

УДК 621.396.2;621.315.21:611.7.068

Климаш М.М., Чернихівський Є.М., \*Олексін М.І.  
 Національний університет “Львівська політехніка”,  
 \*ВАТ “Укртелеком”

## ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ОПТИЧНИХ ЛІНІЙНИХ ТРАКТІВ МАГІСТРАЛЬНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

© Климаш М.М., Чернихівський Є.М., Олексін М.І., 2003

*Розглянуто типову структуру оптичного лінійного тракту, основні параметри оптичних систем передачі, фактори, що впливають на величину цих параметрів, , а також використання технології спектрального ущільнення каналів DWDM та технології SDH на транспортній мережі України.*

*Considered typical structure of optical single-line tract, main parameters of optical issue systems, factors, which influence upon the value of these parameters, , as well as using a technology of spectral compaction of channels DWDM and SDH technologies on transport network of Ukraine.*

Магістральні мережі зв'язку на сучасному етапі характеризуються різким зростанням об'ємів інформації, яку необхідно передавати на значні відстані. Впровадження обладнання SDH з інтерфейсами STM-16\64 (2,5 і 10 Гбіт\с), лабораторне тестування систем STM-256 (40 Гбіт\с) роблять актуальним питання вдосконалення існуючих і розробку нових стандартів волоконно-оптичних систем передачі. На сьогоднішній день все ширшого використання набувають системи з спектральним ущільненням каналів DWDM. В експлуатацію вже введені 32-канальні системи DWDM, але очевидно, що попит на високу пропускну здатність на цьому не зупиниться, тому ведуться дослідження з подальшого збільшення пропускну здатності лінійних трактів.

При використанні DWDM систем виникає ряд проблем, що обмежують можливості цієї технології. Оскільки інтервал 50-100 ГГц між каналами передбачає досить вузький діапазон робочих частот, великий вплив має стабільність випромінення лазера, а також наявність бокових пелюстків випромінення, що можуть мати вплив у сусідніх каналах. Для зменшення впливу цих факторів використовують стабілізовані DFB лазери.

Іншими важливими компонентами мережі з DWDM ущільненням є мультиплексори і демультимплексори, які об'єднують окремі оптичні канали в єдиний оптоволоконний тракт, а потім розділяють їх на приймальній стороні. При цьому смути пропускання каналів повинні точно відповідати вибраним довжинам хвиль, щоб уникнути перехресних завад, а позасмугове затухання повинно бути досить високим, щоб уникнути міжканальних впливів і впливу бокових пелюстків випромінення. Крім цього, вони повинні забезпечити тільки допустиме зміщення центральної довжини хвилі лазера без суттєвого послаблення сигналу.

Оптичні підсилювачі, як правило EDFA, забезпечують економічну експлуатацію мережі з DWDM ущільненням за рахунок суттєвого підсилення всіх каналів, незалежно від схем модуляції і використовуваних протоколів. Але при створенні мережі, особливо коли окремі канали містять декілька підсилювачів, необхідно врахувати залежність підсилення EDFA від довжини хвилі. Також показники шуму EDFA впливають на цілісність оптичного

сигналу, вони і будуть визначати необхідну кількість підсилювачів і, як наслідок, максимальну протяжність з'єднання.

На функціонування мереж з DWDM ушільненням великий вплив мають характеристики оптичного волокна. На відміну від систем з TDM, де хроматичну дисперсію намагаються звести до нуля, в системах з DWDM ушільненням використовують невелику, ретельно контрольовану величину для уникнення ефекту змішування чотирьох хвиль. В системах передачі, що використовують високі бітові швидкості (наприклад, STM-64), особливо складним є питання поляризаційної модової дисперсії (PMD), при якій максимальна швидкість і дальність передачі інформації залежить від стану поляризації світлової хвилі. В даний час величину PMD можна зменшити з допомогою вибору компонентів і зміною топології самої мережі. Але для подальшого росту вимог до пропускної здатності цього може виявитися недостатньо, тому зараз активно ведуться роботи по розробці методів контролю і активної компенсації PMD.

