

МОДЕЛЮВАННЯ WDM СИСТЕМИ ПЕРЕДАВАННЯ

Корнійчук В.І., Барба І.Б.

Одеська національна академія зв'язку імені О.С. Попова,
65029, Україна, м. Одеса, вул. Ковальська, 1.

kvikes@mail.ru, irina_barba@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ WDM СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ

Корнейчук В.И., Барба И.Б.

Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова,
65029, Украина, г. Одесса, ул. Кузнечная, 1.

kvikes@mail.ru, irina_barba@mail.ru

SIMULATION WDM TRANSMISSION SYSTEM

Kornichuk V.I., Barba I.B.

O.S. Popov Odessa national academy of telecommunications,
1 Kovalska St., Odessa, 65029, Ukraine

kvikes@mail.ru, irina_barba@mail.ru

Анотація. Створено математичну модель волоконно-оптичної системи передачі зі спектральним мультиплексуванням каналів (wave-division multiplexing – WDM), що враховує загасання, дисперсійні та нелінійні явища в оптичному волокні. В алгоритмічному середовищі Delphi розроблено програмне забезпечення під назвою WNS (WDM Network Simulator). Наведено результати моделювання WDM-системи за розробленою програмою.

Ключові слова: спектральне мультиплексуванням каналів, математична модель лінійного тракту, спектральний мульти-демультиплексор, лазер, лінійні та нелінійні спотворення

Аннотация. Создана математическая модель волоконно-оптической системы передачи со спектральным мультиплексированием каналов (wave-division multiplexing – WDM), в которой учтены затухание, дисперсионные и нелинейные эффекты в оптическом волокне. В алгоритмической среде Delphi разработано программное обеспечение под названием WNS (WDM Network Simulator). Приведены результаты моделирования WDM-системы, полученные при помощи разработанной программы.

Ключевые слова: спектральное мультиплексирование каналов, математическая модель линейного тракта, спектральный мульти-демультиплексор, лазер, линейные и нелинейные искажения.

Abstract. The mathematical model of a fiber optic transmission system with spectral multiplexing of channels (wave-division multiplexing – WDM) is built, in which attenuation, dispersion and non-linear effect (four-wave mixing) in fiber is taken into account. In the programming language Delphi the conforming software under a title WNS (WDM Network Simulator) is designed. The resultants of simulation of a WDM-systems obtained through the designed program are presented.

Key words: wavelength division multiplexing, mathematical model transmission system, spectral multi-demultiplexer, linear and nonlinear distortions.

При спектральному мультиплексуванні каналів (Wavelength Division Multiplexing – WDM) N незалежні інформаційні потоки об'єднуються і передаються по одному оптичному волокну (ОВ) на несучих, що відрізняються значенням довжини хвилі [1 ... 4]. Це дозволяє в N разів збільшити пропускну здатність системи передачі без переобладнання лінійно-кабельних споруд, змінюється тільки станційне обладнання.

Мета статті – представлення математичної та програмної моделі N -канального WDM лінійного тракту (рис. 1) з урахуванням основних факторів, що погіршують якість передачі – загасання, дисперсії сигналів та нелінійних спотворень в оптичному волокні.

До моделі WDM лінійного тракту, зображеного на рис. 1, входять наступні блоки: N джерел даних (ДД-І), що генерують випадкові повідомлення (один байт) i -го каналу; N кодерів, що виконують лінійне кодування (ЛК-І) повідомлень; N підсилювачів накачки (ПН-І), що формують струми накачування N лазерних діодів (ЛД-І), в яких здійснюється модуляція оптичної інтенсивності (потужності) випромінювання $P(\lambda_i)$; мультиплексор

(MUX) об'єднує сигнали спектральних каналів $P(\lambda_i)$ в оптичний груповий сигнал $P(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N)$, що передається по одномодовому ОБ; демультиплексор (DMX) виконує розділення групового оптичного сигналу на спектральні складові $P(\lambda_i)$; N модулів обладнання приймання на основі фотодіодів (ФД-І) перетворюють оптичні потужності $P(\lambda_i)$ в електричні струми.

