

МЕТОД РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛИН ВОЛН В СЕТЯХ DWDM С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭВРИСТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА BCO-RWA

Введение

В современных телекоммуникационных сетях активно внедряются мультисервисные услуги, которые характеризуются большим разнообразием видов передаваемых потоков и требованиями к выделяемой пропускной способности. Это приводит к увеличению трафика, к чему особенно чувствительны транспортные сети. Современные сети характеризуются жесткими требованиями к качеству передачи. Основными методами для обеспечения качества передачи современного трафика являются: увеличение пропускных способностей сети, эффективное управление потоками в сети. Технология, позволяющая предоставить высокую скорость передачи, – это DWDM. Среди задач, которые необходимо решить при построении транспортной сети на основе технологии DWDM, следует отметить распределение длин волн (RWA). В зависимости от периодичности решения задачи распределения (назначения) длин волн можно выделить *статическое* распределение и *динамическое* распределение.

Задача статического распределения возникает, когда назначенный порядок длин волн световым маршрутам и распределения световых маршрутов не изменяется или изменяется редко (периодичность изменений – недели, месяцы).

Задача динамического распределения возникает, когда назначенный порядок длин волн световым маршрутам и распределения световых маршрутов изменяется довольно часто (периодичность изменений – минуты).

В статье рассмотрен метод статического распределения длин волн в транспортной сети на основе технологии DWDM с использованием эвристического алгоритма колонии пчел (BCO-RWA).

Обзор метода распределения длин волн при проектировании транспортной сети на основе технологии DWDM

Распределение длин в оптических сетях WDM отличается от распределения в сетях, построенных по другим технологиям. Оборудование WDM, устанавливаемое в узлах сети, не может изменять длину волны оптического сигнала, поступившего на ее вход, а следовательно, выбранная длина волны не может изменяться вдоль всего пути между узлами отправитель – получатель. По этой причине при назначении длин в сети может возникать ситуация, когда в сети на различных ее участках есть незанятые длины волн (есть не задействованные пропускные способности каналов связи), но выбрать маршрут и длину волны для обеспечения передачи информационного потока между конечными узлами невозможно. Повысить пропускную способность сети и устранить подобные блокировки возможно за счет установки оптических конверторов, которые позволяют изменять длину волны оптического сигнала. Это позволяет уменьшить количество блокировок и увеличить пропускную способность сети за счет повторного использования длин волн. Однако стоимость построения такой сети также растет, поэтому широко применяется частичное использование конверторов, то есть установка конверторов в часть узлов, которые позволяют обойти узкие места сети, связанные с невозможностью передачи двух информационных потоков на одной той же длине волны по одному и тому же оптоволокну.

Для решения задачи распределения длин волн в оптических сетях (задача RWA) применяются различные методы. Некоторые из них используют традиционные методы оптимизации, которые гарантированно найдут глобальный оптимум, например такие, как целочисленное линейное программирование [1, 2]. Такой подход к решению задачи сталкивается с проблемой «комбинаторного взрыва» (резкого увеличения количества ограничений при увели-

чении количества узлов и потоков в сети), что значительно усложняет решение задачи. Решить данную проблему удастся за счет применения эвристических алгоритмов, таких как Табу-поиск [3 – 5], алгоритм отжига [6, 7] или генетических алгоритмов [8, 9].

В работе [8] рассмотрено решение задачи распределения длин волн световым маршрутам при использовании генетического алгоритма, в основе которого лежит моделирование процесса эволюции и использование таких операций как наследование, мутации, отбор и кроссинговер. Однако такой способ имеет существенный недостаток, алгоритм находит зону локального экстремума целевой функции, после чего большое количество итераций расходуется на повышение уточнение точки локального экстремума вместо поиска глобального оптимума, что приводит к увеличению времени решения оптимизационной задачи.