На рис. 1. представлена структурна схема магістрального лінійного тракту на основі DWDM і SDH технологій, яка включає передавач, що складається з набору лазерів DFB (по одному на кожен довжину хвилі), підключених до мультиплектора. При цьому для збільшення дальності зв'язку на виході передавача встановлено підсилювач оптичної потужності, а з деяким інтервалом вздовж волокна — лінійні оптичні підсилювачі, причому залежно від відстані, швидкості передачі і типу використовуваного волокна сигнал може направлятися через модуль компенсації дисперсії, що передбачений, як правило, на кожній станції підсилення.

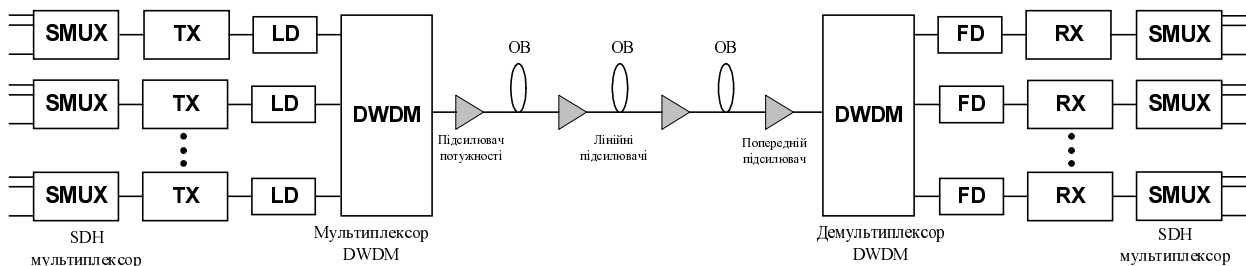


Рис. 1. Узагальнена схема магістрального лінійного тракту з використанням DWDM і SDH технологій

На приймальній стороні сигнал з виходу оптичного волокна може бути підсилений оптичним попереднім підсилювачем, включеним на вході демультимплектора.

Сьогоднішній стан розвитку інформаційної транспортної мережі України характеризується використанням застарілого обладнання та кабельних споруд, постійно зростаючими об'ємами переданої інформації та вимогами з боку користувачів щодо введення нових видів послуг. Ці три фактори вимагають побудови нової транспортної мережі України, яка б задовольняла вимоги щодо пропускних здатностей, введення нових видів послуг та введення в дію нового обладнання, яке б могло працювати без модернізації певний тривалий період, задовольняючи при цьому основні вимоги користувачів.

Технологія, яка б задовольняла вимоги користувачів за пропускними здатностями та введенням нових послуг, є технологія SDH. Технологія SDH сьогодні стала більш доступною та дешевою, широкий вибір мультиплексорів та іншого активного обладнання дозволяє вибирати топологію та будувати оптимальну для України мережу, яка здатна

працювати як з електричними, так і з оптичними сигналами. Додаткове збільшення пропускних здатностей магістральної мережі України може бути досягнуто за рахунок використання технології спектрального ущільнення DWDM.

Мережа України складається із обладнання різних технологій, таких як SDH — на рівні міських мереж (Київ, Львів, Харків, Одеса, Донецьк, Дніпропетровськ та ін.) та з'єднувальних ліній між недалеко розташованими містами, в одному з яких розміщено окремих концентратор (Донецьк-Макиївка); PDH на рівні міських мереж із використанням ІКМ-30, 120, 480, та ІКМ-1920 — між окремими містами; цифрових радіорелейних ліній між віддаленими містами як один з елементів магістральної мережі України, волоконно-оптичних ліній зв'язку і відповідного обладнання (волоконно-оптичних кабелів, передавачів, приймачів та регенераторів), використання яких і є основою формування магістральної мережі України.

