

УДК 621.39

СТРУКТУРНЫЙ И ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ НАЛОЖЕННОЙ СЕТИ IP/MPLS ПОВЕРХ СЕТИ WDM С ПРИМЕНЕНИЕМ МОДЕЛИ, ПРЕДСТАВЛЕННОЙ В ВИДЕ МНОГОСЛОЙНОГО ГРАФА



[Д.В. АГЕЕВ](#)

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Abstract - Transport networks are an important components of modern multi-service telecommunication systems. Future technical characteristics of transport networks and their economic efficiency is laid at the design stage. Given article devoted to the structural synthesis problem of IP/MPLS overlay network over WDM network. Route for flows transmission in the transport network can be formed with the use of technology IP / MPLS network, or WDM-network. These technologies have features that results to need the choice between the flexibility of the formation routes and efficient use of bandwidth channels (IP/MPLS technology) and minimizing the network cost by simplifying the hardware of nodes (technology WDM).

When solving this problem is given to the choice of bandwidth, transmission routes and topology synthesis together at both levels overlay network. To solve this problem, we use the model as a multilayer graph, as well as flow model for the multilayer graph. The use of models in the form of multilayer graph can adequately describe the structure of the designed network, considering the relationship of processes at its different levels and to provide of describing telecommunications network as a single integral entity.

Flow model has allowed to formulate the synthesis problem as a linear programming problem and solved it by using standard optimization software packages. Research of efficiency of the proposed method has shown that this method allows obtaining the structure of the transport network in the 7 - 11% less cost in comparison with the methods based on the sequential design of each level.

Анотація – Підхід, що використовується в статті, базується на описі структури телекомунікаційної мережі, яка синтезується, у вигляді багатопшарового графа з наступним синтезом потокової моделі. Згідно з проведеним аналізом запропонованого методу встановлено, що даний підхід дозволяє вирішити поставлену задачу і є більш ефективним за економічними параметрами, ніж метод, що базується на послідовному розв'язанні задачі для кожної з накладених мереж.

Аннотация – Используемый в статье подход базируется на описании структуры синтезируемой телекоммуникационной сети в виде многослойного графа с последующим синтезом потоковой модели. Согласно проведенному анализу предложенного метода установлено, что данный подход позволяет решить поставленную задачу и является более эффективным по экономическим параметрам, чем метод, базирующийся на последовательном решении задачи для каждой из наложенных сетей.

Введение

Переход от индустриального общества к информационному является характерной чертой современного этапа развития мировой цивилизации. Создание высокоэффективной телекоммуникационной среды стало важной национальной проблемой. Без ее решения проблематично построение информационного общества и внедрение достижений информационных технологий в сферы производства, бизнеса, науки, образования, медицины и культуры. Общие подходы к построению перспективных телекоммуникационных систем нашли отражение в концепции сетей

связи следующего поколения – NGN (Next Generation Network), обеспечивающих предоставление широкого набора услуг с гибкими возможностями по управлению, персонализации и созданию новых услуг за счет унификации сетевых решений.

Важной составляющей современных мультисервисных сетей являются транспортные сети. Несмотря на очень большой разброс степени развития транспортных сетей в Украине, да и в мировом масштабе, современную ситуацию в целом можно охарактеризовать следующими тезисами:

- основной средой передачи стационарных сетей являются волокна оптических кабелей;

- основным транспортным средством являются системы передачи синхронной цифровой иерархии (SDH);

- технологии спектрального уплотнения (Wavelength Division Multiplexing - WDM), пакетные технологии (ATM, IP, Ethernet и др.) используются в той или иной степени в зависимости от конкретных условий и уровня развития сети.

Таким образом, существующие транспортные сети, составляющие NGN, представляют собой смешанные оптико-электронные сети. Волоконно-оптические кабели, оснащенные системами передачи со спектральным уплотнением (WDM), обеспечивают высокую эффективность передачи телекоммуникационных сигналов между сетевыми узлами.

Современные требования к формированию услуг влекут за собой целесообразность применения на транспортном уровне пакетных технологий. Эти технологии (ATM, IP, Ethernet и др.), являющиеся электронными, изначально не предназначались для использования в сетях дальней связи. По этой причине они не обладают развитыми в достаточной мере функциями передачи и недостаточно эффективно используют возможности оптических кабелей.

Оптические технологии существующих сетей, напротив, весьма эффективно используют среду передачи, обеспечивая высокую пропускную способность. Однако сеть прозрачных оптических каналов, образованная этими технологиями, пассивна, то есть не содержит механизмов управления абонентскими потоками.

Сочетание оптических сетей и наложенных на них сетей с пакетными технологиями образуют универсальную транспортную среду. В результате существующие транспортные сети представляют собой различные варианты многослойных структур. Каждая из наложенных сетей может иметь отличную от нижележащей топологию.