В основе алгоритм отжига [6] лежит использование упорядоченного случайного поиска на основе моделирования процесса образования в веществе кристаллической структуры с минимальной энергией при охлаждении. Преимуществом алгоритма отжига является свойство избегания «ловушек» в локальных экстремумах функции за счет принятия не только изменений параметров, приводящих к уменьшению значения функции, но и некоторых изменений, увеличивающих ее значения в зависимости от параметра температуры характеризующего модулируемый процесс. Однако недостатком этого метода является высокая вычислительная сложность, это обусловлено тем, что для получения хорошего решения требуется очень медленное понижение вероятности перехода в состояние с более высоким значением целевой функции, которое приводит к большому числу итераций алгоритма.

Табу-поиск является мета-эвристическим алгоритмом локального поиска, который использует локальную процедуру поиска, заключающегося в многократном переходе из одного возможного решения к улучшению другого решения; при этом запрещаются те перемещения, которые возвращают поиск к предыдущим решениям и приводят к заикливанию алгоритма. Основным принципом, позволяющим алгоритму избегать попадания в локальный оптимум, является табу-список, который обновляется в конце каждой итерации. На каждой итерации алгоритм улучшает текущее найденное решение с учетом решений, найденных ранее. Для этого используется массив ранее найденных решений. Одна из главных проблем алгоритма Табу-поиск заключается в том, что алгоритм действует только в дискретных пространствах, при этом введение штрафов за нарушение ограничений в состав целевой функции не гарантирует нахождение допустимых решений.

В основе мета-эвристического алгоритма BCO-RWA [12] лежит моделирование поведения пчел в процессе сбора нектара. Главным достоинством этого алгоритма является невысокая вычислительная сложность. В работе [10] проведен сравнительный анализ применения метод пчелиной колонии, генетического и итерационного алгоритмов. Метод пчелиных колоний лучше остальных продемонстрировал способность выходить из локальных оптимумов за счет случайного поиска. С увеличением числа вершин преимущество пчелиного алгоритма перед выше перечисленными алгоритмами в плане качества решения увеличивается.

В статье предлагается использовать мета-эвристический метод BCO-RWA для решения задачи распределения длин волн.

Основные принципы алгоритма BCO-RWA

Алгоритм BCO (рис.1) основан на популяции. Работа алгоритма предполагает два этапа: фаза поиска решения и фаза выбора решения. Во время фазы поиска решения каждая пчела вылетает из улья и облетает все цветки (где под цветком подразумеваются пары – источник и назначение). Во время фазы выбора решения все пчелы возвращаются в улей, затем происходит сравнение и поиск лучшего решения, при этом алгоритм рассматривает найденные пчелами решения и с определенной вероятностью решает оставить найденное решение, искать новое решение или вербовать других пчел для дальнейшего поиска в направлении найденного решения. Рассмотрим принцип алгоритма BCO-RWA при решении задачи распределения длин волн более подробно.

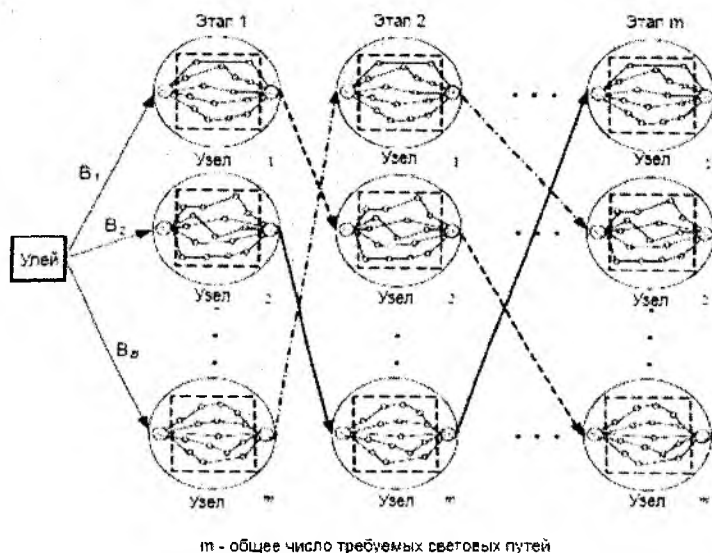


Рис. 1. Искусственная сеть

В начале поиска все пчелы находятся в улье. Пчелы вылетают из улья и облетают все цветки. Полет пчелы разделяется на этапы. На каждом этапе работы алгоритма пчела выбирает посетить один цветок на каждом этапе. Этот процесс соответствует установке соединения между парами источник и назначение – длины волны вдоль совокупности оптических каналов входящий в выбранный маршрут между источником и назначением.

