Харківський національний університет радіоелектроніки

**Переверзев Олександр Анатолійович**

УДК 621.391

# МЕТОДИ ВИБОРУ СВІТЛОВИХ ШЛЯХІВ І ПРИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИН ХВИЛЬ У МЕРЕЖАХ WDM З УРАХУВАННЯМ ЯВИЩА ЧОТИРЬОХХВИЛЬОВОГО ЗМІШУВАННЯ

05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

## АВТОРЕФЕРАТ

**дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук**

Харків 2013

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі телекомунікаційних систем Харківського національного університету радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник доктор технічних наук, доцент

**Агеєв Дмитро Володимирович,**

Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри телекомунікаційних систем.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор

**Романов Олександр Іванович,**

Науково-технічний інститут телекомунікаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» , професор кафедри телекомунікацій;

кандидат технічних наук, доцент

**Руккас Кирило Маркович,**

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, доцент кафедри теоретичної та прикладної інформатики.

Захист відбудеться “16 “ ***жовтня 2013 р.*** о 15 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.09 при Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Леніна 14.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166 м. Харків, пр. Леніна. 14.

Автореферат розісланий “13 ” ***вересня 2013 р.***

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради О.Ю. Євсєєва

## Загальна характеристика роботи

**Актуальність теми.** Останнім часом спостерігається зростаюча потреба збільшення пропускної здатності сучасних транспортних мереж. Задоволення цієї потреби можливо шляхом використання технології спектрального ущільнення каналів WDM. Передача інформації в WDM-мережах проводиться вздовж світлових шляхів, у яких довжина хвилі залишається незмінною. Це суттєво відрізняє ці мережі від мереж з комутацією пакетів або комутацією каналів, що вимагає інших методів знаходження маршрутів.

При передачі трафіка між парою абонентів по мережі WDM необхідно розв’язати таку задачу: при відомій топології мережі і заданих вимогах на установку з'єднання необхідно вибрати світловий шлях між парою відправник - одержувач і призначити йому довжину хвилі. Ця задача відома як вибір світлового шляху і призначення довжин хвиль (Routing and Wavelength Assignment, RWA).

Задача RWA в оптичних мережах WDM має відмінну рису у порівнянні з мережами, побудованими за іншими технологіями. Так як обладнання WDM, яке встановлюється у вузлах мережі, не може змінювати довжину хвилі оптичного сигналу, при призначенні довжин хвиль в мережі може виникати ситуація, коли в мережі на різних її ділянках є незайняті довжини хвиль (незадіяні пропускні спроможності каналів зв'язку), але провести вибір маршруту і довжини хвилі для забезпечення передачі інформаційного потоку між кінцевими вузлами неможливо. Підвищити пропускну здатність мережі та усунути подібні блокування можливо за рахунок встановлення оптичних конверторів, які дозволяють змінювати довжину хвилю оптичного сигналу. Це дозволяє зменшити кількість блокувань і збільшити пропускну здатність мережі за рахунок повторного використання довжин хвиль. Однак при цьому зростає вартість побудови такої мережі, тому установка конверторів широкого застосовується тільки у деяких вузлах. Таким чином, розв’язання задачі RWA та вибору місць установки конверторів для забезпечення ефективного використання потенціалу пропускної здатності мережі WDM та мінімізування вартості мережі на сучасному етапі є важливою задачею.

Крім того слід відмити, що при використанні мереж WDM виникає явище чотирьохвильового змішування. На практиці для зменшення впливу цього явища використовуються волокна спеціального типу, але при цьому зменшується пропускна здатність мережі. У цій роботі пропонується враховувати використання впливу чотирьохвильового змішування при проектуванні мереж WDM та використовувати такі комбінації довжин хвиль і маршрути в мережі, щоб зменшити вплив чотирьохвильового змішування. У той же час відомі методи розв’язання задачі RWA не враховують впливу нелінійного явища чотирьохвильового змішування, що призводить до збільшення ймовірність бітової помилки у мережі.

Таким чином, тему дисертаційної роботи та **науково-прикладну задачу**, яка полягає в удосконаленні існуючих методів вибору світлових шляхів і призначенні довжин хвиль за рахунок врахування при розв’язанні задач явища чотирьохвильового змішування та вибору місць встановлення оптичних конверторів, можна важати актуальними.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконувалася у відповідності до положень «Концепції національної інформаційної політики», «Концепції Національної програми інформатизації», «Концепції конвергенції телефонних мереж і мереж з пакетною комутацією в Україну» і з «Основними засадами розвитку інформаційного суспільства в Україні на 2007-2015 роки», планами перспективного розвитку ПАТ «Укртелеком».

Крім того, напрям досліджень було пов'язано з планами університету та кафедри телекомунікаційних систем, де виконувалась дана робота, зокрема, матеріали дисертації були використані у науково-дослідних роботах, які виконувалася на кафедрі телекомунікаційних систем ХНУРЕ: «Методи проектування телекомунікаційних мереж NGN та управління їх ресурсами» (тема №235-1) та «Методи підвищення продуктивності безпроводових мереж наступного покоління» (тема № 261-1).

**Мета і задачі дослідження.** Мета роботи полягає у зменшенні ймовірності помилки при передачі інформації в оптичних мережах на основі технології WDM та збільшенні ефективності використання цих мереж.

*Об'єктом дослідження* в дисертаційній роботі є процес проектування оптичної мережі на основі технології WDM.

*Предметом дослідження* є методи синтезу оптичної мережі на основі технології WDM.

*Методами дослідження* є: методи оптимізації, математична статистика і теорія ймовірностей, теорія масового обслуговування, теорія графів, методи імітаційного моделювання.

*Задачі дослідження.* Відповідно до поставленої мети в дисертаційній роботі вирішуються наступні основні задачі дослідження:

– аналіз існуючих методів синтезу мереж на основі технології WDM;

– розробка методу розв'язання задачі вибору світлових шляхів і призначення довжин хвиль з урахуванням явища чотирьохвильового змішування;

– розробка методу синтезу мережі радіодоступу на основі технології «радіо по волокну»;

– оцінка ефективності запропонованих в роботі методів і виробка рекомендацій практичного застосування.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в тому, що:

1. Отримав подальший розвиток метод вибору маршрутів і призначення довжин хвиль за рахунок врахування при розв'язанні задачі явища чотирьохвильового змішування, що дозволило зменшити ймовірність бітової помилки при передачі інформації по мережі WDM.

2. Вдосконалено метод розв'язання задачі вибору світлових шляхів і призначення довжин хвиль з використанням оптичних конверторів на основі евристичного алгоритму бджолиної колонії, новизна методу полягає в: 1) модифікації розрахункового вираження ймовірності вибору світлового шляху з урахуванням того, що на вузлах маршруту може перебувати декілька оптичних конверторів; 2) врахування впливу чотирьохвильового змішування при розрахунку вагового

коефіцієнта вибору світлового шляху. Це дозволило збільшити число встановлених з'єднань і підвищити надійність передачі інформації в мережі WDM.