Основним параметром, який впливає на дальність передачі сигналу в лінії, є затухання у волоконно-оптичному тракті, що дозволяє визначити максимальну довжину регенераційної чи підсилювальної ділянки та необхідність встановлення підсилювачів сигналу. Розрахунок затухання здійснюється на основі параметрів оптичних випромінювачів та приймачів:  $P_v$  — потужність випромінювання випромінювача (Вт), яка лежить в межах 0,1 — 5 мВт, та  $P_{\text{омін}}$  — чутливість приймача (Вт) — для лавинних фотодіодів  $1 \cdot 10^{-14}$ – $3 \cdot 10^{-14}$  Вт та для р-і-п- фотодіодів  $1 \cdot 10^{-7}$ – $8 \cdot 10^{-7}$  Вт. Розрахунок енергетичного потенціалу при відомих значеннях  $P_v$  і  $P_{\text{омін}}$  здійснюється за формулою:

$$Q = 10 * \lg \left( \frac{P_v}{P_{\text{омін}}} \right), \text{ дБ}$$

Для проведення розрахунків параметрів магістральних оптичних трактів вибрано типові випромінювач і приймач:

випромінювач — одномодовий лазерний діод ИЛПН — 206 з потужністю випромінювання 5 мВт;

приймач — лавинний фотодіод ФД-119 з чутливістю  $2 \cdot 10^{-14}$  Вт.

енергетичний потенціал буде становити  $Q = 114$  дБ.

Для якісного сприйняття приймачем оптичного сигналу необхідно вибрати запас стійкості (експлуатаційний запас), який переважно становить  $p_3 \geq 6$  дБ. Типовими втратами які виникають у волоконно-оптичному тракті є втрати на стиках:

1. джерело випромінювання — оптичне волокно  $a_{\text{впв}}$  і залежить від типів використовуваних джерел і оптичних волокон, способів їх стиковки і пристроїв узгодження хвильових фронтів джерела і оптичного волокна, в загальному випадку для довжини хвилі 1,3 та 1,55 мкм в одномодовому оптичному волокні  $a_{\text{впв}}$  становить 1,5 дБ;

2. оптичне волокно — оптичне волокно  $a_{\text{вв}}$  — залежить від способу стиковки волокна, при використанні нероз'ємного з'єднання, утвореного зваркою, втрати для довжин хвиль 1,3 та 1,55 мкм в одномодовому оптичному волокні  $a_{\text{вв}}$  становлять 0,1 дБ;

3. оптичне волокно — приймач  $a_{\text{впр}}$  — залежить від величини втрат внаслідок відбивання від торця оптичного волокна і світлочутливої поверхні приймача, аналогічно як у випадку джерело випромінювання — оптичне волокно ці втрати становлять 1,5 дБ при умові використання одномодового оптичного волокна з довжиною хвилі випромінювання 1,3 та 1,55 мкм.

Отже, вираз для розрахунку максимальної довжини регенераційної ділянки за потужністю (затуханням) матиме вигляд:

$$L_{p1max} = \frac{Q - p_3 - a_{ВПВ} - N * a_{ВВ} - a_{ВПр}}{\alpha}, \text{ км}$$

де  $N$  — кількість зварок,  $\alpha$  — затухання оптичного волокна на 1 км.

Якщо на ділянці регенерації всі будівельні довжини однакові, тобто  $l_{61}=l_{62}=l_{63}=\dots=l_6$  і затухання кожної ділянки волоконно-оптичної лінії є однакові  $\alpha_1=\alpha_2=\alpha_3=\dots=\alpha$ , то вираз для розрахунку максимальної довжини регенераційної ділянки матиме вигляд:

$$L_{p1max} = \frac{Q - p_3 - a_{ВПВ} - a_{ВВ} - a_{ВПр}}{\alpha + \frac{a_{ВВ}}{l_c}}, \text{ км}$$

Розраховані дані максимальної довжини регенераційної ділянки із врахуванням різних видів оптичних волокон та довжин робочих хвиль наведені в табл.1.

Крім затухання, максимальну довжину регенераційної ділянки може обмежувати і дисперсія, яка вирішальний вплив має в високошвидкісних системах передачі.

