

СМОЛЯР С. В., студентка гр. 2-VI-МТКТ,  
РАДЧЕНКО С. В., слухач,  
ЖУЧЕНКО О. С., к.т.н., доцент,  
ПРИХОДЬКО С. І., д.т.н., професор,  
ШТОМПЕЛЬ М. А., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

## Аналіз особливостей моделей оптичних транспортних мереж

*Розглянуто особливості побудови моделей оптичних транспортних мереж. Зазначено, що моделі мають спільні риси: ієрархічну рівневу побудову, де кожен рівень має самостійний і незалежний від інших рівнів набір функцій; наявність фізичного рівня; утворення трактів фізичного і віртуального характерів; рівні взаємодії з користувачем транспортної мережі. Зазначено відмінність моделей транспортних мереж SDH і ATM, яка полягає у тому, що транспортний ресурс мережі SDH надається в розпорядження користувачу постійно, незалежно від інформаційного потоку і з фіксованою швидкістю передачі, у той час як транспортні ресурси мережі ATM надаються в розпорядження користувачу лише при наявності потоку інформаційного навантаження. Обґрунтовано, що серед трьох мереж: SDH, ATM та OTN-OTN, найбільший транспортний ресурс може забезпечити тільки модель мережі OTN-OTN. Визначено, що мережа Ethernet надає високоякісні цифрові послуги, незважаючи на відносно дешеве рішення з транспортування мультимедійного трафіка до користувацьких терміналів.*

**Ключові слова:** модель, оптична мережа, транспортна мережа, телекомунікаційні технології, SDH, ATM, OTN-OTN, Ethernet.

### Постановка проблеми і аналіз літератури

З огляду на динамічне зростання потреб у передачі інформації, підвищення вимог до якості передачі, захищеності та керованості з'єднань, Міжнародний союз електров'язку (МСЕ-Т) та інші організації постійно розробляють нові та удосконалюють існуючі стандарти щодо передачі інформації в оптичних телекомунікаційних системах [1, 2]. Одним з основних напрямків діяльності МСЕ-Т стало прийняття концепції побудови транспортних мереж, опублікованої у вигляді рекомендації G.805, і розробки моделей транспортних мереж, що базуються на волоконно-оптичних та інших системах передачі [3]. Тому актуальною задачею є розгляд питань, пов'язаних з використанням різних моделей, запропонованих МСЕ-Т, при побудові оптичних транспортних мереж.

### Мета статті

Здійснення порівняльного аналізу особливостей моделей оптичних транспортних мереж для визначення шляхів подальшого розвитку телекомунікацій та сфери застосування відповідних телекомунікаційних технологій.

### Основна частина

На сьогодні оптичні транспортні мережі будуються на базі таких технологій та рекомендацій:

- транспортна мережа SDH, що описується рекомендаціями G.707, G.783, G.803 та ін.;
- транспортна мережа ATM, яка визначається рекомендаціями I.311, I.326 та ін.;
- транспортна мережа OTN-OTN, яка створюється за рекомендаціями МСЕ-Т G.709, G.872 та ін.;
- транспортна мережа Ethernet, що будується відповідно до рекомендацій G.8010, G.8011, G.8012 та ін. [3].

Нижче наведено характеристики даних моделей оптичних транспортних мереж та здійснено їх порівняльну оцінку.

1. Модель транспортної мережі SDH складається з трьох самостійних за своєю організацією рівнів (рис. 1).

Мережа ATM I.326	
Рівень адаптації ATM	AAL-1, AAL-2, AAL-3/4, AAL-5
Рівень ATM	Віртуальний канал (VCI)
	Віртуальний шлях (VPI)
Рівень середовища передачі	Суміщення з обладнанням передачі
	Обладнання передачі
	Середовище передачі
Волоконна оптика, мідні проводи, радіоканали	

Рис. 1. Схема моделі оптичної транспортної мережі SDH

Рівень середовища передачі базується переважно на оптоволоконних лініях, в яких створюються секції регенерації цифрових лінійних сигналів і секції мультиплексування цифрових даних. Середовище передачі містить: волоконні світловоди в конструкціях різних кабелів; електрооптичні перетворювачі на передачі і оптоелектронні перетворювачі на прийомі; оптичні підсилювачі, оптичні атенуатори і компенсатори дисперсії; роз'ємні і нероз'ємні оптичні з'єднувачі; лінійні кодери і декодери; оптичні модулятори і оптичні детектори.

