

Є.М. Чернихівський, М.І. Олексін
 Національний університет “Львівська політехніка”,
 ЦТЕ ПМ № 6 філії “Дирекція первинної мережі” ВАТ “Укртелеком”, м. Львів

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ОПТИЧНИХ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ

© Чернихівський Є.М., Олексін М.І., 2009

Розглянуто аналітико-статистичний підхід до моделювання ОТС, створено модель такої системи, наведено методи перевірки її адекватності, подано результати моделювання і їх аналіз. На основі цих результатів запропоновано шляхи підвищення ефективності функціонування таких систем.

In this article the analytical-statistical going is considered near the design of OTS, the model of system is created, the methods of verification of its adequacy are resulted, design results and their analysis are presented, on the basis of these results the ways of increase of efficiency of functioning of such systems are offered.

Вступ

Оператори магістральних телекомунікаційних мереж постійно шукають шляхи зменшення вартості обладнання, хоча останнім часом на перше місце виходить вартість передачі біта інформації, для зниження якої найкраще підходить збільшення швидкості передавання інформації (в одному спектральному каналі) і збільшення пропускної здатності мережі (збільшення кількості каналів) як з використанням вже прокладених оптичних волокон, так і інсталяції нових. Саме для розв'язання цих завдань розробляються нові оптичні і оптоелектронні компоненти, вдосконалюються методи модуляції оптичних сигналів і методи боротьби з негативним впливом дисперсії і нелінійних ефектів, що, своєю чергою, вимагає проведення значної кількості як експериментальних, так і теоретичних досліджень. Проведення повного спектра експериментальних досліджень на функціонуючих транспортних мережах є доволі складним, а здебільшого і неможливим, тому найоптимальнішим виходом з цієї ситуації є поєднання теоретичних розрахунків, реальних вимірювань на транспортній мережі, моделювання оптичних транспортних систем (ОТС) і окремих їх елементів. Під час дослідження складних систем з великою кількістю впливаючих як детермінованих, так і стохастичних чинників, саме імітаційне моделювання може дати необхідний результат.

Сьогодні в Україні обладнання для побудови оптичних транспортних систем на основі технології спектрального ущільнення каналів майже не виробляється, а постачальники ж такого обладнання використовують для своїх розрахунків спеціальне програмне забезпечення і, як правило, не надають його для зовнішнього користування. Отже, за значних фінансових затрат вітчизняні оператори зв'язку фактично не можуть ефективно контролювати процеси проектування транспортної мережі, від якості якого істотно залежать майбутні її можливості. Саме тому оператори зв'язку проявляють значний інтерес до проведення наукових досліджень в області оптичних систем передавання інформації, розроблення власних інструментів для інженерного розрахунку систем зв'язку, а також для підвищення ефективності використання вже функціонуючих ОТС.

Аналітико-статистична модель оптичної транспортної системи

Основний критерій, який приймається до уваги під час визначення максимальної швидкості передавання інформації і довжини регенераційної ділянки, – це коефіцієнт бітової помилки, який є комплексним параметром, що залежить від впливу великої кількості чинників і їх взаємодії. Ці чинники за характером їх впливу можна поділити на групи: загасання, усі види дисперсії, що призводять до міжсимвольної інтерференції, і чинники, що пов'язані із нелінійними ефектами, негативний вплив яких особливо істотний на високих швидкостях передавання в системах зі

спектральним ущільненням каналів. Враховуючи основні характеристики волоконно-оптичної системи передавання інформації і основних обмежувальних чинників швидкості і відстані передавання без регенерації, була запропонована аналітико-статистична модель оптичної транспортної системи на основі технології спектрального ущільнення каналів, структурну схему якої показано на рис. 1.

Основними вхідними даними моделі є: швидкість передавання для кожного спектрального каналу, довжина лінії зв'язку, характеристики передавальних (робоча довжина хвилі, смуга випромінювання, оптична потужність (може відрізнятися для різних спектральних каналів)) і приймальних (чутливість для заданого коефіцієнта помилки) оптичних модулів, оптичного волокна (показник заломлення і його нелінійна складова, дисперсійні характеристики – коефіцієнт хроматичної і поляризаційної модової дисперсії, діаметр модового поля, загасання тощо), характеристики системи зі спектральним ущільненням каналів (кількість каналів, ширина смуги між каналами), а також такі характеристики нелінійності, як нелінійний коефіцієнт поширення, ефективність стимульованого розсіювання Бріллюена і Рамана.