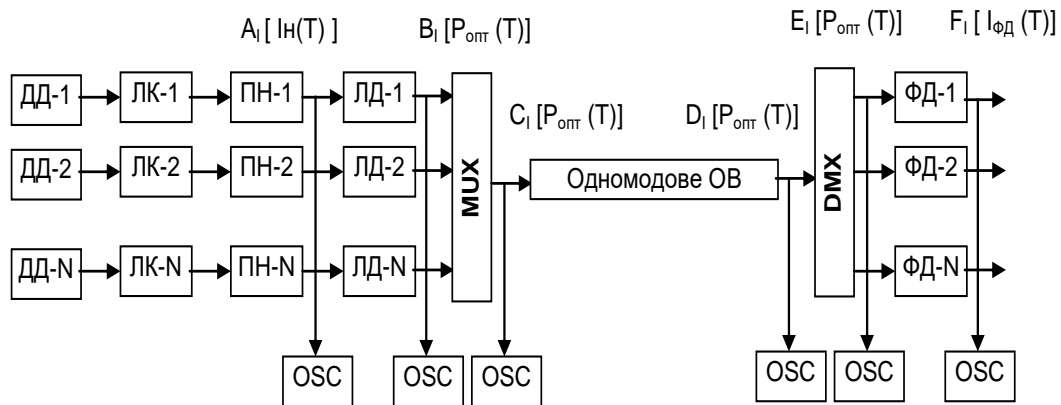


Рисунок 1 – Схема програмної моделі WDM лінійного тракту

На рис. 1 показано контрольні точки $A_1 \dots F_1$, до яких приєднані віртуальні осцилографи (OSC). Вони дозволяють спостерігати епюри оптичних та електричних сигналів в довільні моменти (по 256 моментів на бітовий інтервал) дискретного часу T .

Програма моделювання WDM-лінійного тракту на рис. 1 відбувається наступним чином. Від i -го джерела даних випадково згенерований байт повідомлення надходить до i -го лінійного кодера. Останній перетворює повідомлення у послідовність 2048 відліків (дискретизація в часі). Підсилювач накачування з цих відліків формує сигнал із 2048 миттєвих значень струму накачування. Цим струмом здійснюється пряма модуляція потужності випромінювання i -го лазерного діода на довжині хвилі λ_i . Мультиплексор забезпечує об'єднання імпульсів потужності кожного з N передавачів у груповий лінійний сигнал, що надходить до ОБ. Останнє забезпечує каналізацію імпульсів оптичної потужності до станції приймання, вносячи при цьому згасання, дисперсію та нелінійні спотворення (зокрема чотирихвильове змішування – four-wave mixing – FWM). Демультиплексор розділяє прийняті оптичні сигнали за довжиною хвилі λ_i , яка є ознакою i -го каналу, та спрямовує їх до приймачів випромінювання. Кожний з приймачів перетворює миттєві значення оптичної потужності у миттєві значення струму в навантаженні. Далі електричні сигнали обробляються відповідними сигнальними процесорами.

У моделі передавального обладнання WDM-системи є N підсилювачів накачування (за кількістю спектральних каналів), кожен з яких формує миттєві значення струму накачування ЛД

$$I_{н}(i, T) = D(i, T) \times I_m + I_{зм}, \text{ мА}, \quad (1)$$

де $D(i, T)$ – значення кодованого сигналу в дискретний момент часу T ; I_m , мА – струм кодування двійкової одиниці; $I_{зм}$, мА – струм попереднього зміщення ЛД.

Від N підсилювачів накачування миттєві значення струму накачування надходять до N лазерних діодів. Кожний з ЛД генерує (з деякою затримкою) на своєму виході оптичну потужність з миттєвим значенням

$$P_{OPT-LASER}(\lambda_i, T) = \begin{cases} P_{OPT-LASER}(\lambda_i, T - T_d), & D(i, T) = 1, \quad D(i, T - 1) = 0, \\ 0,1 \cdot R_\delta \cdot I_1(i, T), & I_1(i, T) \leq I_{th}, \\ 0,1 \cdot R_p I_{th} + R_p \cdot (I_1(i, T) - I_{th}), & I_1(i, T) > I_{th}, \end{cases} \text{ мВт}, \quad (2)$$

I_n та I_{th} мА – струми накачування та пороговий струм ЛД відповідно; R_p , Вт/А – крутизна ватамперної характеристики (ВтАХ) ЛД за надпорогового струму накачування (значення R_p за допорогового струму приймається таким, що дорівнює $0,1 \times R_p$); $I_n(i, T)$, мА – миттєве значення струму накачування в момент дискретного часу T ; $D(i, T)$, $D(i, T-1)$ – миттєві значення кодованого сигналу в момент часу T ; T_d – кількість моментів дискретного часу, на які затримується оптичне випромінювання відносно електричного збудження

$$T_d = INT[t_d \cdot 256/t_b], \quad (3)$$

де t_d та t_b нс – час затримки та тривалість бітового інтервалу відповідно; $INT[x]$ – функція, що забирає цілу частину від числа x . Програмна функція лазера, що відповідає формулам (2) і (3), справедлива лише за умови, що час затримки не перевищує тривалість одиничного імпульсу, тобто $T_d < 128$ для RZ-коду, $T_d < 256$ для NRZ-коду.

На виході мультиплексора в кожний момент часу T присутні миттєві значення оптичної потужності $P_{OPT-MUX}(\lambda_i, T)$, де $\lambda_i = \{\lambda_1, \dots, \lambda_N\}$. В програмі це відповідає виконанню операції

$$P_{OPT-MUX}(\lambda_i, T) = P_{OPT-LASER}(\lambda_i, T) \cdot 10^{-0,1 \cdot a_{NE}(i)}, \quad \text{мВт}, \quad (4)$$

де a_{NE} , dB – коефіцієнт передавання потужності на ближній кінець мультиплексора [3].

