Особенности решения задачи выбора путей и назначения длин волн в транспортных сетях телекоммуникационных систем со спектральным уплотнением

Features of solving the problem routing and wavelength assignment in wavelength division multiplexing transport networks telecommunication systems

Ясинский / Yasinsky S.
Сергей Александрович
(yasinsky777@mail.ru)
доктор технических наук, доцент.
ЗАО «Институт телекоммуникаций»,
ведущий специалист.
г. Санкт-Петербург

Зюзин / Zyuzin A.
Александр Николаевич
кандидат технических наук.
ФГКВОУ ВО «Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного»
МО РФ, преподаватель кафедры военных систем многоканальной электропроводной и оптической связи.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: телекоммуникационная система – telecommunication system; транспортная сеть связи – transport communication network; спектральное уплотнение каналов – wavelength division multiplexing; выбор путей и назначение длин волн – routing and wavelength assignment; алгоритм Сурбалле – Suurballe method; раскраска графа – graph coloring.

В статье описываются особенности и общие подходы к решению задачи выбора путей и назначения длин волн в транспортных сетях связи со спектральным уплотнением. Обращается внимание на вопрос резервирования спектральных каналов и выбора нескольких независимых маршрутов составления каналов. Предлагается использовать для решения этой подзадачи специализированные методы на основе алгоритма Сурбалле. При решении подзадачи назначения длин волн обращается внимание на возможности методов раскраски графа для поиска оптимального решения.

The article describes the features and general approaches to solving the problem routing and wavelength assignment in wavelength division multiplexing communication transport networks. Attention is paid to the issue of the reservation of spectral channels and the choice of several independent routes for the preparation of channels. It is proposed to use for solving this subtask specialized methods based on the Suurballe method. When solving the subtask of assigning wavelengths, attention is drawn to the possibility of graph coloring methods for finding the optimal solution.

Введение

Активная цифровая трансформация современного общества приводит к увеличению потребности в получении и обработке больших объемов информации. Качественно обеспечить передачу и обработку постоянно увеличивающихся объемов информации может только соответствующая инфотелекоммуникационная инфраструктура, которая в общем виде состоит из телекоммуникационных систем (ТКС) и центров обмена данными. Современные ТКС являются технически сложными и дорогостоящими системами, обладающими большой протяженностью и разветвленностью. Первичные и транспортные сети (ТС) связи, как важные составляющие ТКС, определяют их потенциальные характеристики и реально достижимые показатели функционирования.

Наиболее перспективной технологией ТС считается технология спектрального уплотнения (разделения) каналов (СУК), то есть *Wavelength Division Multiplexing* [1, 2]. Суть технологии СУК состоит в передаче высокоскоростных информационных потоков на различных длинах волн оптического диапазона. При этом потенциальная пропускная способность оптического волокна в волоконно-оптической линии связи определяется соответствующим количеством используемых длин волн. В процессе эксплуатации количество длин волн можно увеличивать, тем самым расширяя возможности ТС [1]. На этапах планирования и эксплуатации ТС с СУК возникает новая задача рационального выбора маршрутов (путей) и назначения длин волн (ВМНДВ). Эта задача в англоязычной литературе получила название *Routing and Wavelength Assignment (RWA)* [3, 4].

Общая постановка задачи выбора маршрутов и назначения длин волн

Задачу ВМНДВ необходимо решать для наиболее эффективной организации волоконно-оптических

трактов между корреспондирующими парами узлов (КПУ) с точки зрения пропуска большего информационного трафика и его защиты в условиях ограниченного числа длин волн.

Помимо общих вопросов ВМНДВ при планировании и эксплуатации ТС необходимо учитывать особенности организации спектральных каналов, которая связана с ограничениями на отношение оптический сигнал/шум (OSNR), для полосы частот каждого оптического канала, с накоплениями линейных искажений оптических сигналов в оптическом волокне и в устройствах оптической коммутации, а также с накоплениями нелинейных помех [5].