Таблиця 1

**Результати розрахунку довжини регенераційної ділянки за затуханням  
для різних видів одномодових оптичних волокон.**

<i>Тип волокна</i>	Довжина хвилі, нм	Затухання, дБ/км	Максимальна довжина регенераційної ділянки за затуханням, км
1	2	3	4
Lucent True Wave	1310	0,5	174
	1383 (max OH)	2	49
	1550	0,25	299
	1285-1330	0,25	299
	1525-1565(75)	0,3	262
	1565-1625	0,3	262
Lucent True Wave RS	1310	0,5	174
	1383 (max OH)	1	95
	1550	0,25	299
	1285-1330	0,25	299
	1525-1565(75)	0,3	262
	1565-1625	0,3	262
Lucent All Wave	1310	0,35	233
	1383 (max OH)	0,31	255
	1550	0,25	299
	1285-1330	0,45	190
	1525-1565(75)	0,3	262
	1565-1625	0,3	262

Продовження табл. 1

Fujikura DSM-8/125	1310	0,45	190
	1383 (max OH)	0,4	209
	1550	0,25	299
	1285-1330	0,25	299
	1525-1565(75)	0,3	262
	1565-1625	0,3	262
Fujikura DSMNZ-9/125	1310	0,45	190
	1383 (max OH)	0,4	209
	1550	0,25	299
	1285-1330	0,25	299
	1525-1565(75)	0,25	299
	1565-1625	0,25	299
Corning SMF-LS	1310	0,5	174
	1383 (max OH)	2	49
	1550	0,25	299
	1285-1330	0,3	262
	1525-1565(75)	0,3	262
	1565-1625	0,3	262

Для розрахунку дисперсії необхідно врахувати три основні фактори, які накладають обмеження на швидкість передачі інформації:

- 1) тривалість фронту імпульсу  $\tau_i$  ПОМ;
- 2) збільшення тривалості фронту імпульсу с внаслідок сумарної дисперсії в оптичному волокні довжиною L:

$$\sigma_L = \sqrt{\left(\sigma_{\text{мод}}^2 \pm \sigma_{\text{мат}}^2 \pm \sigma_{\text{хв}}^2\right)}, \text{ пс/км},$$

яка складається в загальному випадку з модової (міжмодової)  $\sigma_{\text{мод}}$ , матеріальної  $\sigma_{\text{мат}}$  і хвилевідної  $\sigma_{\text{хв}}$  дисперсій;

- 3) збільшення тривалості фронту імпульсу із-за інерційності ПРОМ  $\tau_p$ .

Тривалість фронту імпульсу після проходження ділянки регенерації (на виходу ПРОМ регенератора), с:

$$\tau_p = \sqrt{\left(\tau_i^2 + \sigma_L^2 + \sigma_p^2\right)}, \text{ пс/км}$$

Тривалість фронту імпульсу на виході ПРОМ регенератора не повинна перевищувати  $\tau_{\text{доп}}=0,7T$ , для NRZ і  $\tau_{\text{доп}}=0,35T$ , для RZ формату коду, де  $T = \frac{1}{B}$  - тривалість тактового інтервалу для швидкості передачі інформації B, біт/с.

Отже, для формату коду NRZ і системи синхронної передачі SDH-64 зі швидкістю передачі 10 Гбіт/с:

$$\tau_{\text{доп}} = 0,7 * T = 0,7 * \frac{1}{B} = 0,7 * \frac{1}{10 * 10^9} = 70, \text{ пс}$$

Для формату коду NRZ і системи синхронної передачі SDH-16 зі швидкістю передачі 2,5 Гбіт/с:

$$\tau_{\text{доп}} = 0,7 * T = 0,7 * \frac{1}{B} = 0,7 * \frac{1}{2,5 * 10^9} = 28, \text{ нс}$$

Для формату коду RZ і системи синхронної передачі SDH-64 зі швидкістю передачі 10 Гбіт/с:

$$\tau_{\text{доп}} = 0,35 * T = 0,35 * \frac{1}{B} = 0,35 * \frac{1}{10 * 10^9} = 35, \text{ пс}$$

Для формату коду RZ і системи синхронної передачі SDH-16 зі швидкістю передачі 2,5 Гбіт/с:

$$\tau_{\text{доп}} = 0,35 * T = 0,35 * \frac{1}{B} = 0,35 * \frac{1}{2,5 * 10^9} = 14, \text{ нс}$$

Тривалість фронту імпульсу ПОМ  $\tau_i$  визначається швидкодією джерела випромінювання і елементів схеми його накачки. В наближенні за  $\tau_i$  може бути прийнята величина, зворотна максимальній частоті модуляції джерела, при умові гауссівської форми імпульсу, нс:

$$\tau_i = \frac{440}{F_{0,5}}, \text{ пс}$$

де  $F_{0,5}$  - ширина смуги пропускання джерела за рівнем половинної потужності, МГц.