Ця модель (рис. 1) має блочну структуру і демонструє системний підхід до моделювання складних систем, де визначальною є мета функціонування – визначення коефіцієнта бітової помилки шляхом аналізу ОКО-діаграми для кожного спектрального каналу. На основі початкових даних, які відомі з аналізу оптичної транспортної системи, тих обмежень, які накладаються на систему зверху, або, враховуючи можливості її реалізації, і на основі мети функціонування формулюються початкові вимоги до моделі системи. На основі цих вимог формуються деякі підсистеми та елементи і здійснюється найскладніший етап синтезу – вибір складових системи, для чого використовуються спеціальні критерії вибору.

Особливістю функціонування оптичних транспортних систем на основі технології спектрального ущільнення є подеколи навіть істотна відмінність між параметрами і характеристиками у різних спектральних каналах, тому одне з основних завдань моделювання – зберегти адекватну відмінність у параметрах між різними каналами. Для цього необхідно виділити насамперед залежні від довжини хвилі параметри і характеристики.

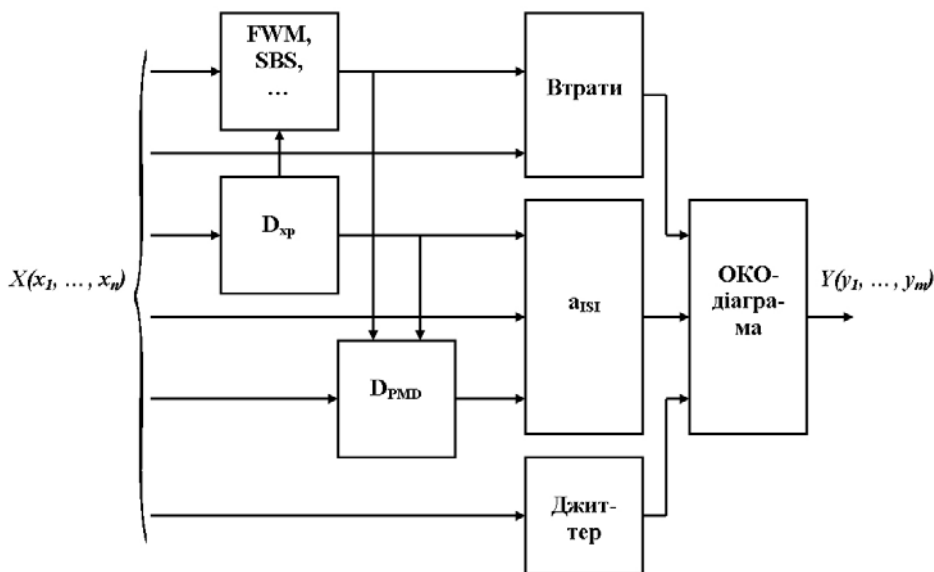


Рис. 1. Структурна схема моделі оптичної транспортної системи:

FWM, SBS, ... – блок розрахунку впливу нелінійних ефектів;

D_{xp} – обчислення хроматичної дисперсії; D_{pMD} – моделювання поляризаційної модової дисперсії; Втрати – обчислення втрат потужності спектральних каналів системи DWDM; a_{ISI} – блок обчислення втрат міжсимвольної інтерференції;

Джиттер – моделювання джиттера передачі даних і синхронізації;

ОКО-діаграма – блок побудови око-діаграми; $X(x_1, \dots, x_n)$ – вектор вхідних даних;

$Y(y_1, \dots, y_m)$ – вектор вихідних даних (параметрів якості обслуговування),

що є результатом моделювання

Блок (FWM, SBS,...) моделює нелінійні ефекти і дає змогу обчислити усі довжини і потужності паразитних хвиль, що виникають внаслідок чотирьохвильового змішування, виявити рівень шумів у кожному спектральному каналі системи DWDM, обчислити поріг стимульованого розсіювання Бріллюена і поріг стимульованого розсіювання Рамана, що необхідно для визначення максимально допустимих потужностей кожного зі спектральних каналів, визначити також зсув фази внаслідок фазової самомодуляції і перехресної фазової модуляції, що відповідає зміщенню спектральної смуги певного каналу системи і систематичному дрижанню фази. Обчислення негативного впливу нелінійних ефектів зводиться до визначення запасу з потужності, що входить в розрахунок бюджету потужності системи передавання для кожного спектрального каналу окремо.