Существо оптимизационной задачи ВМНДВ для ТС с СУК заключается в выборе маршрута между КПУ ТС и последующем назначении этому маршруту длины волны таким образом, чтобы обеспечить возможность получения максимального количества соединений между КПУ с учетом системы ограничений, связанных с техническими возможностями систем передачи и коммутации, физической природой оптического сигнала и необходимостью резервирования транспортируемой информации [2].

Исходными данными для задачи ВМНДВ являются: топологическая связность узлов ТС (имеющиеся оптические волокна и кабели между узлами ТС); множество КПУ; количество и тип требуемых составных оптических каналов между КПУ; количество формируемых длин волн на каждой линии связи между узлами сети; количество оптических соединений, обрабатываемых на узлах сети (узлах маршрутизации). Для решения этой задачи требуется простота в реализации алгоритмов и минимальная вычислительная сложность.

Математически задачу ВМНДВ ТС с СУК возможно формулировать при помощи графа $G=\{A,B,C,\Lambda,L\}$, где:

– множество вершин графа $A=\{a_i;\ i=\overline{1,N}\}$ соответствует множеству узлов сети с общим числом N;

– множество ребер графа $B=\{b_{ij}:\ i,j=\overline{1,N};\ i\neq j\}$ описывает линии передачи между этими узлами, на котором определено множество свободных длин волн $\Lambda=\{\Lambda^{\lambda}_{ij};\ i,j=\overline{1,N};\ i\neq j,\ \lambda=\overline{1,M}\}$ с общим количеством длин волн M на каждой линии передачи;

– определены значения длин линий передачи $L=\{l_{ij}:\ i,j=\overline{1,N};\ i\neq j\}$ и функции конвертирования длин волн для каждого узла сети $C=\{C_i(\lambda);\ i=\overline{1,N};\ \lambda=\overline{1,M}\}$ [2].

В этом случае задача ВМНДВ сводится к поиску на графе $G=\{A,B,C,\Lambda,L\}$ максимального множества составных спектральных каналов (ССК) $R^h_k=\{r^{\lambda}_{ij};\ i,j=\overline{1,N};\ i\neq j,\ \lambda=\overline{1,M}\}$, определенного на множестве длин волн $\Lambda=\{\Lambda^{\lambda}_{ij}\}$ с учетом функции конвертирования $C=\{C_i(\lambda)\}$ для каждого h-го маршрута k-го КПУ, то есть

$$\sum_{k=1}^{K}\sum_{h=1}^{H}R^h_k \to \max, \tag{1}$$

где: $R^h_k \subset (\Lambda\cap C)$; K – количество КПУ; H – количество маршрутов для КПУ.

Составной спектральный канал (*lightpath*) – это основной вид канала передачи в ТС с СУК, под которым понимают выделенный набор длин волн на маршруте составления канала между двумя КПУ [2].

Основным ограничением при решении задачи ВМНДВ является фиксированное количество длин волн на каждой линии передачи:

$$\sum_{\lambda=1}^{M}\sum_{k=1}^{K}\sum_{h=1}^{H}\Lambda^{\lambda}_{ij}R^h_k\{r^{\lambda}_{ij}\}\le\left|\Lambda^{\lambda}_{ij}\right|, \tag{2}$$

$$r^{\lambda}_{ij}=\begin{cases}1, & \text{если } R^h_k \text{ маршрут ССК включает длину волны } \Lambda^{\lambda}_{ij};\\ 0, & \text{в противном случае.}\end{cases} \tag{3}$$

Учитывая большие пропускные способности информационных потоков в ТС с СУК, при решении задачи ВМНДВ очень важно обращать внимание на вопросы резервирования.

Сетевое резервирование в ТС с СУК может быть реализовано двумя основными способами: резервирование потоков (резервирование ССК) и резервирование линейных трактов [6]. В случае резервирования потоков рабочий ССК на всем своем протяжении резервируется дополнительным ССК с учетом требования по независимости маршрутов составления каналов:

$$H>2,\ \ R^{h_{осн}}_k \not\subset R^{h_{рез}}_k. \tag{4}$$

При этом возможно резервировать только наиболее важные ССК, а ССК с низким приоритетом могут не резервироваться исходя из экономии ресурсов.