3. Одержав подальший розвиток метод розв’язання задачі динамічного вибору світлових шляхів і призначення довжин хвиль, новизна методу полягає у врахуванні впливу явища чотирьохвильового змішування на етапі розрахунку вагового коефіцієнта світлового шляху при установці з'єднання; використання метрики пропускної спроможності на етапі динамічного пошуку маршруту, що дало можливість зменшити ймовірність блокування і підвищити якість обслуговування за параметром ймовірність бітової помилки.

4. Уперше розроблено метод синтезу мережі радіодоступу на основі технології «радіо по волокну», що дало можливість проектувати мережі з високим рівнем масштабованості та зменшити вартість їх реконфігурації.

**Практичне значення одержаних результатів.** Запропоновані в роботі математичні моделі і методи структурного та параметричного синтезу мають важливе практичне значення, оскільки відкривають можливість синтезу високоефективних за економічними та технічними показниками структур телекомунікаційних мереж в процесі проектування оптичної мережі на основі технології WDM.

Практична цінність отриманих результатів полягає в тому, що запропоновані в дисертаційній роботі математичні моделі та методи розв’язання задачі вибору світлових шляхів і призначення довжин хвиль отримали програмну реалізацію у вигляді підпрограм у складі програмного комплексу, що дає можливість розв’язувати задачі вибору світлових шляхів і призначення довжин хвиль у мережах на основі технології WDM. За допомогою даного програмного забезпечення було доведено можливість практичної реалізації та працездатності запропонованих у роботі методів. Розробка призначена для застосування при проектуванні телекомунікаційних мереж.

Матеріали дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі кафедри телекомунікаційних систем Харківського національного університету радіоелектроніки у практичних та лабораторних заняттях з дисциплін «Методи проектування телекомунікаційних систем», «Архітектура LTE», які читають у 9 семестрі, та «Перспективи безпроводових систем», яку читають у 10 семестрі студентам спеціальності «Телекомунікаційні системи та мережі», що підтверджується актом впровадження.

**Особистий внесок здобувача.** Робота виконана на кафедрі телекомунікаційних систем Харківського національного університету радіоелектроніки. Всі основні наукові результати, подані в дисертаційній роботі, отримано автором самостійно й повністю опубліковано в спеціалізованій літературі [1-20].

У роботах, виконаних у співавторстві, особисто Переверзеву О.А. належать такі наукові результати: в [1] синтез математичної моделі мультисервісного вузла доступу та вибір методики розрахунку пропускних здатностей каналів зв’язку транспортної мережі; у [2] вибір критерію і синтез системи обмежень, яка враховує особливість мереж WDM; у [3] розв’язання задачі вибору світлових шляхів і призначення довжин хвиль у мережах DWDM з урахуванням впливу явища чотирьохвильового змішування; у [4] метод розв’язання задачі вибору світлових шляхів і призначення довжин хвиль у

мережах DWDM на основі алгоритму BCO-RWA з урахуванням впливу явища чотирьохвильового змішування; у [5] застосування методу розв'язання задачі вибору світлових шляхів і призначення довжин хвиль з урахуванням впливу явища чотирьохвильового змішування в мережі «радіо по волокну»; у [6] метод синтезу мереж радіодоступу на основі технології «радіо по волокну»; у [7] метод розв’язання задачі динамічного вибору світлових шляхів і призначення довжин хвиль у мережах DWDM з урахуванням впливу явища чотирьохвильового змішування.

**Апробація результатів дисертації.** Результати дисертації доповідалися на 6-ти міжнародних форумах та конференціях: 15-му, 16-му та 17-му Міжнародних молодіжних форумах «Радіоелектроніка і молодь в XXI сторіччі» (м. Харків, ХНУРЕ, 2011, 2012, 2013); 4-му Міжнародному радіоелектронному форумі «Прикладна радіоелектроніка. Стан та перспективи розвитку». МРФ – 2011 (м. Харків, АНПРЕ); 7-й Науково-технічній конференції «Світ інформації та телекомунікацій - 2010» (м.Київ, ДУІКТ); 1-й Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених «Інфокомунікації – сучасність та майбутнє» (м.Одеса, ОНАЗ, 2011); XI$^{th}$ International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science. TCSET’ 2012 (Львів-Славсько, НУ «Львівська політехніка»), а також на наукових семінарах кафедри телекомунікаційних систем ХНУРЕ.

**Публікації.** За матеріалами дисертації опубліковано 20 робіт, у тому числі 7 статей, серед яких 5 статей у наукових фахових виданнях України [1–5] та 2 статті у закордонних журналах [6-7]. Одержані результати та висновки апробовано на 12 міжнародних наукових конференціях та форумах [8–19], з яких 2 на міжнародних конференціях під егідою IEEE. Отримано патент на корисну модель [20].

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація обсягом 144 сторінки складається зі вступу, п’ятьох розділів, висновків, додатків, містить 26 рисунків, 3 таблиць та список використаних джерел з 77 найменувань.

## Основний зміст роботи

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та задачі дослідження, наведено 4 пункти наукової новизни одержаних результатів та визначено практичну цінність отриманих у роботі результатів. Наведено основні дані по публікаціям та особистому внеску здобувача. Дано загальну характеристику роботи.

**У першому розділі** наведено особливості архітектури мереж NGN та огляд транспортних мереж на основі технології WDM. Проведено аналіз існуючих методів синтезу оптичних транспортних мереж на основі технології WDM.

Наведено огляд математичних моделей та методів розв’язання задачі вибору світлових шляхів і призначення довжин хвиль в мережах WDM. Деякі з них використовують такі методи оптимізації, які дозволяють гарантовано знаходити глобальний оптимум, а саме цілочисельне лінійне програмування. Але при великій розмірності розв'язуваної задачі методи, які приводять оптимізаційну задачу до типу цілочисельного лінійного програмування, неефективні, тому вирішити дану проблему вдається за рахунок застосування евристичних алгоритмів, таких як Табу-пошук, генетичні алгоритми. Встановлено, що загальним недоліком розглянутих методів

розв’язання задачі вибору світлових шляхів і призначення довжин хвиль є відсутність врахування впливу явища чотирьоххвильового змішування.

Розглянуто особливості побудови мережі радіодоступу на основі технології «радіо по волокну». Проведено аналіз існуючих методів синтезу безпроводових мереж радіодоступу.

Наприкінці розділу зроблено загальну постановку задачі дисертаційного дослідження.

**Другий розділ** присвячено розробці методів розв’язання задачі вибору світлових шляхів і призначення довжин хвиль з врахуванням чотирьоххвильового змішування та з допомогою як точних, так і субоптимальних евристичних методів.