Хроматична і поляризаційно-модова дисперсія моделюються окремо в двох блоках, оскільки природа цих видів дисперсії має принципову різницю. Визначення хроматичної дисперсії здійснюється аналітичним методом для кожного спектрального каналу окремо, оскільки дисперсійна характеристика оптичного волокна може мати нахил і залежати від довжини хвилі оптичної несучої. Поляризаційно-модова дисперсія має випадковий характер зміни і тому визначається шляхом статистичного моделювання. ПМД першого порядку залежить від ширини смуги випромінювання і довжини хвилі джерела випромінювання, тому статистичний розрахунок здійснюється також окремо для кожного спектрального каналу.

Сумарні втрати визначаються як сума втрат в оптичному волокні, роз'ємних і нероз'ємних з'єднаннях, а також розсіювання і втрати внаслідок впливу модельованих нелінійних ефектів – їх об'єднано в блок «Втрати». Також цей блок враховує оптичне співвідношення сигнал/шум і його зміну шляхом використання оптичних підсилювачів.

Міжсимвольна інтерференція (MI) виникає внаслідок розмиття фронтів імпульсів і залежить також від характеристик оптичного приймача, обчислюється в блоці aISI. По суті MI – це внесення додаткових шумів за рахунок накладання сусідніх імпульсів і, як наслідок, погіршення якості оптичного сигналу.

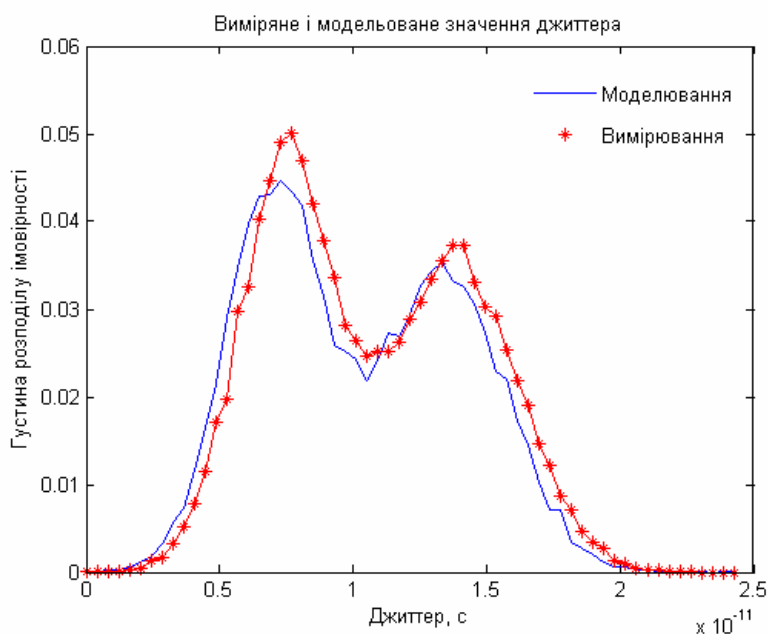


Рис. 2. Густина розподілу імовірності джиттера

Як відомо, фазове дрижання (джиттер) визначається як короткочасні фазові відхилення цифрового сигналу від його ідеального стану в часі. Другим параметром, тісно пов'язаним з дрижанням фази, є дрейф фази (вандер), який, як правило, належить до довготривалих змін фази сигналу. Функція фазового дрижання може бути отримана шляхом графічного відображення в часі відхилень положення фронту імпульсу чи вибраної точки синусоїдального сигналу на виході контрольованої системи. Загалом джиттер має як випадкову, так і систематичну складову. Систематична складова визначається

на основі зсувів фази внаслідок нелінійних ефектів, а випадкова складова виникає внаслідок шумів електронних компонент. У розробленій моделі джиттер моделюємо шляхом статистичного моделювання, а розподіл густини імовірності цього параметра повністю повторює розподіл, отриманий експериментально. Густину розподілу імовірності джиттера, отриману шляхом вимірювань на ОТС і шляхом моделювання на описаній вище моделі, показано на рис. 2.