Во время фазы поиска решения каждая пчела посещает n этапов (производится поиск n новых световых путей). На каждом этапе пчела выбирает один из непосещенных цветков. Последовательно n посещенных цветков пчелой отображает одно частное решение оптимизационной функции. Посещение пчелой n этапов эквивалентно установке n новых соединений между парой источник и назначение через световые пути. Успешность установки световых путей зависит от количества свободных длин волн в оптических каналах, через которые проходит маршрут. После фазы поиска решения алгоритм переходит к выбору решения.

Вероятность p выбора пчелой непосещенного цветка можно описать выражением

$$p = \frac{1}{n_t}, \quad (1)$$

где n_t – общее число непосещенных узлов.

При выборе алгоритмом следующего цветка происходит выбор маршрута из множества доступных маршрутов между парой источник-получатель и назначение длины волны вдоль выбранного маршрута.

Выбор физического маршрута в оптической сети в алгоритме BCO-RWA носит случайный характер, который описывается согласно логической модели [2] и имеет вид

$$p_r^{s,d} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{e^{V_r^{s,d}}}{\sum_{i=1}^{|R^{s,d}|} e^{V_i^{s,d}}}, \forall r \in R^{s,d}, W_r > 0 \\ 0, \forall r \in R^{s,d}, W_r = 0 \end{array} \right\}, \quad (2)$$

где $|R^{s,d}|$ – общее число доступных маршрутов между парой (s,d) . Маршрут r доступен, если есть хотя бы одна незанятая длина волны вдоль маршрута. Весовой коэффициент, используемый в выражении (1) при выборе физического маршрута, рассчитывается следующим образом:

$$V_r^{s,d} = \left\{ a \frac{1}{h_r - h_{r\min} + 1} + (1-a) \frac{W_r}{W_{\max}} \right\}, \quad (3)$$

где r – порядковый номер маршрута между парой узлов (s,d) , $r = 1, 2, \dots, k$, $r \in \{R^{s,d}\}$; h_r – длина маршрута; h_{\min} – длина кратчайшего маршрута; W_r – число длин волн доступных на маршруте r , $r = 1, 2, \dots, k$, $r \in \{R^{s,d}\}$; W_{\max} – максимальное число длин волн доступных на всех маршрутах, a – весовой коэффициент, $0 \leq a \leq 1$.

После возвращения пчелы в улей, алгоритм решает оставлять найденное частное решение оптимизационной задачи или расширять найденное частное решение в следующей фазе поиска решения. При обмене информацией между пчелами каждая пчела может получить информацию о найденных частных решениях другими пчелами. Вероятность того, что пчела начнет $u+1$ фазу поиска решения, используя тот же путь, что и в u фазе поиска решения, описывается выражением

$$p_b^{u+1} = e^{-\frac{C_{\max} - C_b}{u}}, \quad (4)$$

где C_b – общее число установленных световых путей от начала процесса поиска соответствующих маршруту, найденному b -й пчелой; C_{\max} – максимальное число установленных световых путей от начала работы алгоритма.

Вероятность p_k , что при k -м обмене информацией пчелами (анализ частного решения) найденный маршрут будет выбран свободной пчелой, определяется выражением

$$p_k = \frac{e^{C_p}}{\sum_{p=1} C_p}, \quad (5)$$

где C_k – общее число установленных световых путей при k -м обмене частного решения.

Однако при анализе данного алгоритма были выявлены следующие недостатки:

- не решается задача выбора расположения оптического конвектора в сети (в оригинальной статье конвертер устанавливается в первый узел маршрута при невозможности установки соединения);

- на этапе расчета вероятности выбора маршрута не учитываются конвекторы в узлах, через которые проходит маршрут; в рамках алгоритма ограничиваются только одним конвектором;

- не учитывается влияние четырехволнового смешивания при установке световых путей.