Для оптичної мережі з невеликою кількістю вузлів і доступних довжин хвиль в роботі можна використовувати метод для розв'язання задачі вибору світлових шляхів і призначення довжин хвиль, який базується на зведенні до задачі лінійного програмування. Модифікація існуючого методу полягає у введенні додаткових обмежень на припустиму потужність вхідного сигналу та врахуванні необхідної відстані між довжинами хвиль, які використовуються в одному оптичному волокні, що дозволило врахувати вплив чотирьоххвильового змішування. Оптимізаційна задача в роботі розв’язувалась за критерієм максимуму числа установлених з’єднань в оптичної мережі:

$$Z_\lambda = \sum_{k\in K}\sum_{\lambda\in\Lambda} x_{kl}^{\lambda} \rightarrow \max, \qquad (1)$$

$$x_{kl}^{\lambda} = \begin{cases} 1, \text{коли при k з'єднанні використовується } \lambda \text{ довжина хвилі в l волокні;} \\ 0, \text{інакше.} \end{cases}$$

при $x_\lambda = 1, \lambda \in \Lambda$.

Обмеження на припустиме значення потужності оптичного сигналу, при якому з’являється явище чотирьоххвильового змішування, описується наступним виразом:

$$P_p = P_{вх} \cdot G / E_q, \qquad (2)$$

де $P_p$ – потужність накачки, $P_{вх}$ – вхідна потужність сигналу, $G$ – коефіцієнт посилення підсилювача, $E_q$ – квантова ефективність випромінювача.

На підставі даного виразу значення допустимої потужності має вигляд:

$$P_d = P_p \cdot E_q / G. \qquad (3)$$

Таким чином, обмеження на сумарну потужність вхідного сигналу можна представити як:

$$\sum_{k\in K}\sum_{\lambda\in\Lambda} P_0 \cdot \alpha_p \cdot L_e \cdot \alpha_e \cdot x_{ke}^{\lambda} \le P_d, \qquad (4)$$

де k – з’єднання між парою джерело-отримувач, λ – довжина хвилі, e – канал зв’язку, $P_0$ – вхідна потужність сигналу, $L_e$ – довжина волокна, $\alpha_e$ – затухання в волокні, $\alpha_p$ – затухання, яке вноситься оптичними роз'ємами.

Для обмеження на використання частотного плану з відстанню між частотами довжин хвиль у 100 ГГц використовується наступна формула:

$$M \cdot y_e \geq \sum_{k \in K} \sum_{\lambda \in \Lambda} x_{ke}^{\lambda}, e \in E, \quad (5)$$

де $M$ – кількість каналів у частотному плані.

Розв’язання цієї оптимізаційної задачі дозволило здійснити розподіл потоків у мережі з великою кількістю задіяних довжин хвиль. Ця задача в дисертації сформульована та розв’язана як задача цілочисельного програмування з використанням спеціалізованого пакета CPLEX v.12.

За результатами дослідження даного методу виявлено недолік: різке збільшення кількості обмежень при збільшенні кількості вузлів і потоків в мережі, що призводить до «комбінаторних вибухів». Тому розв’язання задачі вибору світлових шляхів і призначення довжин хвиль в мережі з великою кількістю вузлів і доступних довжин хвиль пропонується здійснювати за допомогою субоптимального евристичного методу на основі алгоритму (Bee Colony Optimization Routing and Wavelength Assignment, BCO-RWA).

В роботі наведена загальна предметна постановка задачі вибору світлових шляхів і призначення довжин хвиль в оптичній мережі на основі технології WDM та з використанням оптичних конверторів.

При розв’язанні цієї задачі була проведена модифікація базового методу BCO-RWA, яка направлена на усунення його недоліків у розв’язанні задачі вибору розташування оптичного конвектора в мережі; на етапі розрахунку ймовірності вибору маршруту з врахуванням знаходження конверторів у вузлах, через які проходить маршрут; врахування впливу явища чотирьохвильового змішування при установці світлових шляхів. У модифікованому методі місця розташування оптичних конверторів розраховують за допомогою спеціального алгоритму. Врахування впливу явища чотирьохвильового змішування виконують шляхом розрахунку Q-фактора при виборі світлового шляху і призначення довжин хвиль, після чого перевіряють умови допустимого значення Q-фактора на всьому світловому шляху. Якщо значення Q-фактора перевищує допустиме значення, то знижується ймовірність використання даного світлового шляху для передачі інформації між абонентами. Вираз для врахування впливу чотирьохвильового змішування представлено наступним чином:

$$Q \approx \frac{b \cdot P_{вх}}{\sqrt{P_{ease\Sigma} + P_{eЧЧВ\Sigma}}}. \quad (6)$$

Вираз (6) використано при розрахунку ймовірності вибору маршруту в алгоритму BCO-RWA. Взаємозв'язок Q-фактора з імовірністю бітової помилки представлено виразом

$$P_{ош} \approx \frac{e^{-\frac{Q}{2}}}{\sqrt{2\pi Q}} \quad (7)$$

при умові,що $\frac{Q}{\sqrt{2}} > 3$.

Відбувається порівняння розрахованого значення Q-фактора на кожному з оптичних каналів, через які проходить даний світловий шлях. Якщо значення Q-

фактора перевищує допустиму норму, то ймовірність вибору цього маршруту зменшується. На цьому етапі обчислення ймовірності вибору маршруту алгоритмом відбувалось за допомогою розрахункового виразу, який є модифікацією базового та направлений на врахування умови, що на вузлі, через який проходить маршрут, може перебувати оптичний конвертор. Таким чином, ймовірність вибору світлового маршруту в розробленому методі має вигляд:

$$V_r^{s,d} = \{\frac{1}{h_r - h_{r\min} + 1} + (1-a)\frac{W_r^*}{W_{\max}}\}, \qquad (8)$$

де $a$ – ваговий коєффіцієнт; $r$ – порядковий номер маршруту між парою вузлів (s,d), $r = 1,2...k, r \in \{R^{s,d}\}$; $h_r$ – довжина маршруту; $h_{\min}$ – довжина найкоротшого маршруту; $W_r^*$ – перерахований коефіцієнт числа довжин хвиль, доступних на маршруті $r$, з урахуванням, що на вузлах маршруту можуть знаходиться оптичний конвертор, $r = 1,2...k, r \in \{R^{s,d}\}$; $W_{\max}$ – максимальна кількість довжин хвиль, доступних на всіх маршрутах.