В случае резервирования линейных трактов резервируются кабельно-линейные сооружения между двумя оптическими системами передачи. В этом случае трассы прокладки кабеля также должны быть разнесены.

Для ТС с СУК вполне применимы современные методы сегментного резервирования на основе p-циклов и многоконтурных структур. Суть этих методов заключается в выделении на высоко связной топологической структуре замкнутого контура (контуров) или цикла (циклов) с предварительно рассчитанной резервной пропускной способностью, которая будет использоваться в случае возникновения отказа в сети связи [7].

Наиболее простыми в реализации и оптимальными по времени применения остаются методы резервирования ССК по схеме 1+1, с помощью которых можно наиболее рационально выбрать маршруты составления ССК таким образом, чтобы суммарная протяженность основного и резервного ССК была минимальна, то есть

$$\sum_{\substack{i,j=1\\ i\neq j}}^{N} w^{h_{осн}}_{ij}l_{ij}+\sum_{\substack{i,j=1\\ i\neq j}}^{N} w^{h_{рез}}_{ij}l_{ij}\to \min, \tag{5}$$

3 2019 □□□□□□□.indd 33 19.09.2019 11:06

где:

$$w_{ij}^{k\,осн} = \begin{cases} 1, & \text{если основной СКК проходит через ребро } b_{ij}; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (6)$$

$$w_{ij}^{k\,рез} = \begin{cases} 1, & \text{если резервный СКК проходит через ребро } b_{ij}; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (7)$$

Особенности решения задачи выбора маршрутов

В настоящее время существует несколько подходов к решению задачи ВМНДВ на ТС с СУК. Первый подход основан на комплексном решении, при котором выбор пути и назначение длины волны осуществляется одновременно с учетом реальных возможностей сети по организации спектральных каналов. Для решения задачи этим способом возможно использовать волновые алгоритмы [2]. При этом очевидно, что сложность решения будет напрямую зависеть от размерности ТС с СУК и количества используемого оборудования.

Второй подход основан на разделении задачи на две составляющие: подзадача поиска маршрутов (маршрутизация) и подзадача назначения длин волн. Обе подзадачи могут решаться точными методами или приближенными. Подзадачу поиска маршрутов решают известными методами, где в качестве основного критерия выбирается наименьшая длина маршрута. Очень часто для решения этой задачи используются различные модификации популярных алгоритмов (Флойда-Уоршелла, Форда-Беллмана, Дейкстры и др.) [8].

Однако при поиске двух и более независимых маршрутов составления ССК для одной КПУ очень часто последовательный поиск кратчайших путей неприменим. Это вызвано тем, что в процессе модификации известных алгоритмов поиска кратчайших путей используется операция удалении ребер вошедших в первый кратчайший путь, но при этом иногда теряется связность графа ТС с СУК. Пример этого недостатка рассмотрим на фрагменте топологической структуры, представленной на рис. 1.

Очевидно, что первый кратчайший маршрут между узлами 1 и 6, который может быть найден любым оптимальным способом, будет проходить между узлами 1-3-4-6. В случае удаления ребер, вошедших в первый кратчайший маршрут, найти второй маршрут не получиться, поскольку граф потеряет связность. Фрагмент топологической структуры для поиска двух независимых кратчайших маршрутов после удаления ребер вошедших в первый кратчайший маршрут приведен на рис. 2.

При этом нетрудно заметить, что для фрагмента топологической структуры (рис. 1) возможно найти два независимых маршрута между узлами 1 и 6 (рисунок 3). Маршрут номер 1 будет проходить через узлы 1-2-4-6, а маршрут номер 2 будет проходить через узлы 1-3-5-6.