На цьому рисунку показано нормоване значення джиттера. Реальне ж його значення встановлюється для кожного конкретного модельного експерименту і залежить від багатьох чинників, основними з яких є: довжина оптичної лінії зв'язку, швидкість передавання інформації, потужність джерела, кількість оптичних підсилювачів тощо. Детермінована складова джиттера переважає в центрі графіка, а випадкова складова – на краях розподілу. Для визначення коефіцієнта бітової помилки потрібно розділити ці складові, а також визначити параметри нормальних розподілів (математичне очікування і дисперсію) на краях результуючого розподілу.

Взаємозв'язок між чинниками, що враховується в моделі, на схемі рис. 1 показано стрілками між відповідними блоками. Взаємний вплив чинників, що враховуються в моделі:

- вплив хроматичної дисперсії на ефективність чотирьохвильового змішування;
- вплив хроматичної дисперсії і нелінійних ефектів на ширину смуги випромінювання лазера;
- вплив ширини смуги лазера на значення поляризаційної модової дисперсії;
- вплив нелінійних ефектів на співвідношення сигнал/шум;
- вплив нелінійних ефектів на величину джиттера.

Як відомо, око-діаграма – це також статистичний метод отримання значення Q-фактора, і як наслідок, коефіцієнта бітової помилки шляхом аналізу багатократного накладання імпульсів, що передавалися через лінію зв'язку з певними характеристиками. Отже, отримані в моделі часові і енергетичні параметри використовуються для побудови око-діаграми шляхом багатократного накладання передаваних імпульсів і моделюються у відповідному блоці. ОКО-діаграма будується для кожного спектрального каналу системи DWDM окремо, і для кожного каналу отримуємо відповідне значення BER.

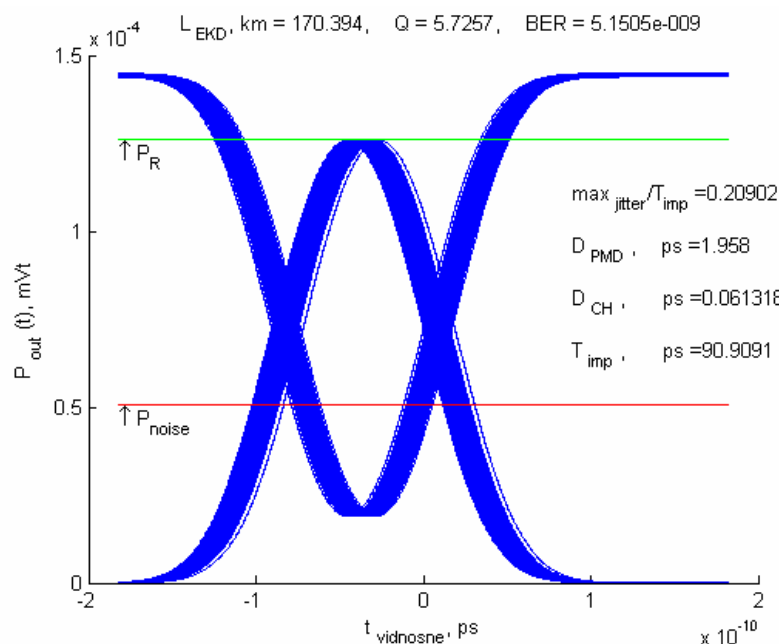


Рис. 3. ОКО-діаграма, отримана за допомогою розробленої моделі ОТС

Результатом аналізу око-діаграми є вихідний вектор, що містить усі параметри і характеристики якості обслуговування (QoS), отримані шляхом аналітично-статистичного моделювання. Приклад око-діаграми під час передачі послідовностей «101» та «010» показано на рис. 3. Ще один нюанс під час моделювання джиттера – вибір достатньо малого кроку за обчислення вихідних імпульсів для уникнення дискретності на око-діаграмі.