На виході оптичного волокна в кожний момент часу будуть присутні миттєві значення потужностей сигналу

$$P_{OPT-FIBER}(\lambda_i, T) = \begin{cases} P_{OPT-FIBER}(\lambda_i, T - T_{DS}), & D(i, T - T_{DS}) = 1, \quad D(i, T) = 0, \\ P_{OPT-MUX}(\lambda_i, T) \cdot EXP[-0,115 \cdot \alpha_{ATT}(\lambda_i)L] + FWM(\lambda_i, T), & \end{cases} \quad \text{мВт}, \quad (5)$$

де L , км – довжина оптичного волокна; $\alpha_{ATT}(\lambda_i)$, $dB/км$ – коефіцієнт згасання на довжині хвилі λ_i ; T_{DS} – кількість моментів дискретного часу, на яку збільшується тривалість імпульсу внаслідок дисперсії

$$T_{DS} = \frac{\tau(\lambda_i) \cdot 256}{t_b \cdot 1000}. \quad (6)$$

У формулі (6) $\tau(\lambda_i)$, пс – хроматична дисперсія на довжині хвилі λ_i ; $FWM(\lambda_i, T)$, мВт – потужність на довжині хвилі λ_i , що зумовлена нелінійним явищем чотирьоххвильового змішування в дискретний момент часу T , і обчислюється [2] за формулою

$$FWM(\lambda_i, T) = \sum_{XYZ=1, Z \neq X, Y}^N P_{XYZ}(\lambda_{XYZ}, T), \quad \text{мВт}, \quad (7)$$

де $P_{XYZ}(\lambda_{XYZ}, T)$, мВт – потужність гармоніки з довжиною хвилі $\lambda_{XYZ} = \lambda_i$, яка генерується трьома гармоніками з довжинами хвиль $\lambda_X, \lambda_Y, \lambda_Z$ відповідно. Потужність $P_{XYZ}(\lambda_{XYZ}, T)$ розраховується [2, формула (9 ... 23)]

$$P_{ijk} = \eta \cdot \left(\frac{2\pi \cdot f_{ijk} \cdot a_{ij}}{3} \right)^2 \cdot \left(\frac{k_H}{S_{EФ}} \right)^2 \cdot \left(\frac{L}{c} \right)^2 P_i P_j P_k \cdot EXP(-\alpha L), \quad \text{Вт},$$

де k_H , $мкм^2/Вт$ – коефіцієнт нелінійності показника заломлення, волокна; $S_{EФ}$, $мкм^2$ – ефективна площа ОВ; f_{ijk} , Гц – частота гармоніки, потужність якої обчислюється; L , км – довжина оптичного волокна; c , м/с – швидкість світла в вакуумі; P_i, P_j, P_k , Вт – потужності породжуючих хвиль; α , $1/км$ – коефіцієнт згасання ОВ; a_{ij} – коефіцієнт виродження ($a_{ij} = 3$, при $i = j$; $a_{ij} = 6$ при $i \neq j$). Враховується, що $P_X(\lambda_X) = P_X(\lambda_X, T)$, $P_Y(\lambda_Y) = P_Y(\lambda_Y, T)$, $P_Z(\lambda_Z) = P_Z(\lambda_Z, T)$, тобто беруться миттєві значення в момент часу T . Прийняті наступні значення [3]: ефективність чотирьоххвильового змішування $\eta = 1$; коефіцієнт нелінійності волокна $k_H = 3 \times 10^{-8}$ $мкм^2/Вт$; ефективна площа перетину волокна $S_{EФ} = 50$ $мкм^2$.

Довжини хвиль гармонік, які виникають внаслідок FWM визначаються за формулою

$$\lambda_{XYZ} = 1/(f_X + f_Y + f_Z), \text{ нм}, \quad (8)$$

де f_X, f_Y, f_Z – частоти породжуючих хвиль.

Демультимплексор на приймальному боці здійснює розділення групового оптичного сигналу на окремі спектральні складові $P_{OPT}(\lambda_i)$. Потужність сигналу з довжиною хвилі λ_i на i -му виході демультимплексора [4]

$$P_{FE}(\lambda_i) = P_{OPT-FIBER}(\lambda_i) \cdot 10^{-0,1 \cdot a_{FE}(I)}, \text{ мВт}, \quad (9)$$

де $a_{FE}(I)$, дБ – коефіцієнт передачі на дальньому кінці; $P_{OPT-FIBER}(\lambda_i)$; мВт – потужність сигналу з довжиною хвилі λ_i на спільному полюсі демультимплексора.