Следовательно, для поиска двух и более кратчайших маршрутов составления ССК в ТС с СУК целесообразно использовать специализированные алгоритмы, которые будут корректно работать в различных топологиях. Примером такого алгоритма может быть алгоритм Сурбалле (*Suurballe method*) [9]. Суть этого алгоритма состоит в замене каждого ребра графа $G=\{A,B\}$ на две противоположно направленные дуги. Далее производится поиск кратчайшего маршрута по направлению от одного корреспондирующего узла к другому. Дуги, вошедшие в первый кратчайший маршрут, удаляются, весовые коэффициенты этих дуг принимают отрицательные значения. После этого производится поиск второго кратчайшего маршрута от одного корреспондирующего узла к другому с учетом направления оставшихся дуг и их весовых коэффициентов. Далее граф $G=\{A,B\}$ преобразовывается таким образом, чтобы все ребра, которые попали в оба кратчайших маршрута или не попали не в один из маршрутов, были удалены. Оставшиеся ребра образуют оптимальную пару кратчайших маршрутов.

Для наглядности, рассмотрим работу этого алгоритма на примере рис. 1. На первом этапе производится замена каждого ребра на две противоположно направленные дуги, в результате чего получается фрагмент топологической структуры для поиска двух независимых кратчайших маршрутов после преобразования ребер (рис. 4).

На втором этапе определяется кратчайший маршрут от узла 1 к узлу 6 и удаляются дуги, вошедшие в этот путь 1-3-4-6, в результате чего получается фрагмент топологической структуры для поиска двух независимых кратчайших маршрутов после удаления дуг вошедших в первый маршрут (рис. 5).

На следующем этапе производится поиск второго кратчайшего маршрута с учетом оставшихся дуг 1-2-4-3-5-6 (рис. 6).

На последнем этапе производится преобразование исходного графа $G=\{A,B\}$ таким образом, чтобы все ребра, которые попали в оба кратчайших маршрута или не попали не в один из маршрутов, были удалены (рис. 7).

Результатом решения первой подзадачи ВМНДВ на ТС с СУК являются один, два или более оптимальных маршрутов составления ССК для каждого КПУ или вывод о том, что эти маршруты найти нельзя.

Особенности решения подзадачи назначения длин волн

Вторая подзадача ВМНДВ на ТС с СУК заключается в назначении длин волн для каждого ССК на всех участках сети. Для этого возможно исполь-

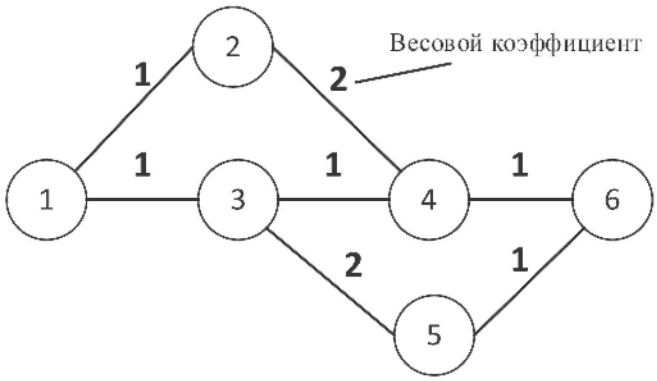

Рис. 1. Фрагмент топологической структуры для поиска двух независимых кратчайших маршрутов

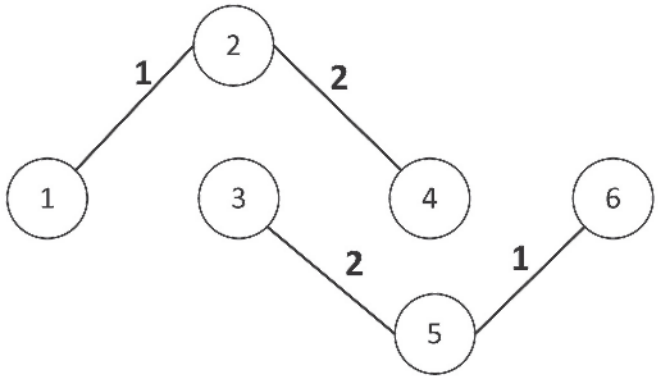

Рис. 2. Фрагмент топологической структуры для поиска двух независимых кратчайших маршрутов после удаления ребер вошедших в первый кратчайший маршрут