Секцією мультиплексування починається і закінчується ділянка волоконно-оптичної системи передачі. Секція мультиплексування може містити від однієї до декількох ділянок – секцій регенерації, які необхідні для усунення спотворень лінійних імпульсних сигналів і відновлення їх форми і потужності. Секція мультиплексування разом із секціями регенерації може дублюватися з метою захисту від пошкоджень. Для цього дублююча (захисна) секція оснащується сигналами автоматичного перемикавання за інтервал часу не більше 50 мс.

Рівень трактів мережі SDH поділений на два підрівні: високого і низького порядку: віртуальний контейнер високого порядку (HOVC), віртуальний контейнер низького порядку (LOVC). Віртуальні контейнери високого і низького порядків є циклічними цифровими ємностями, що надаються під завантаження інформаційними даними з відповідними швидкостями. Завдяки безперервній циклічній передачі віртуальних контейнерів може підтримуватися односпрямоване і двоспрямоване транспортне сполучення – тракт або маршрут.

Рівень каналів мережі SDH забезпечує інтерфейси для користувачів транспортної мережі. На рівні каналів проводиться узгодження з вторинними мережами (користувачами), наприклад, з телефонними мережами через потоки цифрових даних 2,048 Мбіт/с (E1) [4].

Усі процедури формування цифрових блоків SDH відбуваються з використанням єдиного високостабільного тактового механізму – тактової мережевої синхронізації.

2. Модель транспортної мережі ATM також має три самостійні рівні (рис. 2).

Мережа ATM I.326	
Рівень адаптації ATM	AAL-1, AAL-2, AAL-3/4, AAL-5
Рівень ATM	Віртуальний канал (VCI)
	Віртуальний шлях (VPI)
Рівень середовища передачі	Суміщення з обладнанням передачі
	Обладнання передачі
	Середовище передачі
Волоконна оптика, мідні проводи, радіоканали	

Рис. 2. Схема моделі оптичної транспортної мережі ATM

Рівень середовища передачі в моделі транспортної мережі ATM може бути реалізований, відповідно до стандартів ATM, будь-якою системою передачі, наприклад, системами з плезіохронним мультиплексуванням (PDH) або системами синхронного мультиплексування (SDH). При цьому допускається використання будь-якого середовища і обладнання передачі.

Рівень ATM розбитий на підрівні віртуального каналу і віртуального шляху. Ці складові рівня ATM пов'язані з одиницями подання даних, що називаються комірками, і мають ємність 53 байти. Ця ємність поділена на поле заголовка довжиною 5 байтів і поле навантаження (сегмент користувача) довжиною 48 байтів. Заголовок містить ідентифікатори комірок. Завдяки цим ідентифікаторам комірки в загальному потоці розрізняються при демультимплексуванні і комутації.

Рівень адаптації ATM виконує функції інтерфейсу між транспортною мережею ATM з її віртуальними з'єднаннями і користувачами транспортних послуг (вторинними телекомунікаційними мережами), наприклад, телефонними мережами, мережею Інтернет, локальними мережами Ethernet і т. д. При цьому різним видам трафіка визначені різні типи рівневої адаптації (AAL-1, AAL-2, AAL-3/4, AAL-5), що передбачають формування різних за структурою сегментів для користувацького навантаження.

Відмінність моделей SDH і ATM полягає у такому: - транспортний ресурс мережі SDH – тракт високого або низького порядку – надається в розпорядження користувачу (вторинної телекомунікаційної мережі) постійно, незалежно від інформаційного потоку і з фіксованою швидкістю передачі, що часто є причиною низької ефективності

використання з'єднання, наприклад, у телефонії з комутацією каналів;

- транспортні ресурси мережі АТМ – віртуальний канал або віртуальний шлях, підтримувані комутаторами з маршрутними таблицями кожного з'єднання, – надаються в розпорядження користувача (вторинної телекомунікаційної мережі) лише при наявності потоку інформаційного навантаження, тобто коли комірки АТМ формуються і проходять через фізичне середовище. В іншому випадку середовище передачі надається потокам комірок інших джерел завдяки статистичному мультиплексуванню на рівні АТМ [3, 4].

3. Модель транспортної мережі OTN-OTN має два рівні, які у свою чергу складаються з підрівнів (рис. 3).