Нижче наведено алгоритм, який враховує умову знаходження в мережі оптичного конвертора при виборі маршрутів алгоритмом BCO-RWA:

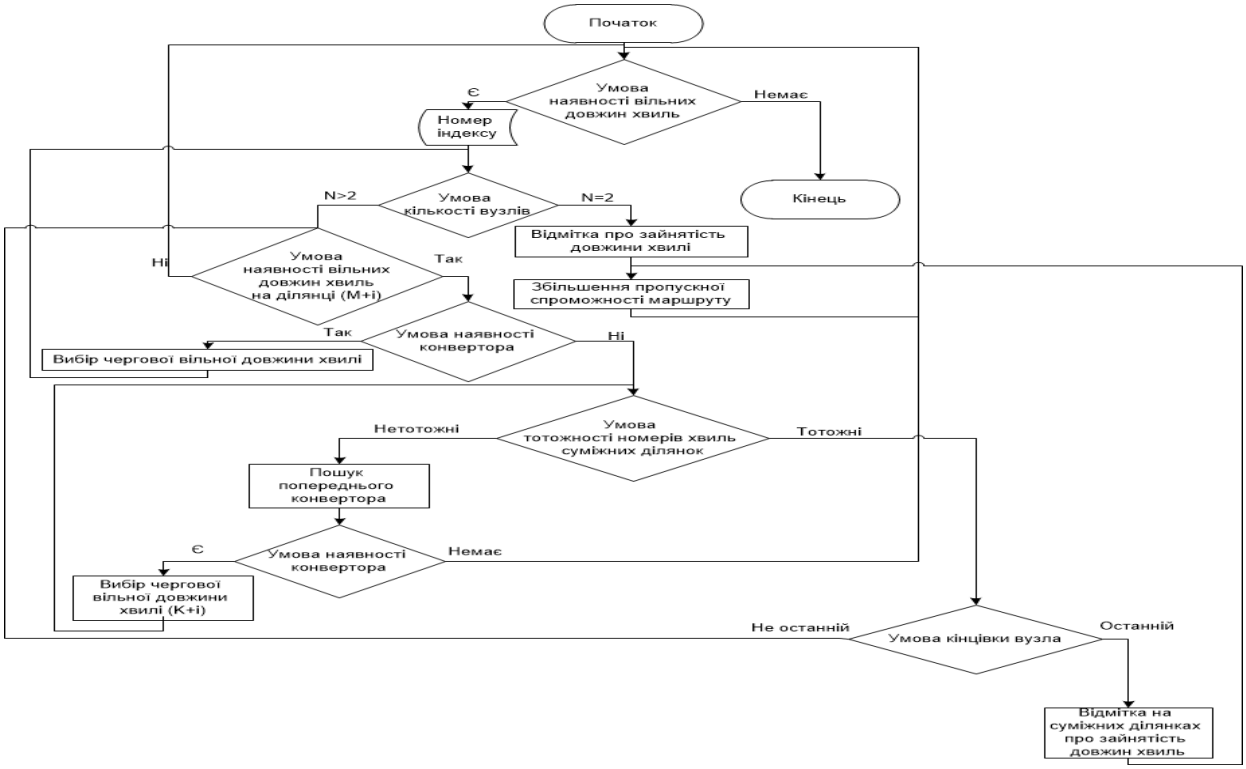



Рис. 1. Блок-схема алгоритму вибору маршрутів в алгоритмі BCO-RWA

Отже, використання розробленого методу дозволяє вирішити задачу вибору світлових шляхів і призначення довжин хвиль з урахуванням впливу явища чотирьохвильового змішування, можливістю використання декількох оптичних конверторів в мережі та дозволяє здійснювати синтез мережі великою розмірністю.

**Третій розділ** присвячено розробці евристичного методу для розв’язання задачі динамічного вибору світлових шляхів і призначення довжин хвиль, який включає

умову врахування впливу чотирьохвильового змішування при виборі світлового шляху між абонентами.

Розв’язання задачі динамічного вибору світлових шляхів і призначення довжин хвиль виникає при управлінні потоками в телекомунікаційній мережі. Наприклад, у мережах мобільного зв'язку виникає явище сплесків трафіку на невеликому проміжку часу. Це пов'язано із збільшенням кількості запрошуваних ресурсів мобільними абонентами в деяких стільниках. У зв'язку з цим виникає необхідність у використанні нових або перерозподілі вже виділених частотних ресурсів. При вирішенні даної задачі проводитися розподіл вільних наявних ресурсів мережі WDM на нетривалий проміжок часу, що вимагає розв’язання задачі динамічного вибору маршрутів і призначення довжин хвиль.

Наведена математична постановка задачі динамічного вибору маршруту та призначення довжин хвиль в оптичній мережі на основі технології WDM.

Наведено аналіз існуючих методів розв’язання задачі динамічного вибору світлових шляхів і призначення довжин хвиль у мережах WDM, за результатами якого встановлено, що метод динамічної маршрутизації довжин хвиль (Dynamic Wavelength Routing, DWR) характеризується досить високою продуктивністю і високим ступенем близькості одержуваного рішення до оптимального в порівнянні з іншими методами цього класу адаптивної маршрутизації.

Вирішена задача динамічного вибору маршрутів і призначення довжин вибраним маршрутам за допомогою модифікованого методу (Dynamic Wavelength Routing, DWR).

Вираз, який використовується при розрахунку цільової функції на етапі вибору світлового шляху алгоритмом LCLNR, має вигляд:

$$O(\pi_{sd}) = \frac{w \cdot FMP(R)}{h},$$

де $FMP(R)$ – коефіцієнт, який зменшує значення $O(\pi_{sd})$, якщо ймовірність бітової помилки для маршруту $R$ перевищила допустиме значення.

На етапі розрахунку цільової функції вибору світлового шляху між відправником і одержувачем відбувається порівняння розрахованого значення Q-фактора на кожному оптичних каналів, через які проходить розглядуваний маршрут з допустимим значенням Q-фактора. Якщо значення Q-фактора перевищує допустиму норму, то значення цільової функції зменшується.

Великі часові витратах базового методу DTWR пов’язані з великими часовими витрати на етапі перевірки умов: відсутність вільних довжин хвиль в оптичних каналах зв'язку від вузлів джерел та сусідніх вузлів, вузлів кінцевих і сусідніх вузлів.

Как показав аналіз алгоритму базового методу, який використовується для пошуку нових маршрутів, використання даної метрики більш ефективне, тому в роботі пропонується використання алгоритму Дейкстри з використанням метрики пропускної спроможності. При пошуку маршруту використовується наступна метрика:

$$Ln(P(K_{sd}^{i})) = Ln(1 - \frac{w_{sn}}{W}) + ... + Ln_{m}(1 - \frac{w_{kd}}{W}), \quad (10$$

де $\ln(P(K_{sd}^{i}))$ – ймовірність неблокування маршруту; $w_{sn}$ – кількість зайнятих довжин хвиль в оптичному каналі між вузлами s и n.

Дана метрика характеризує пропускну здатність маршруту (ймовірність наяності вільних довжин хвиль вздовж маршруту). Так як даний метод починає працювати, якщо алгоритм LCLNR не може встановити з'єднання між заданою парою відправник – одержувач, то пропонується використовувати метрику пропускної здатності замість метрики найкоротших маршрутів, тому що підвищується ймовірність знаходження маршруту з доступною пропускною здатністю.