Збільшення тривалості фронту імпульсу в ПРОМ, тобто дисперсія, що вноситься в ПРОМ, нс:

$$\tau_{\text{п}} = \frac{350}{F_{0,5}}, \text{ пс}$$

де  $F_{0,5}$  - ширина смуги пропускання ПРОМ за рівнем половинної потужності, МГц.

Значення  $\tau_{\text{п}}$  може бути співставлено з тривалістю тактового інтервалу для визначення швидкодії комбінації “джерело випромінювання-оптичне волокно-приймач” при довжині  $L$  для заданого формату коду передачі інформації. Існує критична (максимально допустима) швидкість передачі інформації,  $V_{\text{кр}}$ , біт/с:

$$V_{\text{кр}} = \frac{\alpha}{4 * \sigma_1 * \omega}, \text{ біт/с}$$

де  $\omega = p_i - p_{\text{омін}} - a_{\text{впв}} - a_{\text{впр}} = Q - a_{\text{впв}} - a_{\text{впр}}$ ,  $\sigma_1$  — сумарна кілометрична дисперсія оптичного волокна відповідної марки.

Якщо швидкість передачі інформації більша ніж критична, то лінійний тракт передачі буде обмежений дисперсійними спотвореннями і максимальна довжина ділянки регенерації дорівнюватиме:

$$L_{\text{р2}} = \frac{1}{4 * \sigma_1 * V}, \text{ км}$$

і ця величина визначає необхідність встановлення пристроїв компенсації дисперсії на лінії між окремими містами.

В іншому випадку  $V < V_{\text{кр}}$  тракт передачі обмежений затуханням і максимальна довжина ділянки регенерації визначається затуханнями, які в ній виникають.

Розраховані значення дисперсії для кожного виду волокна та максимальна довжина регенераційної ділянки при врахуванні дисперсії наведено в табл. 2.

**Результати розрахунку максимальної довжини регенераційної ділянки  
відносно кілометричного значення дисперсії.**

Тип волокна	Вид дисперсії	На довжині хвилі, нм	Значення дисперсії, пс/км	Сумарна кілометрична дисперсія, пс/км	Максимальна довжина регенераційної ділянки, км
Corning SMF-LS	Хроматична	1310	0,5	Для довжини хвилі, 1310 нм — 1,05 пс/км	Для STM-16 — 95
		1550	2		
	Матеріальна	1310	0,25		Для довжини хвилі, 1550 нм — 2,6 пс/км
		1550	0,3	Для STM-16 — 38	
	Поляризаційна	1310	0,3		Для STM-64 — 9
		1550	0,3		
Fujikura DSM-8/125	Хроматична	1310	0,45	Для довжини хвилі, 1310 нм — 1 пс/км	Для STM-16 — 100
		1550	0,4		
	Матеріальна	1310	0,25		Для довжини хвилі, 1550 нм — 0,95 пс/км
		1550	0,25	Для STM-16 — 105	
	Поляризаційна	1310	0,3		Для STM-64 — 26
		1550	0,3		
Fujikura DSMNZ-9/125	Хроматична	1310	0,45	Для довжини хвилі, 1310 нм — 0,95 пс/км	Для STM-16 — 105
		1550	0,4		
	Матеріальна	1310	0,25		Для довжини хвилі, 1550 нм 0,9 пс/км
		1550	0,25		
	Поляризаційна	1310	0,25		Для STM-16 — 111
		1550	0,25		
Lucent True Wave	Хроматична	1310	0,5	Для довжини хвилі, 1310 нм — 1,05 пс/км	Для STM-16 — 95
		1550	2		
	Матеріальна	1310	0,25		Для довжини хвилі, 1550 нм — 2,6 пс/км
		1550	0,25	Для STM-16 — 38	
	Поляризаційна	1310	0,3		Для STM-64 — 9
		1550	0,3		
Lucent True Wave RS	Хроматична	1310	0,5	Для довжини хвилі, 1310 нм — 1,05 пс/км	Для STM-16 — 95
		1550	1		
	Матеріальна	1310	0,25		Для довжини хвилі, 1550 нм — 1,55 пс/км
		1550	0,25	Для STM-16 — 64	
	Поляризаційна	1310	0,3		Для STM-64 — 16
		1550	0,3		
Lucent All Wave	Хроматична	1310	0,35	Для довжини хвилі, 1310 нм — 0,9 пс/км	Для STM-16 — 111
		1550	0,31		
	Матеріальна	1310	0,25		Для довжини хвилі, 1550 нм — 1,06 пс/км
		1550	0,45	Для STM-16 — 94	
	Поляризаційна	1310	0,3		Для STM-64 — 23
		1550	0,3		