Сумарна потужність перехідних завад на i -му виході демультимплексора

$$P_{FEXT}(i) = \sum_{J=1, J \neq i}^N P_{OPT-FIBER}(\lambda_J) \cdot 10^{0,1 \cdot b_{FEXT}(J,I)}, \text{ мВт}, \quad (10)$$

де $b_{FEXT}(J, I)$, дБ – коефіцієнт перехідних завад на дальньому кінці i -го сигналу з довжиною хвилі λ_J . Суміш оптичних потужностей сигналу та завади на i -му виході демультимплексора

$$P_{OPT}(i) = P_{FE}(\lambda_i) + P_{FEXT}(i), \text{ мВт}. \quad (11)$$

Пікове значення оптичної потужності на i -му вихідному полюсі демультимплексора розраховується за формулою (11) з урахуванням (10) та (9), а миттєві значення

$$P_{OPT}(i, T) = P_{FE}(\lambda_i, T) + P_{FEXT}(i, T), \text{ мВт}, \quad (12)$$

де

$$P_{FE}(\lambda_i, T) = P_{OPT-FIBER}(\lambda_i, T) \cdot 10^{-0,1 \cdot a_{FE}(I)}, \text{ мВт}, \quad (13)$$

$$P_{FEXT}(i, T) = \sum_{J=1, J \neq i}^N P_{OPT-FIBER}(\lambda_J, T) \cdot 10^{0,1 \cdot b_{FEXT}(J,I)}, \text{ мВт}. \quad (14)$$

У формулі (12) перший доданок – це потужність оптичного сигналу на довжині хвилі λ_i , а другий доданок – це сумарна потужність перехідних завад на дальньому кінці.

Фотодіод p - i - n -типу в i -му каналі сприймає оптичну потужність, яка надходить з i -го виходу демультимплексора, і створює електричний струм, що є пропорційний миттєвому значенню оптичної потужності. Програмна реалізація приймального обладнання розраховує пікові та миттєві значення потужності на вихідному полюсі демультимплексора та в навантаженні ФД i -го каналу.

Для реалізації моделі WDM-системи створено комп'ютерну програму WNS (WDM Network Simulator). Програма дає можливість моделювання WDM-систем з довільним числом каналів. Параметри кожного каналу задаються індивідуально, що дозволяє аналізувати моделі WDM-систем, канали яких мають різні каналні швидкості передавання, різні способи кодування, і використовують різнотипне обладнання передавання та приймання. Спільними для всієї моделі WDM-системи є ОБ та пара мультимплексор/демультимплексор.

Інтерфейс користувача програми розроблений у вигляді набору закладок, в яких задаються параметри моделі певного обладнання. Кожна закладка поділяється на дві частини: верхня – для введення параметрів моделі, нижня – для відображення результатів розрахунків та спостереження розрахованих часових діаграм. Кількісні значення розрахунків наводяться у відповідних таблицях, графічна інформація висвітлюється на екрані віртуального осцилографа OSC, підключеного до контрольної точки.

На закладці «Канали» (рис. 2) задаються основні параметри оптичних каналів – швидкість передавання та тип лінійного коду.

| Номер каналу | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--------------------|--------|--------|--------|--------|---------|
| Швидкість (МБт/с): | 155,52 | 622,08 | 155,52 | 622,08 | 2448,32 |
| Лінійний код: | RZ | RZ | RZ | NRZ | NRZ |

Рисунок 2 – Приклад заповнення закладки параметрів каналів

На закладці «Лазери» (рис. 3) задаються наступні характеристики лазерних діодів: крутизна (нахил) Вт/АХ Вт/А; ширина смуги випромінювання, нм; центральна довжина хвилі, нм; пороговий струм ЛД, мА; струм попереднього зміщення, мА; струм представлення двійкової одиниці, мА.

| Номер каналу: | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Нахил Вт/АХ (мВт/мА): | 0,03333333 | 0,03333333 | 0,03333333 | 0,03333333 | 0,03333333 |
| Ширина смуги випромінювання (нм): | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| Центральна довжина хвилі (нм): | 1623,13 | 1623,57 | 1624,01 | 1624,45 | 1624,89 |
| Пороговий струм лазера (мА): | 40 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Струм попереднього зміщення (мА): | 9,8 | 9,8 | 9,8 | 9,8 | 9,8 |
| Модулюючий струм двійкової "1" (мА): | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

Рисунок 3 – Приклад заповнення параметрів передавачів

На закладці «Мультиплексор» вводяться параметри (дБ) мультиплексора – коефіцієнти передавання, зворотного розсіювання та перехідних завад на ближньому кінці (NEXT) [3]. Параметри мультиплексора в програмі подаються у вигляді матриці (рис. 4). При додаванні кожного нового каналу розміри матриці відповідним чином коригуються.

| Входи | com | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1623,13 | 2,30 | -40,00 | -25,00 | -25,00 | -25,00 | -25,00 |
| 1623,57 | 2,30 | -25,00 | -40,00 | -25,00 | -25,00 | -25,00 |
| 1624,01 | 2,30 | -25,00 | -25,00 | -40,00 | -25,00 | -25,00 |
| 1624,45 | 2,30 | -25,00 | -25,00 | -25,00 | -40,00 | -25,00 |
| 1624,89 | 2,30 | -25,00 | -25,00 | -25,00 | -25,00 | -40,00 |