Методы устранения недостатков

На этапе вычисления вероятности выбора маршрута было модифицировано расчетное выражение для учета условия, что на узле, через который проходит маршрут, может находиться оптический конвектор. Модифицированное выражение вероятности выбора маршрута пчелой:

$$V_r^{s,d} = \left\{ a \frac{1}{h_r - h_{r \min} + 1} + (1-a) \frac{W_r^*}{W_{\max}} \right\}, \quad (6)$$

где r – порядковый номер маршрута между парой узлов (s,d) , $r = 1, 2, \dots, k$, $r \in \{R^{s,d}\}$; h_r – длина маршрута; h_{\min} – длина кратчайшего маршрута; W_r^* – число длин волн, доступных на маршруте r с учетом, что на узлах маршрута может находиться оптический конвектор, $r = 1, 2, \dots, k$, $r \in \{R^{s,d}\}$; W_{\max} – максимальное число длин волн, доступных на всех маршрутах.

В базовый алгоритм была добавлена процедура выбора местоположения оптического конвертора. В работе исследовано два варианта модификации, условно названные «узким» и «широким» методом.

Суть «узкого» метода заключается в поиске узкого места в сети (узел, через который установлено наибольшее количество соединений), где и устанавливается оптический конвектор.

Суть «широкого» метода заключается в поиске широкого места в сети (узел, через который установлено наименьшее количество соединений), где устанавливается оптический конвектор.

Последствием ЧВС является появление побочных сигналов, в том числе на длинах волн, соответствующих другим рабочим каналам, что может привести к росту ошибок и ухудшению эффективности системы DWDM. Для учета влияние этого явления при выборе маршрута была использована формула расчета мощности помехи четырехволнового смешивания [11]:

$$P_{ijk}(f_i, f_j, f_k) = \frac{\eta}{9} D^2 \gamma^2 P_i P_j P_k e^{-\alpha L} \left\{ \frac{(1 - e^{-\alpha L})^2}{\alpha^2} \right\}, \quad (7)$$

где P_i, P_j, P_k – мощности входных канальных сигналов на частотах f_i, f_j, f_k соответственно; D – коэффициент вырожденности; α – коэффициент затухания оптического волокна; L – длина отрезка оптического волокна.

Коэффициент нелинейности на длине волны λ рассчитывается по формуле

$$\gamma = \frac{2 \pi n_2}{\lambda A_{\text{эфф}}}, \quad (8)$$

где n_2 – коэффициент нелинейности показателя преломления; $A_{\text{эфф}}$ – эффективная площадь оптического волокна.

Эффективность η ЧВС описывается выражением

$$\eta = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \Delta\beta^2} \left[1 + \frac{4e^{-\alpha L} \sin^2\left(\frac{\Delta\beta L}{2}\right)}{(1 - e^{-\alpha L})} \right], \quad (9)$$

Коэффициент фазового согласования $\Delta\beta$ зависит от хроматической дисперсии $D_c(\lambda)$:

$$\Delta\beta = \frac{2\pi\lambda_k^2}{c} \Delta f_{ik} \Delta f_{jk} \left[D_c(\lambda) + \frac{\lambda_k^2}{2c} (\Delta f_{ik} + \Delta f_{jk}) \frac{dD_c(\lambda)}{d\lambda} \right], \quad (10)$$

где интервал между каналами $\Delta f_{ik} = |f_i - f_k|$, $\Delta f_{jk} = |f_j - f_k|$; c – скорость света.

Мощность помехи ЧВС на частоте f_m равна сумме мощностей всех комбинационных продуктов [4]:

$$P_{\text{ЧВС}}(f_m) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P_{ijk}(f_i, f_j, f_k), \quad (11)$$

где N – количество каналов.

Приведем расчет мощности усиленного спонтанного излучения (ASE):

$$P_{ase} = 2n_{sp}(G-1)hf_m\Delta f_0, \quad (12)$$

где n_{sp} – коэффициент спонтанной эмиссии усилителя; h – постоянная Планка; Δf_0 – ширина полосы пропускания оптического фильтра демультиплексора DWDM; G – коэффициент усиления усилителя.