На основі розрахованих даних щодо затухання та дисперсії волокна, наведених у табл. 1 та табл. 2, а також розрахованих довжин регенераційних ділянок відповідно за затуханням та дисперсією і кількості пристроїв регенерації та підсилювачів EDFA можна побудувати реальні лінійні тракти, як частини регіональних кілець. Відповідні рисунки магістральних лінійних трактів представлені на рис. 2.

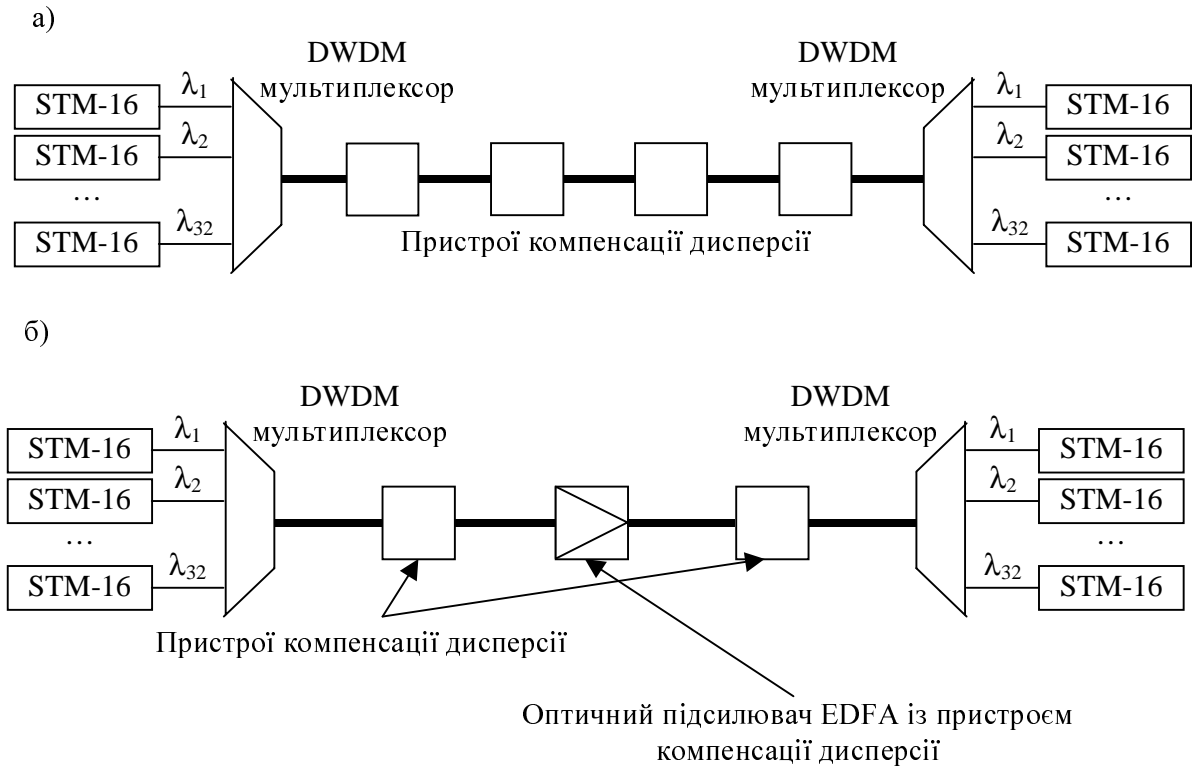


Рис. 2. Реальні архітектури мультиплексних оптичних ліній на основі каналів SDH:  
 а) з пристроями компенсації дисперсії при умові: довжина регенераційної ділянки по дисперсії менша від довжини регенераційної ділянки за затуханням та відстань між містами менша від довжини регенераційної ділянки за затуханням;  
 б) з пристроями компенсації дисперсії та EDFA при умові: довжина регенераційної ділянки по дисперсії менша від довжини регенераційної ділянки за затуханням та відстань між містами більша від довжини регенераційної ділянки за затуханням

### Висновок

Надавачі послуг зв'язку прокладають за рік десятки тисяч кілометрів волоконно-оптичних кабелів. Велика кількість компаній за межами України веде інтенсивні дослідження в галузі волоконно-оптичних технологій, зокрема WDM – хвильове мультиплексування та DWDM – щільне хвильове мультиплексування, яке є різновидом WDM, що дозволяє більш раціонально використовувати фізичне середовище. Все це сприяє швидшому впровадженню SDH-технології з можливістю передачі по одномодовому оптичному волокну інформації з швидкістю до 1,1 Тбіт\с.

Сьогодні в Україні, так само як і в інших країнах, починають поступово розгортати оптичну мережу із використанням WDM-технології для SDH транспортних систем. Розгортання SDH-технології створило передумови для впровадження WDM-технології та в подальшому DWDM-технології, що дозволяє збільшити загальну швидкість передачі за одним волокном від 2 до 160 разів, а при використанні багатоволоконного оптичного кабеля швидкість передачі може бути набагато збільшена (від 2 до 144 раз).