Рисунок 4 – Вигляд матриці параметрів мультиплексора

На вкладці «Волокно» (рис. 5) задаються наступні параметри ОВ – довжина ОВ, км; сумарний коефіцієнт загасання (кабельні втрати), дБ/км; поглинання на піку ОН, дБ/км; довжина хвилі нульової дисперсії, нм; нахил дисперсійної характеристики в точці нульової дисперсії; коефіцієнт поляризаційно-модової дисперсії (ПМД), $1/\sqrt{\text{км}}$; тип застосованого волокна (SF, DSF, NZDSF).

| | |
|--|---|
| Вид волокна <input checked="" type="radio"/> SMF SF <input type="radio"/> SMF DSF <input type="radio"/> SMF NZDSF | Протяжність (км): 10 Кабельні втрати (дБ/км): 0,5 Поглинання на піку ОН (1383 нм) (дБ/км): 0,2 Довжина хвилі нульової дисперсії (нм): 1321 Нахил характеристики на довжині хвилі НД: 0,092 Коефіцієнт ПМД (пс/км ²): 0,1 |
|--|---|

Рисунок 5 – Заповнення параметрів оптичного волокна

На вкладці «Демультіплексор», що є аналогічною вкладці «Мультиплексор», встановлюються показники демультіплексора – параметри передачі, зворотного розсіювання та перехідних завад на дальньому кінці (FEXT), дБ. Параметри демультіплексора у програмі представляються у вигляді матриці, що є подібною до матриці мультиплексора, проте принцип її заповнення інший. У матриці втрат демультіплексора на діагональних позиціях знаходяться коефіцієнти передачі, а в крайній лівій колонці – коефіцієнти зворотного розсіювання на дальньому кінці [2].

На вкладці «Приймачі» (рис. 6) задаються наступні параметри: струмовий відгук ФД/Вт; темновий струм ФД, мкА; ємність фотодіода при зворотному зміщенні, пФ; опір навантаження, Ом; внутрішня постійна часу ФД, нс.

| Номер каналу | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Струмовий відгук фотодіода, А/Вт : | 0,85 | 0,85 | 0,85 | 0,85 | 0,85 |
| Темновий струм фотодіода, мкА : | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| Ємність фотодіода, пФ : | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 |
| Опір навантаження, Ом : | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| Внутрішня постійна часу, Т, нс: | 0,025 | 0,025 | 0,025 | 0,025 | 0,025 |

Рисунок 6 – Приклад заповнення параметрів фотодіодів

На вкладці «FWM» вводяться параметри нелінійності ОВ: коефіцієнт ефективності FWM; коефіцієнт нелінійності показника заломлення, мкм²/Вт; ефективна площа перерізу ОВ, мкм².

Роботу створеної програми продемонструємо на прикладі WDM системи передачі з рознесенням каналів 50 ГГц (0,4 нм) з використанням каналного плану G.694.1 [4]. Модель функціонує в оптичному діапазоні *L* (Long Wave Length) 1565...1625 нм. Довжина стандартного одномодового ОВ складає 10 км.

З метою демонстрації ефекту затримки генерації випромінювання для ЛД першого каналу навмисно встановлене завищене значення порогового струму відносно струму попереднього зміщення. Ефект затримки генерації випромінювання (815 пс для 1-го каналу, 4,4 пс для 1-го каналу) можна оцінити за часовою діаграмою (світлим вертикальними лініями відбиті межі бітових інтервалів), а розрахований час затримки наданий в таблиці результатів на рис. 7.

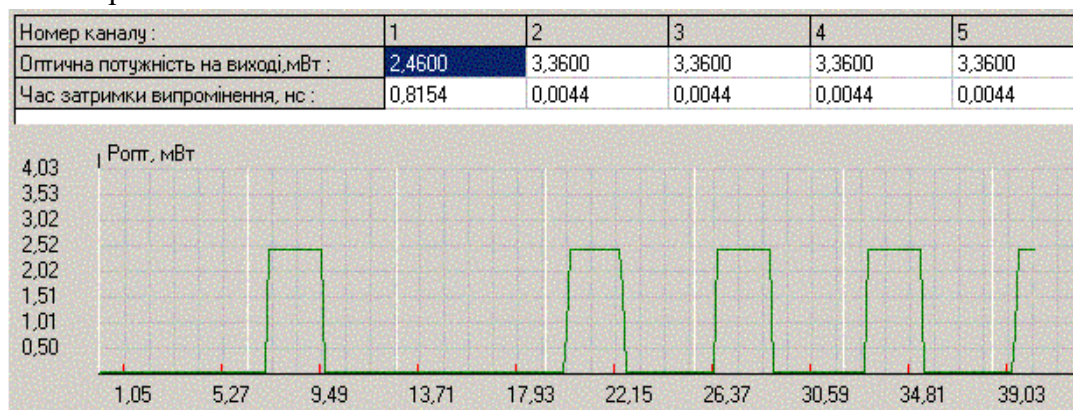


Рисунок 7 – Часова діаграма потоку імпульсів першого каналу

Для мультиплексора використано параметри пристроїв, які виготовляються компанією ADC [2], для яких коефіцієнт передачі на ближньому кінці складає –2,3 дБ. Значення оптичної потужності у мВт на виході мультиплексора надається у таблиці «Втрати мультиплексора» на вкладці «Мультиплексор». Фрагмент таблиці та епюри сигналів першого та другого каналів подано на рис. 8.