Перевірка адекватності створеної моделі

Перевірка адекватності моделі – один з найважливіших етапів моделювання систем. Проведення досліджень на неадекватній моделі взагалі втрачає сенс. З іншого боку, модель не може бути на усі 100 % адекватною реальній системі, тому можна говорити про адекватність певних характеристик, що цікавлять дослідника.

Модель оптичної транспортної системи є доволі складною, тому оцінку адекватності необхідно проводити за такою схемою:

- характеристики системи, що описуються відомими аналітичними виразами, не потребують перевірки;
- характеристики і параметри, що є випадковими величинами, перевіряються шляхом порівняння з результатами експериментальних досліджень та з відомими аналітичними функціями розподілу;
- проведення комплексного моделювання параметрів якості обслуговування системи і порівняння цих результатів з результатами вимірювань на реальній оптичній транспортній системі із спектральним ущільненням каналів.

Аналітичними виразами в моделі визначаються такі характеристики: усі перераховані нелінійні ефекти, хроматична дисперсія, загасання сигналу в оптичному волокні.

Шляхом статистичного моделювання визначається поляризаційна модова дисперсія і джиттер.

Моделювання ПМД здійснюється модифікованим методом Джонса і емуляції передачі оптичного сигналу через багатосегментну структуру оптичного волокна. В такий спосіб можна отримати залежність ПМД від довжини хвилі оптичної несучої, ширини смуги випромінювання лазера, еліпса поляризації вхідного в ОВ випромінювання, а також від довжини оптичного волокна. Отримані шляхом моделювання значення диференціальної групової затримки (ДГЗ) та ПМД порівнюються з експериментальними даними вимірювань на функціонуючій оптичній транспортній системі. У середовищі MatLAB за допомогою розробленої моделі генерується послідовність значень ДГЗ такої ж довжини, як і кількість проведених вимірювань. Математичне очікування модельованої послідовності дорівнює математичному очікуванню послідовності експериментальних даних і становить 1 (нормування за середнім значенням). Із кожної послідовності у випадковий спосіб робимо вибірку з певною кількістю елементів. Діапазон усіх значень вимірюваної ДГЗ розбивається на 64 піддіапазони і для кожної послідовності (вимірюваної і модельованої) визначається кількість значень ДГЗ, що потрапляє у кожен із піддіапазонів.

Для отриманих розподілів ДГЗ кожної з вибірок і результатів експериментальних вимірювань за критерієм Колмогорова-Смірнова проводиться перевірка належності їх до одного закону розподілу. Критерій Колмогорова-Смірнова вибрано на підставі того, що точність оцінки не залежить від виду розподілу. Перевірка за цим критерієм показала, що міра розбіжності між двома вибірками не є статистично значущою, отже, обидві вибірки належать до одного закону розподілу.

Статистичне моделювання джиттера здійснюється шляхом генерації послідовності з потрібним законом розподілу (закон отримано шляхом експериментальних вимірювань джиттера реальної ОТС). Отже, результати моделювання і вимірювання джиттера передачі даних і синхронізації також мають один і той самий закон розподілу. У розробленій моделі ОТС значення джиттера не залежить від довжини хвилі, тому розподіл джиттера є однаковим для кожного спектрального каналу.

Відповідність між значеннями BER, отриманими шляхом дослідження моделі ОТС, і між реальними вимірюваннями досягається шляхом калібрування моделі. Приймачі оптичного випромінювання проектується, враховуючи номінальне значення Q-фактора для заданої імовірності помилки за певного співвідношення сигнал/шум. Оскільки в моделі використовується гіпотетичний оптичний приймач, то задача калібрування моделі саме і полягає у забезпеченні відповідності між результатами моделювання і дослідження шляхом вибору потрібних характеристик оптичного приймального модуля. Алгоритм калібрування є таким:

1. Відключаємо вплив джиттера, а вплив усіх видів дисперсії як детерміновані складові, так і статистичні, встановлюємо в їхні математичні очікування постійними.
2. Визначаємо довжину оптичної лінії зв'язку з заданими параметрами затухання і дисперсії, впливу нелінійних ефектів тощо, для якої рівень потужності сигналу на вході приймача дорів-

новатиме заданій чутливості цього приймача. Можливим є використання також зворотного підбору – для заданої довжини оптичного волокна підбираємо таку потужність вхідного сигналу, щоб після проходження через оптичне волокно, враховуючи усі види втрат, ми отримали рівень потужності на виході ОВ такого, що дорівнює чутливості приймача.