В Україні вже функціонує SDH-транспортна мережа, а впровадження WDM-технології є в найближчій перспективі, хоча можливість впровадження останньої є вже сьогодні. Поєднання SDH та WDM технологій дозволить не тільки більш раціонально використовувати потенційні можливості пропускної здатності мережі, а й створить передумови для впровадження нових видів послуг та їх суттєве здешевлення, дасть можливість абонентам більш повно використовувати інформаційні ресурси мережі.

1. Слепов Н.Н. *Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи.* — М.: Радио и связь, 2000. 2. Каток В.Б. *Волоконно-оптичні системи зв'язку.* — К., 1999. 3. Убайдулаев Р.Р. *Волоконно-оптические сети.* — М., 2000. 4. Дмитриев С.А., Слепов Н.Н. и др. *Волоконно-оптическая техника. История, достижения, перспектива.* — М.: CONNECT, 2000.

УДК 621.372

О.В. Тимченко, І.В. Горбатий

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра телекомунікації

## МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ШУМІВ НА ПРОПУСКНУ ЗДАТНІСТЬ ВИДІЛЕНОГО ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОГО КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ

© Тимченко О.В., Горбатий І.В., 2003

*Розроблено методи математичного моделювання виділеного телекомунікаційного каналу зв'язку з використанням ADSL технології. Досліджено вплив шумів на пропускну здатність таких каналів при передачі цифрових даних.*

*The methods of mathematical modelling of leased telecommunication ADSL channels was design. The noise influence on the data transmission throughput was research.*

**Вступ.** При під'єднанні до мережі Інтернет здебільшого використовують телефонні канали зв'язку. Перевагою таких каналів зв'язку є їх відносна дешевизна. Саме тому доцільно використовувати телефонні канали зв'язку для передачі як мовних сигналів, так і цифрових даних. Високошвидкісну передачу даних здійснюють за виділеним телефонним каналам зв'язку. При цьому використовують модеми на обох кінцях лінії, які побудовані з використанням технології ISDN, xDSL або HomePNA. Слід зауважити, що на шляху між двома модемами не повинно бути ніякого активного обладнання, яке може обмежити смугу пропускання телефонного каналу. Деякі різновиди технології xDSL і HomePNA дозволяють одночасно передавати звукові сигнали і цифрові дані за одними і тими ж телефонними лініями.