На епюрах для кожного каналу показані сигнали на вході та виході мультиплексора. З порівняння діаграм видно ефект затримки генерації випромінювання діода першого каналу.

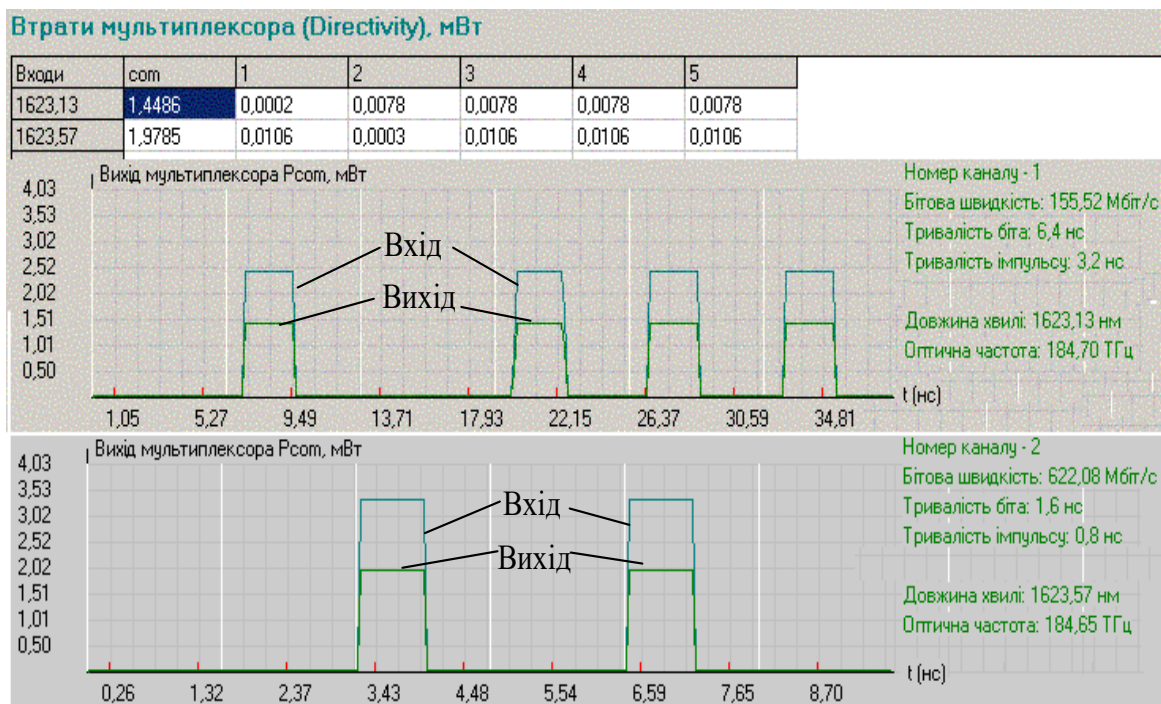


Рисунок 8 – Часові діаграми роботи перших двох каналів

Для WDM – системи використане оптичне волокно SMF-28 (G.652) [4] з наступними параметрами: довжина хвилі нульової дисперсії $\lambda_0 = 1321$ нм; нахил дисперсійної характеристики в точці нульової дисперсії $S_0 = 0,092$; коефіцієнт поляризаційної модової дисперсії $T = 0,1$ 1/√км .

Результати розрахунків надано на вкладці «Волокно» (рис. 9).

| | 1623,13 нм | 1623,57 нм | 1624,01 нм | 1624,45 нм | 1624,89 нм |
|--|------------|------------|------------|------------|------------|
| Згасання, дБ : | 9,54 | 9,55 | 9,55 | 9,56 | 9,56 |
| Втрати на поглинання у матеріалі волокна, дБ : | 0,44 | 0,44 | 0,44 | 0,44 | 0,44 |
| Втрати на поглинання в ІR -області, дБ : | 0,82 | 0,83 | 0,84 | 0,84 | 0,85 |
| Втрати на розсіювання Релея : | 1,28 | 1,28 | 1,28 | 1,27 | 1,27 |
| Пікова оптична потужність на вході, мВт : | 1,4486 | 1,9785 | 1,9785 | 1,9785 | 1,9785 |
| Пікова оптична потужність на виході, мВт : | 0,4834 | 0,6598 | 0,6594 | 0,6590 | 0,6587 |
| Поляризаційна модова дисперсія, пс : | 0,32 | 0,32 | 0,32 | 0,32 | 0,32 |
| Хроматична дисперсія, пс : | 250,32 | 250,65 | 250,97 | 251,30 | 251,63 |
| Загальна дисперсія, пс : | 250,32 | 250,65 | 250,98 | 251,30 | 251,63 |
| Потужність FWM, мкВт | 25,10 | 37,01 | 40,93 | 39,91 | 21,63 |