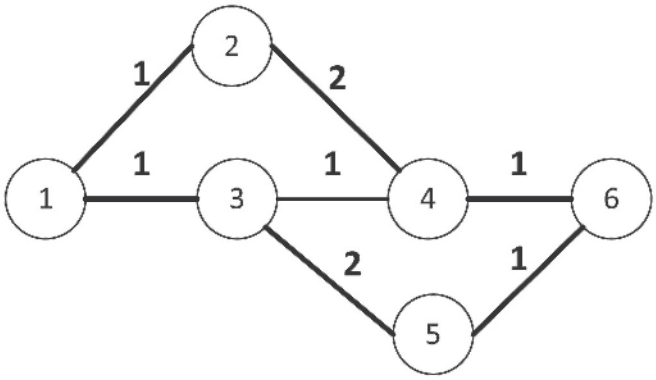

Рис. 3. Фрагмент топологической структуры для поиска двух независимых кратчайших маршрутов с указанием кратчайших путей

3 2019 □□□□□□□.indd 35 19.09.2019 11:06

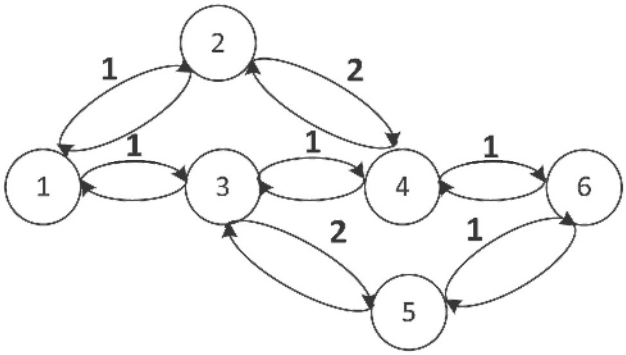

Рис. 4. Фрагмент топологической структуры для поиска двух независимых кратчайших маршрутов после преобразования ребер

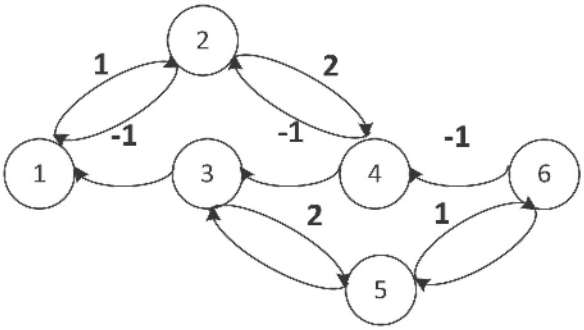

Рис. 5. Фрагмент топологической структуры для поиска двух независимых кратчайших маршрутов после удаления дуг вошедших в первый маршрут

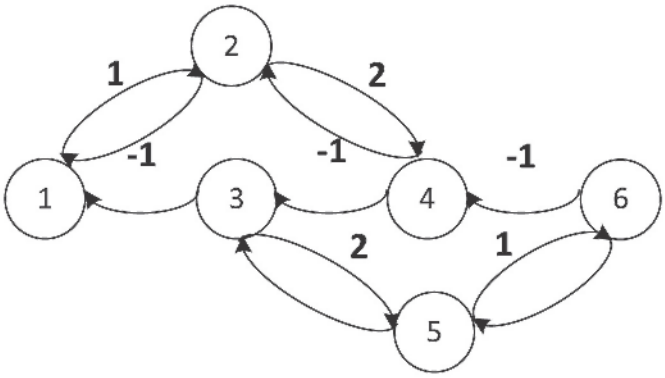

Рис. 6. Фрагмент топологической структуры для поиска двух независимых кратчайших маршрутов после поиска второго маршрута