**Четвертий розділ** присвячено задачі синтезу мережі радіодоступу на основі технології «радіо по волокну».

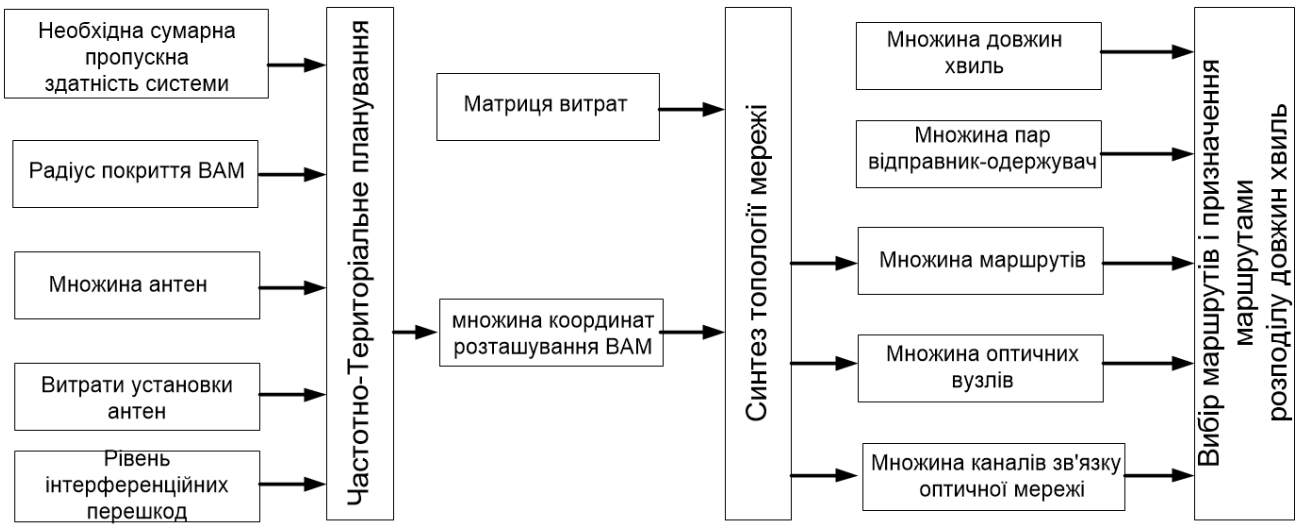
Одним з перспективних напрямків розвитку сучасних мереж доступу є спільне використання безпроводових і оптичних технологій. Використання оптичних мереж в якості транспортного середовища в мережах доступу дозволяє забезпечити передачу радіосигналів між контролером базової станції (Base Station Controller, BSC) і віддаленими антенними модулями (Remote Antenna Unit, RAU) з низьким загасанням безпосередньо на високій частоті. Дана технологія відома в міжнародних джерелах як радіо по волокну (Radio over Fiber, RoF). Безпроводові мережі, побудовані за технологією RoF, володіють перевагою, яка пов'язана з високою гнучкістю і низькою вартістю реконфігурування мережі (перехід або додавання іншої технології), так як в цьому випадку зміни вносяться тільки в BSC (єдиний, центральний елемент) і не зачіпають RAU на відміну від інших мереж, де необхідно вносити зміни в конфігурацію кожної базової станції.

На ділянці оптичної мережі можна використовувати мережі на основі технології WDM, які надають велику пропускну спроможність і можуть бути задіяні як частина магістральної ділянки транспортної мережі.

Розв’язання основних задач, які виникають при синтезі мережі радіодоступу на основі технології «радіо по волокну» та охоплюють безпровідну та оптичну розподільну мережу є досить складним, тому пропонується використання декомпозиції їх на декілька часткових задач, які розв’язуються послідовно з використанням результатів однієї з них, як вхідних даних іншим. А саме:

1. Розв’язання задачі частотно-територіального планування мережі радіодоступу. При цьому дані про місце знаходження віддалених антенних модулів є вихідними даними для вирішення задачі синтезу топології мережі.
2. Розв’язання задачі синтезу топології. Знайдена топологія використовується у якості вихідних даних для задачі вибору світлових шляхів і призначення довжин хвиль в оптичній мережі (RWA).
3. Розв’язання задачі вибору світлових шляхів і призначення довжин хвиль в оптичній мережі.

Схема алгоритму із зазначенням вхідних даних і результатами отриманих рішень підзадач показана на рис. 2




ВАМ - Віддалений антенний модуль

Рис. 2. Блок-схема методу синтезу мережі «радіо по волокну»

В роботі наведено загальну предметну постановку задачі синтезу безпровідної мережі.

Наведена предметна постановка задачі структурного і параметричного синтезу топології оптичної мережі на основі технології WDM.

Для вирішення окремих підзадач використовувалися раніше відомі методи. А також для вирішення задачі вибору світлових шляхів і призначення довжин хвиль використовувалися методи, які запропоновані в роботі.

**П'ятий розділ присвячений дослідженню** ефективності запропонованих у дисертаційній роботі методів вирішення задачі RWA для оптичних транспортних мереж на основі технології WDM та розробці рекомендацій щодо практичного застосування.

Наведено опис структури пакета програм, який застосовується у роботі для проведення дослідження запропонованих методів та алгоритмів. Основними структурними елементами пакета є: база даних проектів, що є інформаційним наповненням пакета, бібліотека алгоритмів, яка складається з інструментальних засобів розв'язання складових задач проектування та синтезу структури системи у цілому; менеджер взаємодії.

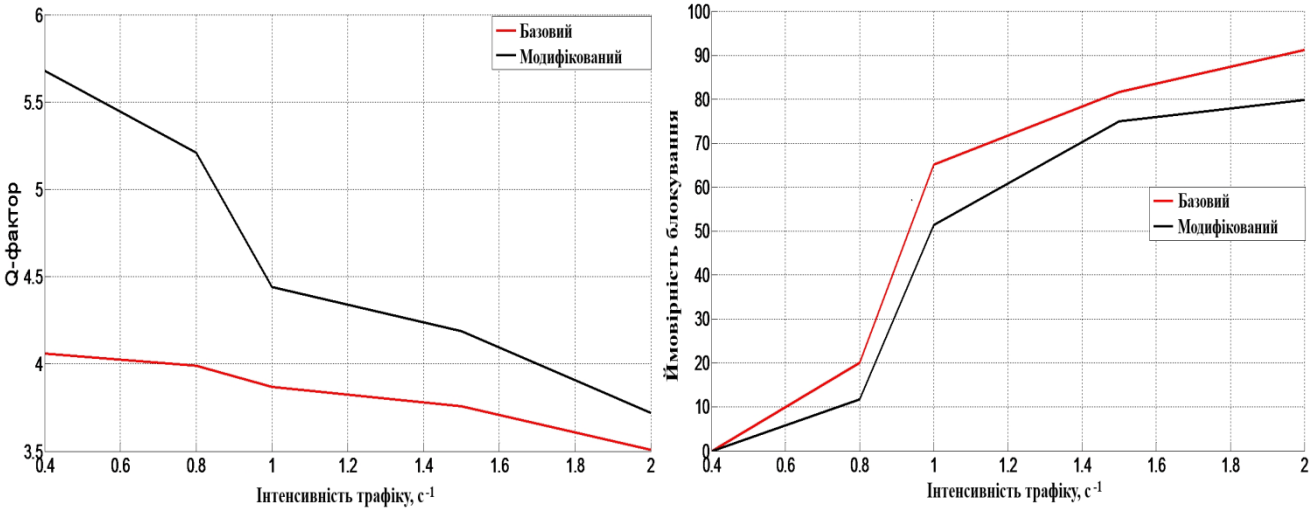
Методика дослідження ефективності запропонованих у роботі методів базувалася на розв'язанні задач вибору маршрутів та призначенні довжин хвиль з використанням методів, які розроблені в роботі, та раніш відомими при однакових вихідних даних. Для цього було синтезовано вихідні дані методом, який базується на виборі їх значень випадковим чином для різного розміру мережі (різної кількості вузлів).