Рисунок 9 – Результати розрахунків параметрів оптичного волокна

Віртуальний осцилограф в еталонній точці $D(i)$ на рис. 10 показує потужності сигналу на вході та виході ОВ і потужність хвилі внаслідок чотирехвильового змішування (ЧХЗ). На рисунку також видно збільшення тривалості імпульсу внаслідок дисперсії сигналу в ОВ (дисперсія зростає зі збільшенням довжини хвилі і становить 251,63 пс в цьому прикладі).

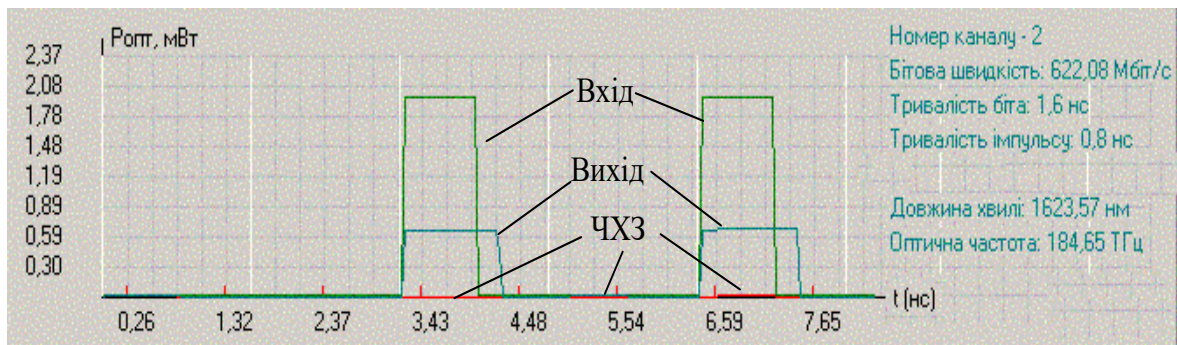


Рисунок 10 – Епюри сигналу на вході та виході ОВ для другого каналу

Кількість та потужність гармонік, що виникли внаслідок ЧХЗ, можна оцінити з таблиці на вкладці «FWM». Її фрагмент показаний на рис. 11, де наведені частоти породжуючих хвиль F_I , F_J , F_K , частота ЧХЗ – F_{IJK} , довжина хвилі цієї гармоніки, а також її потужність P_{IJK} , мкВт.

| $F(I)$, THz | $F(J)$, THz | $F(K)$, THz | $F(IJK)$, THz | WaveLength | $p(IJK)$, мкВт |
|--------------|--------------|--------------|----------------|------------|-----------------|
| 184,70 | 184,70 | 184,65 | 184,75 | 1622,69 | 0,75 |
| 184,70 | 184,70 | 184,60 | 184,80 | 1622,25 | 0,75 |

Рисунок 11 – Фрагмент таблиці результатів розрахунків впливу чотирьоххвильового змішування

Для демонстрації ефекту впливу перехідних завад в матриці втрат демультиплексора було навмисно завищено коефіцієнт перехідних завад на дальньому кінці b_{FEXT} (–10,1 дБ проти –24,7 дБ). Для оцінки впливу перехідних завад на рис. 12 подано часову діаграму роботи другого каналу системи, де зображені: 1 – сигнал без урахування перехідних завад, 2 – перехідна завада, 3 – суміш сигналу та перехідних завад. Видно перехід завад з четвертого до другого каналу.

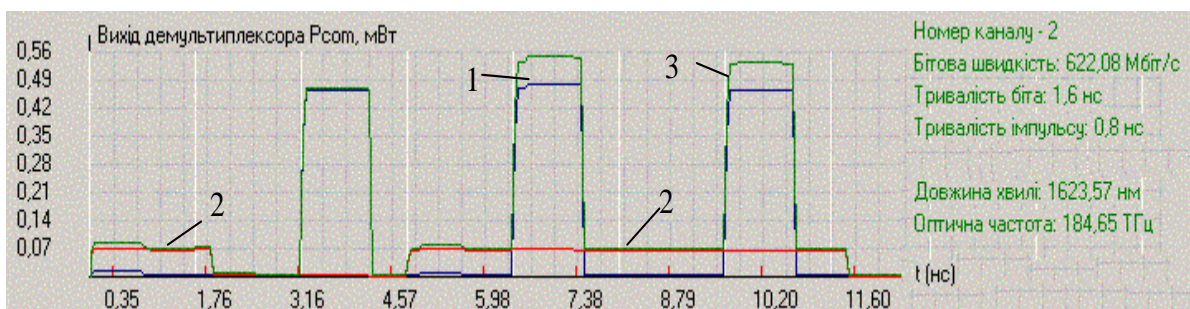


Рисунок 12 – Часова діаграма роботи другого каналу (вихід демультиплексора)

Основні результати розрахунків надані в таблиці на вкладці «Приймачі»; її фрагмент та часові діаграми струму в колі навантаження ФД другого каналу представлені на рис. 13, де показано 1 – сумарний струм сигналу та завад, 2 – струм завад (в режимі передачі двійкового 0).