3. Знайшовши таку довжину і потужність, потрібно домогтись, щоб визначений за експериментальною ОКО-діаграмою Q-фактор дорівнював номінальному за заданого коефіцієнта бітової помилки. Це можна досягнути шляхом підбору рівня шумів приймача. Цей визначений рівень шуму і дасть змогу прив'язати модель до реальної системи з заданими їй характеристиками.

4. Включаємо випадковий вплив ПМД і джиттера, а також вплив усіх нелінійних ефектів. Модель готова до проведення модельних експериментів.

Природно, що із врахуванням впливу нелінійних ефектів і дисперсії якість сигналу, виражена коефіцієнтом бітової помилки, погіршиться. Змінюючи значення рівнів чинників моделі, можна отримати потрібні залежності.

Результати моделювання оптичної транспортної системи

Показником ефективності функціонування оптичних транспортних систем є пропускна здатність мережі, яка істотно залежить від бітової швидкості передавання інформації, тому одне з основних питань, над яким працюють дослідники, є методи збільшення цієї швидкості. Звичайно, що із збільшенням швидкості передавання зростає і коефіцієнт бітової помилки під впливом обмежувальних чинників, основними з яких є дисперсія, джиттер і нелінійні ефекти.

Метою цього пункту є дослідження залежності коефіцієнта бітової помилки від вищеперахованих чинників. Залежність Q-фактора (відповідно і коефіцієнта BER) від швидкості передавання інформації показано на рис. 4.

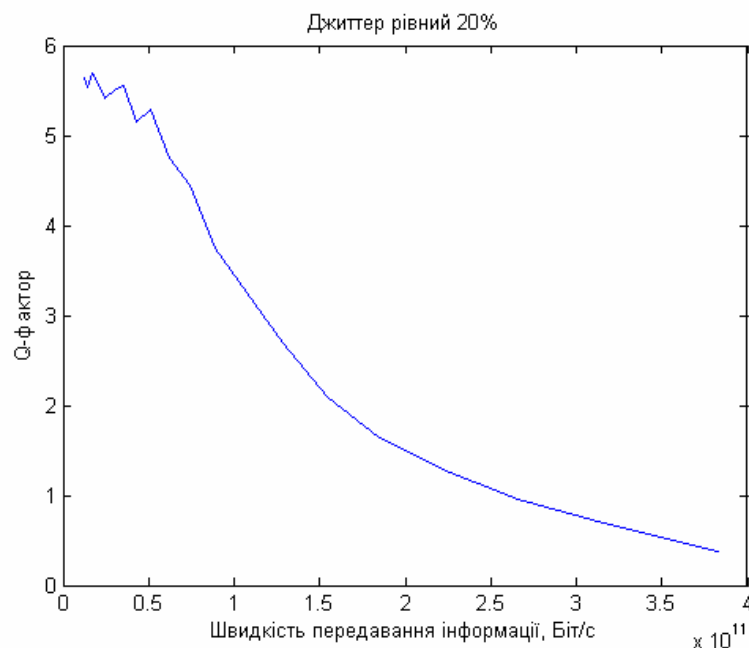


Рис. 4. Залежність Q-фактора від швидкості передавання

Як бачимо з цього рисунка, із збільшенням швидкості значення Q-фактора зменшується за незмінних інших параметрів. Деякі коливання Q-фактора в початковій області кривої пояснюються точністю проведення статистичного експерименту. Для збільшення лінійної швидкості передавання інформації потрібно зменшити поляризаційно-модову дисперсію і джиттер.

Як було показано вище, джиттер складається як з детермінованої, так і з випадкової складових. Детермінована складова залежить насамперед від фазових зсувів, що є постійними для заданої конфігурації ОТС (нелінійні ефекти, зсуви синхронізації тощо). Випадкова складова джиттера зумовлена шумом електронних компонент.

Ідея зменшення впливу джиттера є такою: потрібно визначити величину детермінованої (систематичної) складової джиттера і точку синхронізації (детектування) сигналу зсунути на цю величину.