Допустим, что все участки одинаковой длины, следовательно, мощность усиленного спонтанного излучения на входе приемного оптического модуля (ПРОМ) равна сумме соответствующих мощностей на выходе всех усилителей:

$$P_{ase\Sigma} = P_{ase}(N_{yc} + 1), \quad (13)$$

Тогда мощность ЧВС на входе ПРОМ

$$P_{\text{ЧВС}\Sigma} = P_{\text{ЧВС}}G(N_{yc} + 1), \quad (14)$$

На выходе фотоприемника оптический шум ЧВС и ASE соответственно формируют электрический сигнал с мощностями:

$$P_{e\text{ЧВС}\Sigma} = 2z^2P_{ex} \frac{P_{\text{ЧВС}\Sigma}}{8}, \quad (15)$$

$$P_{e\text{ase}\Sigma} = 4z^2P_{ex}P_{ase\Sigma} \cdot \frac{\Delta f_e}{\Delta f_0}, \quad (16)$$

где Δf_e – полоса пропускания электрического усилителя ПРОМ.

Чувствительность фотоприемника

$$z = \frac{\eta e}{hf_m}, \quad (17)$$

где η – квантовая эффективность фотодетектора; e – заряд электрона.

Q-фактор и связанная с ним вероятность ошибки рассчитываются по формулам:

$$Q \approx \frac{P_{ex}}{\sqrt{P_{e\text{ase}\Sigma} + P_{e\text{ЧВС}\Sigma}}}, \quad (18)$$

$$P_{\text{ош}} = \frac{e^{-\frac{Q^2}{2}}}{\sqrt{2\pi}Q}. \quad (19)$$

Полученное выражение (18) используется при расчете вероятности выбора маршрута в алгоритме BCO-RWA следующим образом. На этапе расчета вероятности выбора маршрута между источником и назначением происходит сравнение рассчитанного Q-фактора на каждом оптическом канале, через которые проходит рассматриваемый маршрут с допустимым

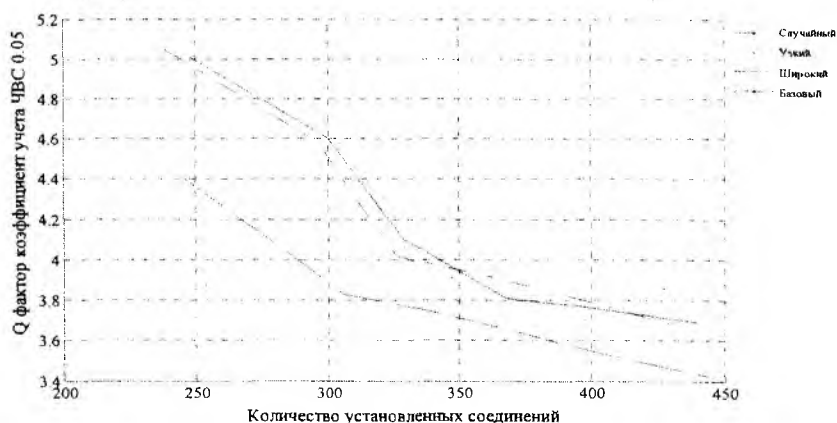
значением Q-фактора. Если значение Q-фактора превышает допустимую норму, то вероятность выбора этого маршрута уменьшается.

В результате эксперимента были получены следующие результаты:

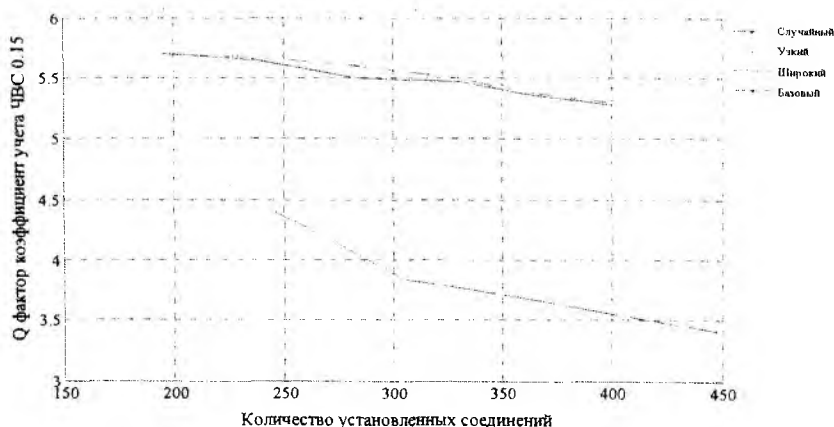
Число узлов в сети	Базовый метод			«Широкий» метод			«Узкий» метод		
	k=1 $\Omega=40$	k=2 $\Omega=40$	k=3 $\Omega=40$	k=1 $\Omega=40$	k=2 $\Omega=40$	k=3 $\Omega=40$	k=1 $\Omega=40$	k=2 $\Omega=40$	k=3 $\Omega=40$
6	210	225	245	221	234	263	211	224	246
7	260	280	307	272	299	332	258	282	308
8	295	315	335	299	321	340	311	336	365
9	325	340	371	328	343	372	341	365	402
10	355	380	403	362	379	402	376	410	440
11	390	410	448	392	414	447	408	438	488

Таблица включает результаты без учета явления четырехволнового смешивания алгоритмом. Из таблицы видно, что при небольших размерностях топологий 6, 7 узлов методы «широкий» и базовый лучше, чем «узкий». Однако при росте размерности топологий «узкий» метод позволяет установить больше соединений за счет более рационального расположения конвектора. При увеличении числа используемых в сети конвекторов выигрыш за счет рационального расположения конвекторов растет.

Результаты с учетом четырехволнового смешивания представлены на графиках (рис 2).



а



б

Рис. 2. Зависимость Q-фактора от количества установленных соединений при разных значениях коэффициента ЧВС и размерности сети: а – коэффициент ЧВС 0.05, б – ЧВС 0.15, в – ЧВС 0.8

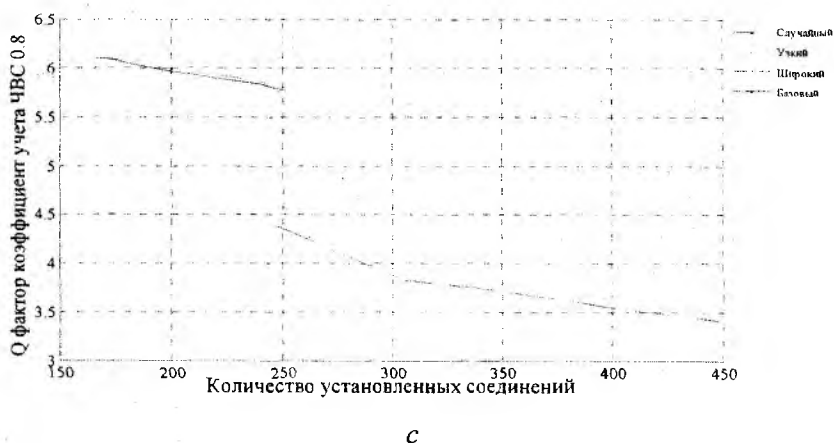


Рис. 2. (Продолжение)

Из рис. 2 видно, что при увеличении коэффициента ЧВС (коэффициент показывает уменьшение вероятности выбора маршрута алгоритмом, если Q-фактор меньше нормированного значения) количество установленных соединений сокращается, так как главная цель – обеспечение качества. При уменьшении количества установленных соединений Q-фактор увеличивается, так как задействовано меньшее количество длин волн в оптических каналах.

При анализе полученных результатов можно сделать вывод, что даже при небольшом значении коэффициента ЧВС(0.05) значение Q-фактора значительно больше, хотя количество установленных соединений незначительно отличается при базовом методе алгоритма BCO-RWA.