Мережа OTN-OTN G.872

Рівень користувача	PDH, SDH, ATM, Ethernet, GFP, RPR, ..., електричні і оптичні сигнали	
Рівень мережі OTN	Оптичний канал	OPUk, ODUk, OTUk, OCh
	Оптичні секції	Мультиплексування OMS
		Передача OTS
Середовище передачі сигналів WDM		

Волоконна оптика

Рис. 3. Схема моделі оптичної транспортної мережі OTN-OTN

Рівень мережі OTN складається з трьох фізично і логічно пов'язаних підрівнів: середовища передачі сигналів з поділом по довжині хвилі (WDM); оптичних секцій ретрансляції (OTS) і мультиплексування (OMS); оптичних каналів (OCh) з навантаженням у вигляді оптичних транспортних блоків (OTUk) з включенням у них блоків даних оптичних каналів (ODUk), які, у свою чергу, включають блоки корисного навантаження оптичних каналів (OPUk). Індекс  $k$  відповідає ієрархічному шаблю OTN ( $k = 1, 2, 3$ ) і вказує на різні за тривалістю, ємністю і швидкістю передачі цикли. Оптичні секції базуються на ресурсах одномодових волоконних світловодів зі стандартними характеристиками і смугою пропускання, яка досягає приблизно 30–60 ТГц у діапазоні хвиль 1260–1675 нм для різних типів волокон. Середовище передачі в цій моделі транспортної мережі дає змогу досягати швидкостей передачі близько 10 Тбіт/с при швидкості передачі в кожному з хвильових каналів від 2,5 до 40 Гбіт/с [5].

Оптичні секції ретрансляції (OTS) організовуються всередині оптичної секції мультиплексування (OMS) для компенсації втрат оптичної потужності в оптичному волокні та компенсації дисперсійних спотворень. Ці функції забезпечують лінійні оптичні домішкові волоконні підсилювачі з еквалайзерами, раманівські оптичні підсилювачі і компенсатори

хроматичної та поляризаційної дисперсії, а в перспективі повністю оптичні регенератори.

В оптичній секції мультиплексування формуються, передаються, обслуговуються і розформовуються окремі оптичні канали, оптичні хвильові модулі (OTM) із числом каналів до 16 (звані також оптичними транспортними модулями), а також групи оптичних модулів. Кожен оптичний модуль може мати окремий оптичний сервісний канал, в який включаються службові дані для кожного оптичного каналу (OCh).

Секція OMS може мати гарантований захист завдяки дублюванню передачі в альтернативній кабельній лінії з відповідними секціями ретрансляції.

У блоках OTUk і ODUk також застосовуються оптична модуляція і детектування, а також здійснюється контроль якості передачі цифрових даних.

Рівень користувача оптичної транспортної мережі OTN-OTN виконує функції інтерфейсу між транспортною мережею і мережами користувачів транспортних послуг, до яких належать мережі SDH, ATM, Ethernet та ін. Для ефективного узгодження між мережами застосовуються різні протокольні рішення. Наприклад, протокол загальної процедури формування кадру GFP, протокол пакетного кільця, що захищається, або пакетного кільця із самовідновлення RPR тощо. Дані протоколи дають можливість погоджувати циклічну передачу даних в оптичних каналах з випадковою в часі передачею пакетів даних різної ємності від користувачів, наприклад, пакети IP, MPLS або Ethernet.

З аналізу розглянутих моделей транспортних мереж випливає, що найбільший транспортний ресурс може забезпечити тільки модель мережі OTN-OTN. При цьому вона підтримує трансляцію даних мереж SDH і ATM. Очевидно, що модель мережі OTN-OTN призначена для глобального масштабу, тобто магістральних телекомунікаційних мереж з великим обсягом трафіка та для мереж міст із розвинутою телекомунікаційною інфраструктурою [3, 5].

4. Модель транспортної мережі Ethernet складається з двох рівнів (рис. 4).

Мережа Ethernet G.8010

Рівень формування Ethernet	Керування логічним каналом LLC
	Керування доступом до середовища передачі MAC
Середовище передачі кадрів Ethernet (PDH, SDH, ATM, OTN, ...)	

Волоконна оптика, мідні проводи, радіоканали

Рис. 4. Схема моделі оптичної транспортної мережі Ethernet

Дану модель було розроблено для взаємодії з обміну файлами (пакетами або кадрами даних) між

комп'ютерами в локальній мережі при використанні мідних проводів, конверторів сигналів і протоколу передачі даних з контролем колізій, тобто станів, коли по одній парі проводів одночасно починали передачу два і більше комп'ютерів. У такій якості ці мережі використовуються і сьогодні на коротких сегментах, що, як правило, не перевищують кількості метрів. Поява швидкодіючих пакетних комутаторів і волоконної оптики дала змогу різко збільшити швидкість передачі пакетів до 10 Гбіт/с та дистанцію передачі до сотень кілометрів.