На рис. 5 показано залежність коефіцієнта бітової помилки (виражену Q-фактором) від вибору точки максимального розкривання око-діаграми.

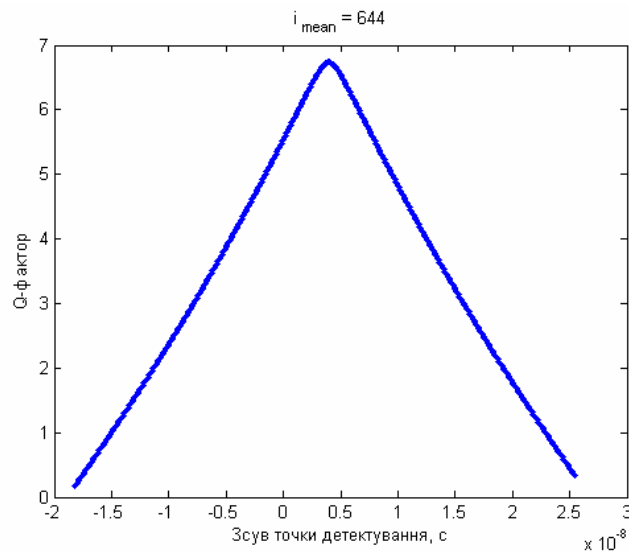


Рис. 5. Залежність Q-фактора від визначення точки максимального розкривання око-діаграми

Як бачимо з цього рисунка, максимальне значення Q-фактора отримуємо саме в точці математичного очікування величини джиттера, тобто його детермінованої складової. Це істотно спрощує реалізацію схеми зменшення джиттера, оскільки статистичне значення залишається постійним, незалежно від коливань випадкової складової.

Зменшення впливу ПМД також істотно впливає на значення коефіцієнта бітової помилки. Дослідження ефективності розробленої схеми компенсації ПМД показано на рис. 6.

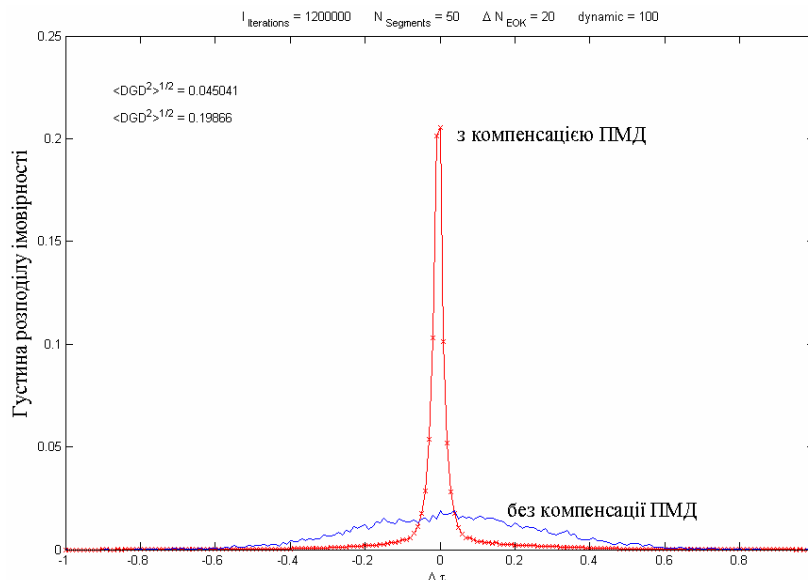


Рис. 6. Розподіл ДГЗ для системи з компенсацією і без компенсації ПМД

Як зрозуміло з отриманих результатів, розроблена схема компенсації ПМД дає змогу зменшити вплив цього виду дисперсії в середньому у 4 рази. На рис. 7 показано око-діаграму сигналів, яку отримуємо на приймальному кінці без використання схеми і з її використанням.

Око-діаграму функціонування оптичного спектрального каналу показано на рис. 5.