Заключение

Проанализирована работа мета-эвристического алгоритма BCO-RWA. В ходе анализа были выявлены следующие недостатки:

- не решается задача выбора расположения оптического конвектора в сети (устанавливается в первый узел маршрута при невозможности установки соединения);
- на этапе расчета вероятности выбора маршрута не учитываются конвекторы в узлах, через которые проходит маршрут;
- в рамках алгоритма ограничиваются только одним конвектором;
- не учитывается влияние четырехволнового смешивания при установке световых путей.

Для устранения недостатков были введены модификации: введены алгоритмы выбора места, расположения оптического конвектора; модифицирована формула расчета вероятности выбора светового маршрута с учетом, что на узлах маршрута может находиться оптический конвектор; добавлены математические формулы учета ЧВС при расчете вероятности выбора светового маршрута.

В эксперименте использовано программное обеспечение, которое генерирует топологию сети и решает задачу RWA с помощью алгоритма BCO-RWA. При анализе результатов «широкий» метод оказался более эффективным на небольших размерностях (6, 7) сетей, «узкий» метод лучше на больших размерностях топологий сетей, средний выигрыш составляет 5 % при одном оптическом конвекторе, при двух конвекторах выигрыш 7 %, при трех конвекторах – 9 %.

Данный подход рекомендуется при проектировании оптических сетей на основе технологии DWDM. «Широкий» метод более эффективен для небольших размерностей топологий сети (не более 7 узлов), «узкий» метод – для больших размерностей сети (более 8 узлов в сети).

- Список литературы:** 1. *D. Banerjee and B. Mukherjee*. Wavelength Routed Optical Networks Linear formulation resource budgeting tradeoff and a reconfiguration study // *IEEE /ACM Transactions on Networking*. – 2000. – Vol. 8, № 5. – P. 684-696. 2. *M. Sridharan, M.V. Salapaka and A.K. Somani*. A practical approach to operating survivable WDM networks // *IEEE Journal on Selected Areas of Communications*. – 2002. – Vol. 20, № 1. – P. 34-36. 3. *G.D. Morley and W.D. Grover*. Tabu search optimisation of optical ring transport network // *IEEE Globecom'01*. San Antonio. – 2001. – Vol. 4, № 1. – P. 2160– 2164. 4. *A. Grosso, E. Leonardi, M. Mellia and A. Nucci* Logical Topology Design over WDM wavelength routed networks robust to traffic uncertainties // *IEEE Communication Letters*. – 2001. – Vol. 5, № 4. – P. 172-174. 5. *S. Yan, M. Ali and J. Deogun*. Route optimisation of multicast sessions in sparse light-splitting optical networks // *IEEE Globecom '01*. – 2001. – Vol. 4, № 1. – P. 2134-2138. 6. *Mukherjee B., Banerjee D. and Mukherjee A.* Some Principles of designing a wide-area WDM optical network // *IEEE/ACM Transactions on Networking*. – 1995. – Vol. 5, № 5. – P. 489-500. 7. *Rodriguez-Dagnino R.M. and Lopez-Cuadana E.O.* Simulated Annealing and Stochastic ruler algorithms for wavelength assignment planning in WDM optical networks // *IEEE SMC'99*. – 1999. – Vol. 6. – P. 1015-1020. 8. *M. Ali, B. Ramamurthy and J.S. Deogun*. Routing algorithms for all-optical networks with power consideration : The unicast case // *In Proc of the 8th IEEE ICCCN'99*. Boston-Natick MA. – 1999. – P. 335-340. 9. *Sheu S.T., Chuang Y.R., Cheng Y. J. and Tseng H.W.* A Novel optical IP Router Architecture for WDM networks // *In Proc. of 15th International Conference on Information Networking*. – 2001. – P. 335-340. 10. *Курейчик, В.М., Кажаров, А.А.* Использование пчелиных алгоритмов для решения комбинаторных задач // *Искусственный интеллект*. – 2010. – № 3. – С. 583-589. 11. *Педяш, В.В., Решетников, О.С.* Оптимізація потужності лінійного сигналу системи DWDM // *Цифрові технології*. – 2009. – №5. – С. 27 – 33. 12. *Teodorović D.* Bee Colony Optimization (BCO) // *in Swarm Intelligence for Knowledge-Based Systems*. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg, 2009. – P. 39-60.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 05.09.2012