В дисертаційній роботі було проведено дослідження запропонованого евристичного методу розв'язання задачі вибору світлових шляхів і призначення довжин хвиль з врахуванням впливу явища чотирьохвильового змішування на базі алгоритму BCO-RWA у мережі WDM шляхом його порівняльного аналізу з раніш відомим методом. Для проведення експерименту використовувався програмний пакет, написаний на мові java. Експеримент проводився при різних розмірностях mesh-топологій оптичної

мережі на основі технології DWDM. Результати розв’язання фіксувалися у файлі для подальшого порівняльного аналізу. При проведенні експерименту з порівняльного аналізу пропонованого в роботі методу і раніше відомого, обидва методи запускалися при однакових наборах вихідних даних.

Розмірність синтезованої мережі – 7,8,9,10,11 вузлів. У ході аналізу отриманих результатів метод «широкий» ефективніший на невеликих розмірностях (6, 7) мереж, метод «вузький» краще на великих розмірностях топології мереж, середній виграш становить 5% при одному оптичному конвекторі, при двох конвекторах 7%, при трьох конвекторах 9 %.

В роботі досліджено евристичний метод розв’язання задачі динамічного вибору світлових шляхів і призначення довжин хвиль у мережі WDM з використанням засобів імітаційного моделювання. На вхід імітаційної моделі надходив найпростіший потік заявок на установку з'єднання по світловому шляху. Надалі проводився вибір маршруту і призначення йому довжини хвилі. У разі успішного встановлення з'єднання в моделі відповідні ресурси позначалися як зайняті. У імітаційної моделі, також моделювалася тривалість з'єднання, по закінченню якої зайняті з'єднанням мережеві ресурси звільнялися. При проведенні експерименту використовувалася топологія оптичної мережі з 20 вузлами, ранг кожного вузла в мережі не менше 3. Експеримент проводився при різних інтенсивностях надходження запитів на встановлення з'єднання; інтервали надходження запитів і час утримання ресурсів були випадковими величинами, розподіленими за експоненціальним законом. Величина завантаженості мережі змінювалася в межах (0,2-0,9).




а) б)

Рис. 3. Залежність значень Q-фактора від інтенсивності трафіка для базового і модифікованого методів алгоритмів (а) та залежність ймовірності блокування від інтенсивності трафіка для базового і модифікованого алгоритмів (б)

У ході аналізу отриманих результатів було виявлено, що модифікований метод адаптивної маршрутизації має найбільшу ефективність при інтенсивності в 1,5 одиниці. При цьому виграш становить 19%, тоді як середнє значення виграшу становить 13%. Найбільше значення Q-фактора спостерігалося при найнижчій інтенсивності трафіка

(0,4), так як в цьому випадку задіяне найменше число довжин хвиль в оптичних каналах. Середній виграш Q-фактора склав 0,812.

**Висновки**

У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-прикладна задача, яка полягає в удосконаленні існуючих методів вибору світлових шляхів і призначення довжин хвиль за рахунок врахування при вирішенні завдань явища чотирьохвильового змішування та вибору місць встановлення оптичних конверторів, що збільшило ефективність використання мереж WDM за параметрами імовірності бітової помилки та кількістю встановлених з’єднань. При цьому отримано такі наукові та прикладні результати.

1. Наведено особливості побудови архітектури мереж NGN. У ролі транспортної мережі для даної архітектури найчастіше є оптичні мережі на основі технології WDM. При проектуванні оптичних мереж WDM основним завданням, яке необхідно вирішити, є RWA. Проведено аналіз методів розв’язання задачі RWA, який виявив недоліки раніше відомих методів при синтезі мереж WDM. Розглянуті особливості архітектури мереж радіодоступу на основі технології «радіо по волокну».

2. Удосконалено метод розв'язання задачі вибору та призначення довжин хвиль маршрутам, який базується на зведенні розв'язуваної задачі до задачі лінійного програмування з урахуванням впливу ЧВС за рахунок введення додаткових обмежень на потужність сигналу. У ході аналізу результатів отриманих шляхом проведення експерименту, запропонований метод показав підвищення якості передачі (за параметром Q фактора) на 2,5 одиниці.

3. Удосконалено евристичний метод розв'язання задачі вибору та призначення довжин хвиль маршрутам з використанням оптичних конверторів на основі алгоритму BCO-RWA з урахуванням впливу ЧВС. Для цього необхідно модифікувати розрахунковий вираз ймовірності вибору світлового шляху з урахуванням, що на вузлах маршруту може перебувати оптичний конвертор для вирішення завдання вибору місця установки оптичного конвертора та впливу ЧВС Це дозволило збільшити число встановлених з'єднань на 9% при 3 конверторах в мережі і підвищити якості передачі даних в мережі WDM на 1,8 (параметр Q фактора).

4. Удосконалено евристичний метод розв'язання задачі динамічної вибору та призначення довжин хвиль маршрутам з урахуванням впливу ЧВС. Модифікація методу полягає в врахуванні ЧВС на етапі вибору маршруту при установці з'єднання; використання метрики пропускної спроможності на етапі динамічного пошуку маршруту. Проведено експеримент з використанням засобів імітаційного моделювання на штучно синтезованій топології мережі. При моделюванні вирішувалося завдання RWA при різних інтенсивностях надходжень викликів на установку з'єднання. У ході аналізу отриманих результатів було виявлено, що модифікований метод адаптивної маршрутизації має найбільшу ефективність при інтенсивності в 1,5 одиниці при цьому виграш становить 19%, тоді як середнє значення виграшу становить 13%. Найбільше значення Q-фактора спостерігалося при найнижчій інтенсивності трафіка (0,4), так як в цьому випадку задіяне найменше число довжин хвиль в оптичних каналах. Середній виграш Q-фактора склав 0,812.

5. Наведено постановку і вирішена задача синтезу мережі радіодоступу на основі технології «радіо по волокну». При вирішенні завдання був розроблений метод, який заснований на принципі декомпозиції. Розв'язувана задача синтезу мережі радіодоступу на основі технології «радіо по волокну» розбивається на три підзадачі: частото-територіальне планування, синтез оптимальної топології мережі, розв’язання задачі RWA. Запропонований метод передбачає наступну послідовність розв’язання підзадач: розв’язання задачі частотного територіального планування, після чого знайдене рішення є вихідними даними для розв’язання задачі синтезу топології мережі. Знайдене рішення є вихідними даними для задачі вибору світлових шляхів і призначення довжин хвиль у оптичної мережі (RWA). Застосування розробленого методу дозволило будувати мережі радіодоступу з високим рівнем масштабованості.