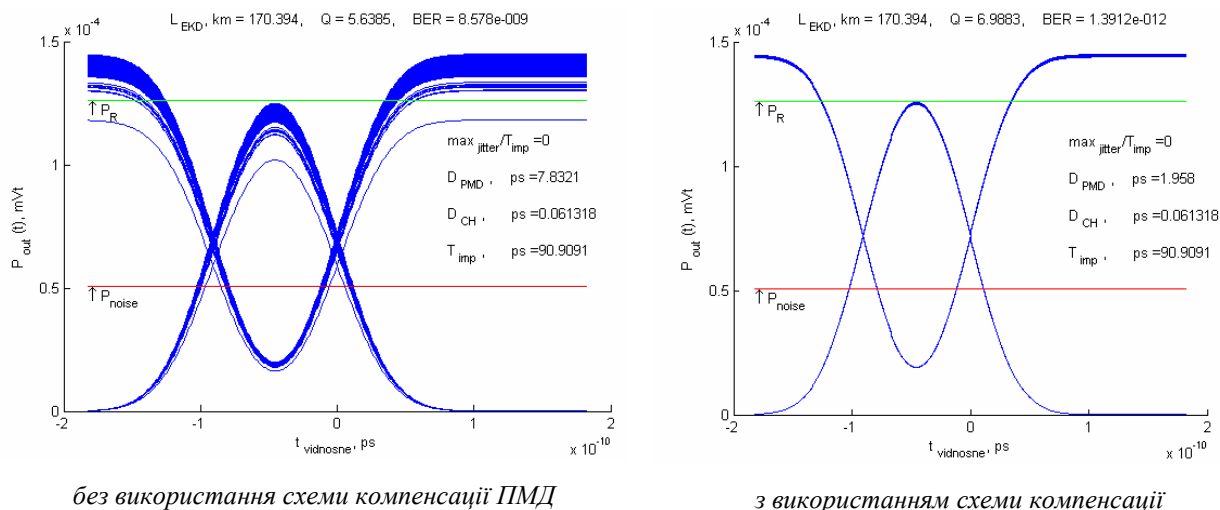


Рис. 5. Око-діаграма під час передачі імпульсів без і з використанням розробленої схеми компенсації ПМД

Як бачимо з отриманих результатів, зменшення ПМД у 4 рази за допомогою використання схеми компенсації дає змогу на два порядки зменшити коефіцієнт бітової помилки.

Висновки

Отже, як показали експериментальні дослідження на реальних оптичних мережах на розробленій моделі, так і теоретичні розрахунки, основними обмежувальними чинниками швидкості передавання є нелінійні ефекти, дисперсія і джиттер, тому підвищення ефективності їх функціонування лежить в площині зменшення негативного впливу цих явищ. Як ПМД, так і джиттер мають випадковий характер зміни, тому зменшення їх впливу вимагає реалізації динамічних схем компенсації.

Схема компенсації ПМД повинна відслідковувати «миттєве» значення диференціальної групової затримки і адекватно реагувати на цю зміну. Така схема була розроблена на основі модулятора еліпса поляризації вхідного світлового випромінювання і зворотного каналу, ефективність використання якої становить ~ 4 рази.

Для зменшення впливу джиттера потрібно визначити його детерміновану складову і зсунути у часі точку детектування сигналів на величину цієї складової, що також дають змогу підвищити ефективність функціонування ОТС.

Запропоновані у цій роботі методи зменшення негативних впливів дисперсії і джиттера дають змогу в середньому на порядок зменшити коефіцієнт бітової помилки, що дає змогу підвищити ефективність функціонування оптичної транспортної системи.

1. Бурдин В.А., Баскаков В.С., Бурдин А.В., Косова А.Л. Расчет глаз-диаграммы канала связи волоконно-оптической системы передачи. – Самара, 2004. – 24 с. 2. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем: Учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2001. – 343 с. 3. ITU-T Recommendations G.957 (06/99) Optical interfaces for equipments and systems relating to the synchronous digital hierarchy. 4. Климаш М.М., Чернихівський Є.М. Модель поляризаційно-модової дисперсії оптичного волокна // Вісник НУ “Львівська політехніка” “Радіоелектроніка і телекомунікації”. – 2005. – № 534. – С. 84–86. 5. Убайдуллаев Р.Р. Протяжение ВОЛС на основе EDFA // Lightwave russian edition. – 2003 – № 1. – С. 22–28. 6. Стариков Н.С. Q-фактор: новый подход к анализу качества цифровых систем передачи // Метрология и измерительная техника в связи. – 2002. – № 5. – С. 17–18.