Наиболее перспективными при построении мультисервисных транспортных сетей является использование такой структуры, которая содержит IP/MPLS сеть, наложенную поверх оптической сети WDM. Эффективное решение задач структурного и параметрического синтеза данного класса сетей требует совместного синтеза топологий каждого из уровней, решения задач выбора маршрутов и использования подхода, базирующегося на представлении синтезируемой телекоммуникационной системы как единого целостного объекта. Решению задачи структурного и параметрического синтеза наложенной сети IP/MPLS поверх сети WDM с использованием математической модели, представленной в виде многослойного графа, посвящена данная статья.

I. Общее характеристика синтезируемой наложенной сети IP/MPLS

Связи между узлами сети IP/MPLS обеспечиваются опорной транспортной сетью, для которой IP/MPLS сеть является наложенной. В качестве опорной транспортной сети может использоваться сеть WDM (Wavelength Division Multiplexing) в зависимости от требуемой пропускной способности каналов сети IP/MPLS. В данной сетевой архитектуре некоторые или все узлы сети поддерживают не только технологии транспортной сети, но и технологию IP/MPLS. Узел, поддерживающий технологию IP/MPLS, называется Label Switched Router (LSR). Пограничные узлы сети обязательно должны поддерживать функции обеспечения объединения трафика с коммутацией пакетов, поступающих от абонентов сети. Узлы сети, находящиеся в ядре сети, могут поддерживать, а могут и не поддерживать функциональность IP/MPLS. Связь между узлами LSR обеспечивается физическими линиями связи (или световыми путями, в зависимости от используемой технологии опорной сети) и могут транзитно проходить через несколько узлов опорной транспортной сети, не поддерживающих IP/MPLS функциональность. Узлы LSR и каналы связи между ними образуют IP/MPLS сеть, наложенную на опорную транспортную сеть.

Таким образом, при проектировании данного класса сетей необходимо определять топологию обеих сетей: топологию транспортной сети и топологию сети IP/MPLS. Это означает, что мы должны определить:

- какие узлы транспортной сети должны поддерживать функциональность MPLS;
- каким образом должны быть связаны узлы LSR через опорную транспортную сеть;
- какую величину пропускной способности должны иметь соединения между LSR.

В простейшем случае в качестве решения можно предложить конфигурацию сети, в которой поддержка функций MPLS осуществляется только в пограничных узлах. В этом случае нам необходимо установить логическое соединение между всеми парами пограничных LSR узлов и привести их пропускную способность в соответствие с величинами передаваемых потоков. Преимуществом такого решения является то, что мы уменьшили затраты, связанные с установкой оборудования MPLS в узлах ядра транспортной сети. К недостаткам можно отнести то, что в этом случае для каждого соединения между LSR нам необходимо выделять отдельный канал связи, что приводит к нерациональному использованию пропускной способности каналов связи опорной транспортной сети.

Другим крайним решением является установка оборудования MPLS во всех узлах транспортной сети. В этом случае мы можем более полно использовать пропускные способности каналов связи транспортной сети за счет использования статистического мультиплексирования и группового использования каналов связи при передаче информационного трафика. Платой за это будет увеличение затрат, связанное с установкой оборудования MPLS в узлах сети.

В общем случае, решением задачи является установка оборудования MPLS в некоторой части узлов транспортной сети, так чтоб обеспечить компромисс между затратами на оборудование узлов сети с функциями MPLS и расходами, связанными с неполным использованием пропускной способности каналов связи.

Дополнительным эффектом, позволяющим увеличить степень использования пропускной способности каналов связи, является то, что на практике пропускная способность каналов связи наращивается дискретно большими порциями. Это приводит к тому, что для обслуживания соединения между LSR могут выделяться каналы связи с пропускной способностью, намного превышающей необходимую величину для обслуживания данного трафика, появляется большая величина неиспользуемой пропускной способности сети. Агрегирование трафика позволяет уменьшить эффект квантования пропускной способности и более полно ее использовать.

При синтезе транспортной сети, содержащей IP/MPLS-сеть, наложенную поверх оптической сети WDM, необходимо учитывать особенности формирования маршрутов в этой сети. Так, сеть WDM состоит из множества узлов с установленными в них оптическими мультиплексорами, которые соединены между собой волоконно-оптическими линиями связи. Для передачи трафика между абонентскими узлами в оптической транспортной сети WDM необходимо определить световой путь, используемый для этого, а затем каждому из световых путей необходимо назначить длину волны таким образом, чтобы в каждом из оптических каналов не было двух потоков с одинаковой длиной волны.

II. Анализ публикаций

Как было уже сказано выше, синтезируемая телекоммуникационная транспортная сеть имеет многоуровневую структуру, образованную наложенными сетями. Известные ранее подходы при решении задач проектирования используют последовательное решение задач проектирования для каждого из уровней отдельно [1, 2]. При этом результаты проектирования на одном из уровней являются исходными данными для остальных уровней сети. При этом в процессе проектирования не учитываются взаимосвязи и взаимозависимости между уровнями. В результате, итоговый вариант конфигурации сети не является оптимальным, а в ряде случаев может привести к нестабильной работе проектируемой сети при эксплуатации.