6. Розроблені та модернізовані методики та програмна реалізація рекомендуються для використання на етапах проектування телекомунікаційних систем. Отримані результати впроваджені:

– у навчальний процес кафедри телекомунікаційних систем у дисциплінах з проектування телекомунікаційних систем;

– у науково-дослідних роботах, які виконувалася на кафедрі телекомунікаційних систем,

що підтверджується відповідними актами впровадження.

## Список опублікованих праць за темою дисертації


1. Агеев Д.В. Определение объема сетевого ресурса, необходимого при предоставлении услуг телефонии и передачи данных / Д.В. Агеев, А.А. Переверзев, Хайдара Абдалла // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. - 2009. - № 159. - С. 30 - 34.
2. Агеев Д.В. Распределение потоков в транспортной сети мультисервисной телекоммуникационной системы с использованием математической модели многослойного графа / Д.В. Агеев, А.А. Переверзев// Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. - 2010. - № 163. - С. 85 - 91.
3. Агеев Д.В. Планирование распределения длин волн при проектировании транспортной сети DWDM / Д.В. Агеев, В.К. Ковальчук, А.А. Переверзев // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. - 2011. - № 5/3(53). - С. 25 – 29.
4. Агеев Д.В. Метод распределения длин волн в сетях DWDM с использованием эвристического алгоритма BCO-RWA / Д.В. Агеев, А.А. Переверзев// Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. - 2012. - № 170. - С. 118 – 126.
5. Переверзев А.А. Метод структурно-параметрического синтеза беспроводной сети доступа с использованием технологии Radio over Fiber / А.А. Переверзев, Д.В. Агеев // Проблеми телекомунікацій. - 2013. - № 1(10). - С. 16 - 30.
6. Pereverzev Alexander Radio over Fiber networks synthesis using meta-heuristic BCO / Alexander Pereverzev, Dmitry Ageyev // Communications. - 2013. - № 1. - P. 9 - 15.

7. Агеев Д.В. Метод решения задачи динамического выбора маршрутов и назначения длин волн в сетях WDM с учетом явления четырехволнового смешивания / Д.В. Агеев, А.А. Переверзев // Научно–технический вестник информационных технологий, механики и оптики. - 2013. - № 3(85). - С. 29 - 35.

8. Переверзев А.А. Распределения длин волн при проектировании транспортной сети на основе технологии DWDM / А.А. Переверзев, Д.В. Агеев // 15-й міжнар. молодіжний форум «Радіоелектроніка і молодь в XX1 ст.» Зб. матеріалів. - Харків: ХНУРЕ, 2011. - С. 124-125.

9. Агеев Д.В. Решение телекоммуникационных задач с помощью CPLEX / Д.В. Агеев, А.А. Переверзев // V Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій»: Зб. тез. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2010. - С. 79-80.

10. Агеев Д.В. Решение задачи распределения сетевых потоков в сети DWDM с использованием математической модели многослойного / Д.В. Агеев, А.А. Переверзев // IV Міжнародний науково-технічний симпозіум «Нові технології в телекомунікаціях»: Зб. тез. – ДУІКТ-КАРПАТИ, 2011. - С. 56 - 57.

11. Агеев Д.В. Выбор длин волн световым маршрутам при проектировании сетей DWDM / Д.В. Агеев, А.А. Переверзев // Інфокомунікації – сучасність та майбутнє: матеріали першої міжнар. наук.-пр. конф. молодих вчених м. Одеса 6-7 жовт. 2011 р. – Ч.1. Одеса:ОНАЗ, 2011. - С. 59 - 62.

12. Агеев Д.В. Управление назначением длин волн световым маршрутам в сетях DWDM / Д.В. Агеев, А.А. Переверзев // 4-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» МРФ-2011: Сб. науч. трудов. - Харьков: ХНУРЭ. – 2011.– Т.2. - С. 139 - 142.

13. Переверзев А.А. Применение алгоритма BCO-RWA для решения задачи распределения длин волн при проектировании транспортной сети DWDM // 16-й международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке»: Сб. материалов форума. - Харьков: ХНУРЭ, 2012. - Т.4. – С. 94 - 95.

14. Dmitry Ageyev Wavelength Assignment in Design DWDM Transport Network Using Algorithm BCO-RWA / Dmitry Ageyev, Alexander Pereverzev // Proceedings of the XIth International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science, TCSET’2012. - Lviv-Slavske, Ukraine: Lviv Polytechnic National University, 2012. - P. 336 - 337.

15. Агеев Д.В. Решение задачи распределения длин волн в сети dwdm с помощью мэта-эврестического алгоритма BCO–RWA/ Д.В. Агеев, А.А. Переверзев // «Проблемы телекоммуникаций 2012»: Сб. материалов форума. - Киев: 2012.– Т.1. - С. 110 - 111.

16. Агеев Д.В. Решение задачи распределения длин волн в сети dwdm с помощью мэта-эврестического алгоритма BCO–RWA/ Д.В. Агеев, А.А. Переверзев //

Шоста міжнародна наукова-технічна конференція та Четверта студентська наукова-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій»: Сб. материалов форума. - Киев: 2012. – Т.1. - С. 92 - 93.

17. Переверзев А.А. применение алгоритма BCO–RWA при проектировании сети DWDM // Восьма наукова конференція харківського університету повітряних сил ім. Івана Кожедуба «Нові технології – для захисту повітряного простору»: Сб. тези доповідей. - Харьков: ХУПС, 2012. – Т.1. - С. 196.

18. Переверзев А.А. Метод динамического выбора маршрутов и назначения распределения длин волн на основе WLCR- алгоритма // 17-й міжнар. молодіжний форум «Радіоелектроніка і молодь в XX1 ст.» Зб. матеріалів. - Харків: ХНУРЕ, 2013. - С. 125-126.

19. Pereverzev A., Ageyev D. Design method access network radio over fiber // XIIth International Conference The experience of designing and application of cad systems in microelectronics, Polyana-Svalyava-(Zakarpattya), Ukraine 19-23 February 2013: Publishing House of Lviv Polytechnic, 2013. – P. 288 - 292.

20. Пат. 77046 Україна, МПК (2006.01) H04B 10/13. Спосіб розподілу довжин хвиль в оптичних мережах з мультиплексуванням з розподілом за довжиною хвилі / Переверзев О.А., Агеєв Д.В.; власник Харківський національний університет радіоелектроніки. – № u201208735; заявл. 16.07.2012; опубл. 25.01.2013, бюл. №2.

Анотація

Переверзев О.А. Методи вибору світлових шляхів і призначення довжин хвиль у мережах WDM з урахуванням явища чотирьохвильового змішування. – Рукопис. Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі. Харківський національний університет радіоелектроніки. Харків, 2013.