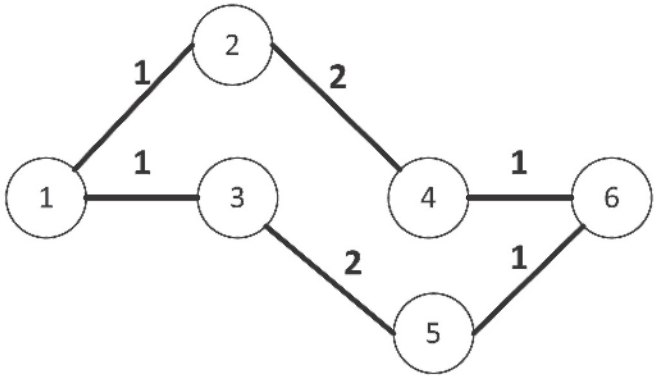

Рис. 7. Фрагмент топологической структуры для поиска двух независимых кратчайших маршрутов после преобразования с указанием двух кратчайших маршрутов

зовать различные алгоритмы: методы случайного выбора (*Random, R*), выбора «первого попавшейся» (*First-Fit, FF*), выбора наиболее загруженного (*Most-used, MU*) маршрута и выбора наименее (*Least Loaded, LL*) загруженного маршрута между корреспондирующими парами узлов (КПУ) и др. Наиболее рациональными с точки зрения комбинаторной оптимизации являются алгоритмы, основанные на решении задачи «раскраски графа» (*Graph coloring*). Это позволяет не только назначить длины волн для каждого ССК, но и определить минимальное количество длин волн для линий связи путем определения хроматического числа для графа маршрутов ССК.

Основная идея этого подхода заключается в выделении зависимых и независимых подграфов для графа маршрутов ССК $G_c = \{A_c, B_c\}$, с дальнейшим присвоением этим подграфам соответствующих длин волн. При этом для решения подзадачи назначения длин волн необходимо сформировать сам граф маршрутов ССК $G_c = \{A_c, B_c\}$, где все маршруты ССК становятся вершинами графа $A_c = \{a_i;\ i = \overline{1,R}\}$ с общим количеством R, а ребра $B_c = \{b_{ij};\ i,j = 1,R;\ i \neq j\}$ между вершинами графа формируются в случае, если маршруты ССК совпадают друг с другом хотя бы на одном из ребер графа $G = \{A, B\}$.

Сформированный граф маршрутов ССК $G_c = \{A_c, B_c\}$ необходимо «раскрасить» или установить соответствие каждой вершине графа (маршрута ССК) натуральное число (цвет) так, что для двух любых инцендентных вершин $a_i, a_{i+1} \in B$ это число было разное. В настоящий момент известны различные подходы к решению этой задачи приближенными и точными методами. Они основываются на алгоритмах полного перебора, жадных алгоритмах и алгоритмах с использованием битовых операций с матрицами. Самыми быстродействующими признаются алгоритмы, основанные на битовых операциях [10].

Для математической формулировки подзадачи назначения маршрутов необходимо определить: S – количество цветов, в которые можно «раскрасить» граф маршрутов ССК $G_c = \{A_c, B_c\}$; $S\{A_i\}$ – функцию раскраски, которая каждой вершине графа ставит в соответствие натуральное число (цвет). В этом случае задача раскраски на основе битовых операций может быть сформулирована следующим образом:

$$S\{A_i\} \to \min, \quad i \in A_c, \tag{8}$$

$$S(\mathrm{A}_i) \neq S(\mathrm{A}_j), \quad \mathrm{A}_i, \mathrm{A}_j \in B_{ij}, \tag{9}$$

$$\sum_{s=1}^{S} \xi_{is} = 1, \quad i \in A_c, \tag{10}$$

где

$$\xi_{is} = \begin{cases} 1, & \text{если вершине } i \text{ назначен цвет } s; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \tag{11}$$