Рівень середовища передачі мережі Ethernet може бути реалізований на базі мідних проводів, волоконних світловодів, радіоканалів та атмосферних оптичних каналів з використанням відповідних конверторів сигналів (приймачів-передавачів), що є характерним для локальних і міських телекомунікаційних мереж, і це є найбільш економічним рішенням щодо інших моделей транспортних мереж [3].

Рівень формування кадрів (пакетів) Ethernet складається з двох підрівнів: управління логічним каналом (LLC) і управління доступом до середовища передачі (MAC). Ці підрівні протокольні, тобто їхні функції запропоновані певними алгоритмами для процесорів, які формують кадри з інформаційними даними і службовими повідомленнями. Кадри з інформаційними даними створюються і відправляються випадково в часі. Мультиплексування кадрів, управління їх потоком, комутація їх у вузлах, спостереження з'єднань за потоком кадрів з кінця в кінець або по ділянках мережі – все це виконує рівень формування кадрів. Також він забезпечує інтерфейс із джерелами інформаційних даних (вторинними мережами, наприклад, мережами IP, MPLS і т. д.) [6].

Таким чином, зростання потреб у високоякісних цифрових послугах, таких як передача мови, програм звукового мовлення, телевізійних програм високої чіткості, відео за запитом, телеконференцій тощо, змусило звернути увагу на мережі Ethernet як на засоби відносно дешевого рішення з транспортування мультимедійного трафіка до користувацьких терміналів і як на засоби створення локальних та міських транспортних телекомунікаційних мереж. При організації передачі інформації на великі відстані (наприклад, більше 100 км) рівень середовища передачі може бути представлений транспортними мережами SDH, ATM, OTN або їх поєднанням і використанням плезіохронної передачі PDH.

## Висновки

З проведеного аналізу випливає, що подані моделі оптичних транспортних мереж мають спільні риси: використання ієрархічної багаторівневої побудови, де кожен рівень має самостійний і незалежний від інших рівнів набір функцій; наявність фізичного рівня; утворення трактів фізичного і віртуального характерів;

застосування рівнів взаємодії з користувачем транспортної мережі. Відмінність моделей транспортних мереж SDH і ATM полягає у тому, що транспортний ресурс мережі SDH надається в розпорядження користувачу постійно, незалежно від інформаційного потоку і з фіксованою швидкістю передачі, у той час як транспортні ресурси мережі ATM надаються в розпорядження користувачу лише при наявності потоку інформаційного навантаження. Серед мереж SDH, ATM та OTN-OTN найбільший транспортний ресурс може забезпечити остання модель мережі. Також визначено, що мережа Ethernet надає високоякісні цифрові послуги, незважаючи на відносно дешеве рішення з транспортування мультимедійного трафіка до користувацьких терміналів.

## Список використаних джерел

1. Iovanna, P. Future Proof Optical Network Infrastructure for 5G Transport [Text] / P. Iovanna, F. Cavaliere, F. Testa, S. Stracca, G. Bottari, F. Ponzini, A. Bianchi, R. Sabella // Journal of Optical Communications and Networking. – 2016. – Vol. 8, Issue 12. – P. B80-B92.
2. Albanese, I. Big File Protocol for OTN and Ethernet Transport Systems [Text] / I. Albanese, Y. O. Yazır, S. W. Neville, S. Ganti, T. E. Darcie // Journal of Optical Communications and Networking. – 2015. – Vol. 7, Issue 2. – P. 96-108.
3. Фокин, В. Г. Оптические системы передачи и транспортные сети [Текст]: учеб. пособие / В. Г. Фокин. – М.: Эко-Трендз, 2008. – 267 с.
4. Фриман, Р. Волоконно-оптические системы связи [Текст] / Р. Фриман; пер. с англ. под ред. Н. Н. Слепова. – М.: Техносфера, 2003. – 590 с.
5. Листвин, А. В. Оптические волокна для линий связи [Текст] / А. В. Листвин, В. Н. Листвин, Д. В. Швырков. – М.: ЛЕСАР Арт, 2003. – 288 с.
6. Олифер, В. Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы [Текст]: учебник для вузов / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. – 4-е изд. – СПб.: Питер, 2010. – 944 с.