Дисертація присвячена вдосконаленню існуючих методів вибору світлових шляхів і призначення довжин хвиль за рахунок врахування при вирішенні завдань явища чотирьохвильового змішування та вибору місць встановлення оптичних конверторів. У роботі розроблено метод розв’язання задачі вибору світлових шляхів і призначення довжин хвиль з урахуванням впливу явища чотирьохвильового змішування, при цьому задача відноситься до лінійного типу; метод розв’язання задачі вибору світлових шляхів і призначення довжин хвиль з урахуванням впливу явища чотирьохвильового змішування при умові, що у мережі знаходиться оптичний конвертор; метод розв’язання задачі динамічного вибору світлових шляхів і призначення довжин хвиль з урахуванням впливу явища чотирьохвильового змішування; запропоновано метод синтезу мережі радіодоступу на основі технології «радіо по волокну», який розбиває розв’язання задач, які виникають при проектування цих мереж, на три підзадачі. Отримані дані при розв’язанні кожної з підзадач є вхідними даними при розв’язанні наступної підзадачі. Досліджено ефективність

розроблених методів шляхом проведення експериментів і імітаційного моделювання, розроблено практичні рекомендації по їх застосуванню. Порівняльний аналіз запропонованих методів з раніш відомими показав, що розроблені в роботі методи дозволяють підвищити пропускну здатність та якість передачі інформації в оптичної мережі WDM.

**Ключові слова:** оптична мережа, телекомунікації, світловий шлях, оптичний конвертор, мережа радіодоступу, WDM.

## Аннотация

Переверзев А.А. Методы выбора световых путей и назначения длин волн в сетях WDM с учетом явления четырехволного смешивания. – Рукопись. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.02 – Телекоммуникационные системы и сети. Харьковский национальный университет радиоэлектроники. Харьков, 2013.

В последнее время наблюдается растущая потребность увеличения пропускной способности современных транспортных сетей, которая реализуется путем использования технологии спектрального уплотнения каналов WDM. Передача информации в WDM сетях проводится вдоль световых путей, в которых длина волны остается неизменной. Это существенно отличает эти сети от сетей с коммутацией пакетов или каналов и поэтому возникает необходимость в использовании других методов нахождения маршрутов.

Однако, как показал анализ методов решения задачи выбора световых путей и назначения длин волн, эти методы не учитывают влияния нелинейного явления четырехволнового смешивания, что приводит к увеличению вероятности битовой ошибки в сети. Именно повышению качества передачи информации в сети WDM за счет разработки и совершенствования методов решения задачи выбора световых путей и назначения длин волн с учетом влияния нелинейного явления четырехволнового смешивания посвящена данная работа.

В диссертационной работе проведен анализ методов синтеза оптических транспортных сетей на основе технологии WDM и рассмотрены особенности архитектуры сетей радиодоступа на основе технологии «радио по волокну». В роботе приведены постановки и разработаны методы решения задач, которые возникают при синтезе сетей радиодоступа на основе технологии «радио по волокну».

Разработан метод выбора световых путей и назначения длин волн с учетом влияния четырехволного смешивания. Метод базируется на сведении решаемой задачи к линейному типу и нахождении единственного решения оптимизационной задачи с помощью специализированных математических пакетов. Учет влияния

четырехволнового смешивания производится путем введения дополнительного ограничения на мощность оптического сигнала в математическую модель решаемой задачи. В ходе анализа экспериментальных данных было выявлено, что применение предложенного метода повышает качество передачи информации в оптических сетях на основе технологии WDM.

В работе также было проведено исследование влияния внутренних параметров методики эластичной сети на результаты синтеза. Проведен анализ результатов данного исследования и выработаны практические рекомендации по применению.

Поставлена и решена задача выбора световых путей и назначения длин волн в оптической транспортной сети с оптическими конверторами. При решении данной задачи использовался эвристический метод на основе алгоритма BCO-RWA путем введения алгоритма выбора места расположения оптического конвектора; модифицирования формулы расчета вероятности выбора светового пути с учетом того, что на узлах маршрута может находиться оптический конвертор; добавлены математические формулы для учета влияния четырехволнового смешивания при расчете вероятности выбора светового пути, что позволяет повысить пропускную способность сети в целом и повысить качество передачи информации по оптической сети на основе технологии WDM.

В работе разработан метод параметрического синтеза сетей радиодоступа на основе технологии «радио по волокну». Главной особенностью данного метода является его комплексная направленность, которая позволяет совместно решать задачи частотно-территориального планирования, синтеза оптимальной топологии распределительной сети и задачи выбора световых путей и назначения длин волн. Это позволило синтезировать сети радиодоступа с высоким уровнем масштабируемости и низкой стоимостью переконфигурации.

Модифицирован метод решения задачи динамического выбора световых путей и назначения длин волн путем учета влияния нелинейного явления четырехволнового смешивания и использования метрики пропускной способности при поиске нового маршрута. Это позволило уменьшить вероятность блокировки и повысить качество передачи информации в сети WDM.

Ключевые слова: оптическая сеть, телекоммуникации, световой путь, оптический конвертор, пропускная способность, метод оптимизации, сеть радиодоступа.

## Abstract

Pereverzev A.A. The methods of choosing the light paths and wavelength assignment in WDM networks with the considering phenomenon of four-wave mixing – Manuscript. Dissertation for the candidate’s degree of technical science in a specialty 05.12.02 –

Telecommunication systems and networks. – Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv. 2013.

Dissertational work is devoted to the improvement of existing methods to choose light paths and wavelength assignment by taking into account in solving the phenomenon four-wave mixing and choice place of installation of optical converters. In this paper, a method is developed for solving the problem of choice light paths and wavelength assignment for the effects of four-wave mixing phenomena, and the problem is k linear type, method of solving the problem of the choice of light paths and wavelength assignment for the effects of four-wave mixing phenomenon, provided that the network is has optical converter, the method of solving the problem of the dynamic choose light paths and wavelength assignment with the considering phenomenon of four-wave mixing, the method of synthesis radio network-based technologies "radio on fiber", which breaks solving problems that arise in the design of these networks under three tasks. The data for you, the decision of each of the subtasks are inputs in deciding when the next task. The efficiency of the developed methods by conducting experiments and simulation, practical recommendations for their use. Comparative analysis of the proposed methods previously known in saying that the methods developed in the paper can improve the capacity and quality of information transfer in optical networks WDM.

Key words: optical network, telecommunication, light path, optical convector, optical network, radio network.

Підп. до друку 12.09.13. Формат 60х84 $^{1}/_{16}$ Спосіб друку – ризографія
Умов. друк. арк. 0,9 Тираж 100 прим.
Зам. № Ціна договірна.

ХНУРЕ, 61166, Харків, просп. Леніна, 14

Віддруковано в навчально-науковому
видавничо-поліграфічному центрі ХНУРЕ.
Харків, просп. Леніна, 14