Эту задачу можно также решать, используя «жадный» алгоритм совместно с алгоритмом битовых операций [10]. Суть этого алгоритма состоит в битовых операциях над матрицей смежности графа маршрутов ССК $G_c = \{A_c, B_c\}$. Начиная с первой строки матрицы смежности производится поиск нулевого элемента (то есть первой несмежной неокрашенной вершины). Далее производится процедура «стягивания вершин», то есть процедура дизъюнкции рассматриваемой строки и строки соответствующей первой несмежной неокрашенной вершине. Номера сложенных строк формируют первую цветовую группу. На результирующей строке проводится операция «стягивания» вершин до тех пор, пока не останется нулевых элементов в результирующей строке. Затем выбирается следующая по порядку строка матрицы смежности, не вошедшая в выбранные цветовые группы, а операции поиска и дизъюнкции повторяются. Работа алгоритма заканчивается после того, как все строки матрицы смежности распределены по цветовым группам.

Результатом решения второй подзадачи ВМНДВ на ТС с СУК станет назначение длин волн всем ССК (где номера строк соответствуют маршрутам ССК, а цветовые группы – длинам волн) на каждом участке сети либо вывод о нехватке имеющегося количества длин волн для обеспечения всех ССК.

Заключение

Таким образом, рассмотрены особенности решения задачи ВМНДВ на ТС с СУК с учетом разбиения ее на две подзадачи. Функции максимизации и минимизации в виде выражений (1) и (8), соответственно, зависят от условий технической реализации ТС с СУК, а также от возможностей использования устройств оптической коммутации и конвертации длин волн. Выражения (4–7) определяют условия использования различных схем резервирования, которые выбираются в зависимости от топологии и особенностей эксплуатации ТС с СУК. В ряде случаев при решении задачи ВМНДВ на ТС с СУК необходимо учитывать ограничения на OSNR, полосу частот каждого оптического канала, накопления линейных искажений и нелинейных помех. Конкретные математические методы решения рассмотренных подзадач могут адаптироваться к условиям использования в процессе проектирования, эксплуатации и последующей модернизации фрагментов ТС с СУК.

Литература

1. Грязев, А. Н. Методы развития транспортных сетей связи для цифровой экономики РФ / А.Н. Грязев, С.А. Ясинский, А.Н. Зюзин // Вестник связи. – 2018. – № 2. – С. 19–22.

2. Подход к выбору маршрутов и назначению длин волн в транспортных сетях со спектральным уплотнением на основе волнового алгоритма / В.В. Ефимов [и др.] // Электросвязь. – 2017. – № 7. – С. 28–30.

3. Ramesh, G. Reliable Routing and Wavelength Assignment for Optical WDM Networks / G. Ramesh, S. Sundaravadivelu // European Journal of Scientific Research. – 2010. – Vol. 48, No. 1. – P. 85–96.

4. Leonardi, E. Algorithms for the logical topology design in WDM all-optical networks / E. Leonardi, M. Mellia, M. Marsan // Optical Networks. – 2000. – Vol. 1. – P. 35–46.

5. 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. – С. 29–36.

6. Оценка надежности транспортной сети телекоммуникационной системы при использовании систем резервирования / С.А. Ясинский [и др.] // Информация и Космос. – 2017. – № 4. – С. 126–132.

7. Подход к поиску отказоустойчивой структуры транспортной сети телекоммуникационной системы на основе *p*-циклов / В.В. Ефимов [и др.] // Информация и Космос. – 2016. – № 3. – С. 36–39.

8. Алгоритм выбора маршрутов и назначения длин волн в транспортных сетях связи со спектральным уплотнением / А.Н. Грязев [и др.] // Труды ЦНИИС. Санкт-Петербургский филиал. – 2017. – Т. 1, № 4. – С. 159–165.

9. Теория алгоритмов: учеб. Пособие / П.А. Иржавский [и др.]. – Минск: БГУ, 2013. – 159 с.

10. Бацын, М. В. Быстрый алгоритм для решения задачи о раскраске графа с использованием битовых операций / М.В. Бацын, Л.Ф. Комоско // Труды 38-й конференции «Информационные технологии и системы – 2014». – Н. Новгород: ИППИ РАН, 2014. – С. 432–438.