**Смоляр С. В., Радченко С. В., Жученко А. С., Приходько С. И., Штомпель Н. А. Анализ особенностей моделей оптических транспортных сетей.** Рассмотрены особенности построения моделей оптических транспортных сетей. Отмечено, что модели имеют общие черты: иерархическое уровневое построение, где каждый уровень имеет самостоятельный и независимый от других уровней набор функций; наличие физического уровня; образование трактов физического и виртуального характеров; уровни взаимодействия с пользователем транспортной сети. Приведено отличие моделей транспортных сетей SDH и ATM, которое заключается

в том, что транспортный ресурс сети SDH предоставляется в распоряжение пользователю постоянно, независимо от информационного потока и с фиксированной скоростью передачи, в то время как транспортные ресурсы сети ATM предоставляются в распоряжение пользователю только при наличии потока информационной нагрузки. Обосновано, что среди трех сетей: SDH, ATM и OTN-OTH, наибольший транспортный ресурс может обеспечить только модель сети OTN-OTH. Определено, что сеть Ethernet предоставляет высококачественные цифровые услуги, несмотря на относительно дешевое решение по транспортировке мультимедийного трафика к пользовательским терминалам.

**Ключевые слова:** модель, оптическая сеть, транспортная сеть, телекоммуникационные технологии, SDH, ATM, OTN-OTH, Ethernet.

**Smolyar S., Radchenko S., Zhuchenko O., Prihodko S., Shtompel M. Analysis of the features of models of optical transport networks.** Features of construction of models of optical transport networks are considered. It is noted that the models have common features: a hierarchical level structure, where each level has an independent set of functions, which are independent of other levels; presence of physical level; the formation of paths of physical and virtual characters; levels of interaction with the user of the transport network. The difference between SDH and ATM transport models is in that the SDH network transport resource is provided to the user continuously, regardless of the information flow with the fixed transmission speed, while the transport resources of the ATM network are provided to the user only when the presence of a flow of information load. It has been substantiated that among the three networks: SDH ATM and OTN-OTH, only the OTN-OTH network model can provide the largest transport resource. It has been determined that the Ethernet network provides high-quality digital services, despite the relatively cheap solution for the transport of multimedia traffic to user terminals.

**Keywords:** model, optical network, transport network, telecommunication technologies, SDH, ATM, OTN-OTH, Ethernet.

Надійшла 24.09.2018

**Смоляр Софія Віталіївна, студентка групи 2-VI-MTKT, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: [tz@kart.edu.ua](mailto:tz@kart.edu.ua). <https://orcid.org/0000-0003-1443-7695>.**

**Радченко Сергій Васильович, слухач, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: [tz@kart.edu.ua](mailto:tz@kart.edu.ua). <https://orcid.org/0000-0001-6466-8104>.**

**Жученко Олександр Сергійович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортного зв'язку Українського державного університету залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: [tz@kart.edu.ua](mailto:tz@kart.edu.ua). <https://orcid.org/0000-0003-3275-810X>**

**Приходько Сергій Іванович, доктор технічних наук, професор, проректор з науково-педагогічної роботи Українського державного університету залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: [tz@kart.edu.ua](mailto:tz@kart.edu.ua). <http://orcid.org/0000-0001-6535-8351>**

**Штомпель Микола Анатолійович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортного зв'язку Українського державного університету залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: [shtompel.mykola@kart.edu.ua](mailto:shtompel.mykola@kart.edu.ua). <https://orcid.org/0000-0003-3132-8335>.**

**Smolyar S., student, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: [tz@kart.edu.ua](mailto:tz@kart.edu.ua). <https://orcid.org/0000-0003-1443-7695>.**

**Radchenko S., listener, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: [tz@kart.edu.ua](mailto:tz@kart.edu.ua). <https://orcid.org/0000-0001-6466-8104>.**

**Zhuchenko O., Candidate of Sciences (Technology), Associate Professor (Docent), Associate Professor at the Department of Transport Communication, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: [tz@kart.edu.ua](mailto:tz@kart.edu.ua). <https://orcid.org/0000-0003-3275-810X>**

**Prihodko S., Vice-rector for scientific and pedagogical work of Ukrainian State University of Railway Transport, Doctor of Technical Sciences, professor, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: [tz@kart.edu.ua](mailto:tz@kart.edu.ua). <http://orcid.org/0000-0001-6535-8351>**

**Shtompel M., Candidate of Sciences (Technology), Associate Professor (Docent), Associate Professor at the Department of Transport Communication, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: [shtompel.mykola@kart.edu.ua](mailto:shtompel.mykola@kart.edu.ua) <https://orcid.org/0000-0003-3132-8335>.**