «Львовская политехника»**

**Метод спектрально-временного мультиплексирования информационных потоков в оптических сетях доступа. Предложен метод спектрально-временного мультиплексирования**



(OVTDM) в оптичних сетях доступа. В отличие от существующих решений, основанных на использовании временного или спектрального мультиплексирования, данный метод обеспечивает гибкость управления ресурсами, и обеспечивает эффективное функционирование системы при резких прыжках интенсивности нагрузки. Результаты моделирования показали, что метод спектрально-временного мультиплексирования обеспечивает выигрыш на 7% с точки зрения коэффициента использования канала.

**Ключевые слова:** OVTDM, IPoDWDM, оптические сети доступа, коэффициент использования канала.

**M.M. Klymash, O.V. Krasko, T.A. Maksymyuk**

**Lviv Polytechnic National University**

**Method of time-spectral data flows multiplexing in optical access networks.** The method of time-spectral channels multiplexing (OVTDM) for optical access networks was presented. In difference to existing solutions, which are based on time or spectral multiplexing, proposed method provide flexibility of resource management and effective system functioning in case of rapid traffic intensity increasing. Simulation results shown that time-spectral multiplexing provide 7% gain in terms of channel utilization.

**Keywords:** OVTDM, IPoDWDM, optical access networks, channel utilization.



**Климаш Михайло Миколайович**, Україна, закінчив Львівський державний університет ім. Ів.Франка., докт. техн. наук, професор, завідувач кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка» (вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79013, Україна). Член Академії зв'язку України і відділення Міжнародної академії інформатизації. Член IEEE Communication Society. Основний напрямок наукової діяльності – оптичні транспортні телекомунікаційні системи та мережі.



**Красько Олена Володимирівна**, Україна, закінчила кафедру «Телекомунікації» Національного університету «Львівська політехніка». Асистент кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка» (вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79013, Україна). Основний напрямок наукової діяльності – оптичні мережі доступу.



**Максимюк Тарас Андрійович**, Україна, закінчив кафедру «Телекомунікації» Національного університету «Львівська політехніка». Асистент кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка» (вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79013, Україна). Член IEEE Cloud Computing Community. Основний напрямок наукової діяльності – повністю оптичні транспортні системи.