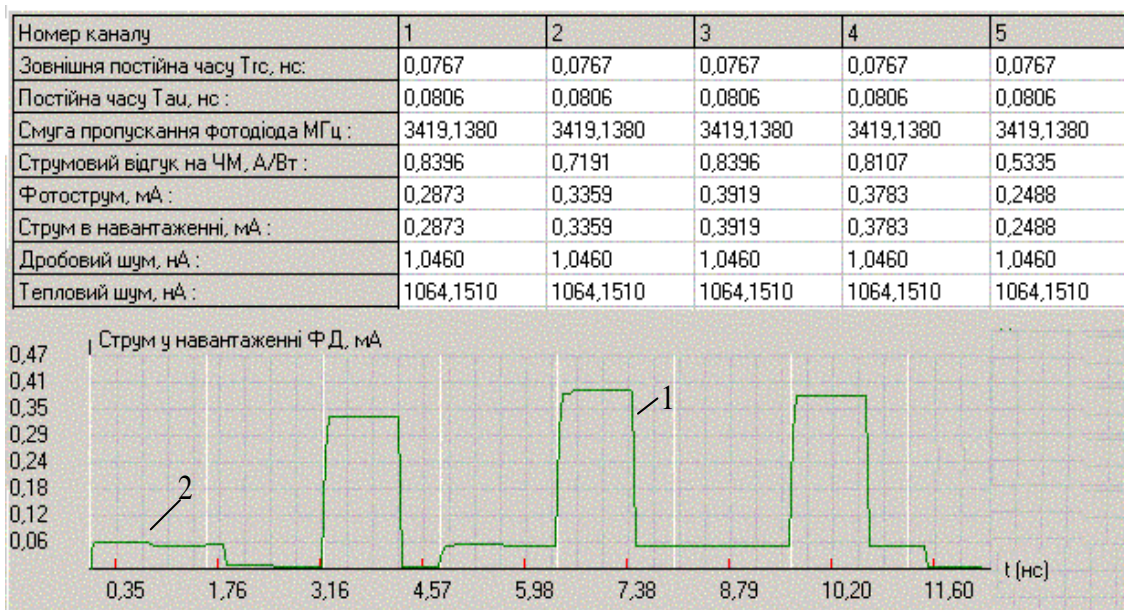


Рисунок 13 – Результати розрахунків та часова діаграма струму у колі навантаження ФД другого каналу

Створено математичну модель лінійного тракту системи передачі зі спектральним мультиплексуванням N каналів. Модель враховує загасання, дисперсію та нелінійні ефекти в оптичних волокнах різних типів – SF, DSF, NZDSF. В алгоритмічному середовищі Delphi розроблено програму WNS імітаційного моделювання WDM-системи передачі. Програма дає можливість імітувати поведінку N -канальної системи та проводити налаштування та оптимізацію кожного спектрального каналу. Як приклад наведено результати моделювання 5-канальної WDM-системи. Програма може бути використана в навчальних (віртуальна лабораторна робота) та тренінгових цілях, а також в інженерних розробках як САПР для дослідження впливу окремих параметрів компонентів на роботу системи в цілому.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Корнейчук В.И. Волоконно-оптические системы передачи / В.И. Корнейчук, И.П. Панфилов. – Одесса: Друк, 2001. – 436 с.
2. Слепов Н.Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи / Слепов Н.Н. – М.: Радио и связь, 2000. – 468 с.
3. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети / Убайдуллаев Р.Р. – М.: Эко-Трендз, 2001. – 267 с.
4. Одрог П.М. WDM / Одрог П.М., Омецинська О.Б., Михайленко Є.В. – [Видання перше (електронне)]; за ред. В.Б. Катка. – К., 2005. – 100 с.

REFERENCES:

1. Korneychuk V.I. Fiber-optic transmission system / V.I. Korneychuk, I.P. Panfilov - Odessa: Druk, 2001. – 436 p.
2. Slepov N.N. Modern technology of digital fiber optic networks / Slepov N.N. – M.: Radio i svyaz, 2000. – 468 p.
3. Ubaydullaev R.R. Fiber optic networks / Ubaydullaev R.R. – M.: Eko-Trendz, 2001. – 267 p.
4. Odnorog P.M. WDM / Odnorog P.M., Ometsinska O.B., Mihaylenko E.V. – [Vidannya pershe (elektronne)]; pro red. V.B. Katka. – K., 2005. – 100 p.