Учет многоуровневой структуры современных телекоммуникационных систем требует разработки новых математических моделей, которые позволяли бы адекватно описывать существующие физические и логические связи между элементами системы на разных ее уровнях, разных видов иерархий и эффективно решать задачи структурного и параметрического синтеза при их проектировании.

Учет многоуровневой структуры телекоммуникационных систем, образуемой наложенными сетями, можно произвести за счет разделения системы на логическую и физическую сети [3, 4]. При этом топология каждой сети описывалась графом. Каждое ребро логической сети представлялось в виде потока, протекающего по фи-

зической сети. Использование данного подхода ограничивалось обычно двумя уровнями. При проектировании сетей с большим количеством уровней задача сводилась к двухуровневому случаю, решение задачи осуществлялось за счет последовательного проектирования каждого уровня с использованием результатов как исходных данных для проектирования соседнего уровня, что не дает оптимального решения задачи в целом.

Дальнейшим развитием идеи разделения структуры наложенных сетей на логическую и физическую является модель многослойной сети [5, 6]. Каждая наложенная сеть, входящая в состав моделируемой сети, называется слоем. Каждой слой описывается графом, при этом множество вершин графа верхнего слоя является подмножеством вершин нижнего слоя. Для многослойной сети вводится дополнительное ограничение, что каждый канал верхнего слоя соответствует одному или нескольким путям в нижнем слое. Использование описанной модели позволяет решать задачу нахождения структуры каждого уровня телекоммуникационной сети комплексно для всей системы.

С использованием модели многослойной сети в работах [5, 7] решалась задача структурного и параметрического синтеза сетей MPLS. При этом основное внимание уделено эффекту, связанному с дискретными значениями допустимых величин пропускных способностей каналов связи и производительности оборудования узлов сети. Метод проектирования телекоммуникационных сетей MPLS с учетом эффекта статистического мультиплексирования рассмотрен в работе [8]. Этот метод позволяет также решать задачу определения мест расположения узлов с коммутацией пакетов и оптимизации виртуальной топологии сети. Ряд других работ [9, 10] также посвящен задаче определения мест расположения узлов сети с функциями MPLS. Во всех указанных выше работах задача решалась для случая передачи по сети трафика типа «точка-точка» (unicast трафик).

В работе [11] рассматривается задача определения множества multicast – деревьев, совместно использующих сетевые ресурсы, так чтобы минимизировать максимальную загруженность каналов связи, используемых в логических соединениях. Оптимальное решение задачи обеспечивается за счет определения оптимальных маршрутов передачи информации при известных пропускных способностях каналов связи. Метод проектирования телекоммуникационной системы с multicast трафиком, рассмотренный в работе [12], учитывает требования по параметрам QoS для различных видов трафика.

При структурном и параметрическом синтезе IP/MPLS-сети, наложенной поверх оптической сети WDM, необходимо решать задачу выбора маршрутов (световых путей) и назначения им длин волн в нижележащей сети WDM. Поскольку назначение комбинации светового пути и длины волны являются сложными задачами, при решении задачи выбора маршрута и назначения длины волны (Routing and Wavelength Assignment, RWA) используется подход, базирующийся на декомпозиции задачи на две подзадачи: задача выбора световых путей и задача назначения длин волн. В работе [13] предложен способ решения задачи RWA для нескольких запросов, где использо-

влась формулировка задачи как задача целочисленного линейного программирования, а также эвристики, базирующейся на использовании теоремы о максимальном покрытии, что гарантирует высокое качество получаемого решения.

Общим недостатком модели многослойной сети является то, что она не позволяет описывать структуру многоуровневой системы, имеющей множественные связи между элементами разных уровней, а также потенциальные связи, которые необходимо учитывать при решении задач структурного синтеза.

Для устранения данного недостатка в работах [14, 15] предложена математическая модель современных телекоммуникационных систем, содержащих наложенные сети, представленная в виде многослойного графа.

В работе [16] предложена методика описания современных телекоммуникационных систем, имеющих многоуровневую структуру, образованную наложенными сетями. Описание телекоммуникационных систем многослойными графами позволяет учитывать свойства многослойных сетей. С помощью этой модели впервые удалось отобразить логические и физические связи, имеющие место в реальных телекоммуникационных системах, что позволило учесть эти связи при проектировании систем в целом как единого целостного объекта.

III. Предметная постановка задачи синтеза сети MPLS, наложенной поверх сети WDM

Проектируемая сеть (рис. 1) выполняет функции, относящиеся к уровню транспорта концепции NGN. В качестве телекоммуникационных технологий, используемых в данной сети, используются технология WDM. Поверх указанной сети организовывается наложенная IP/MPLS сеть. Через проектируемую сеть передаются информационные потоки с групповой адресацией.

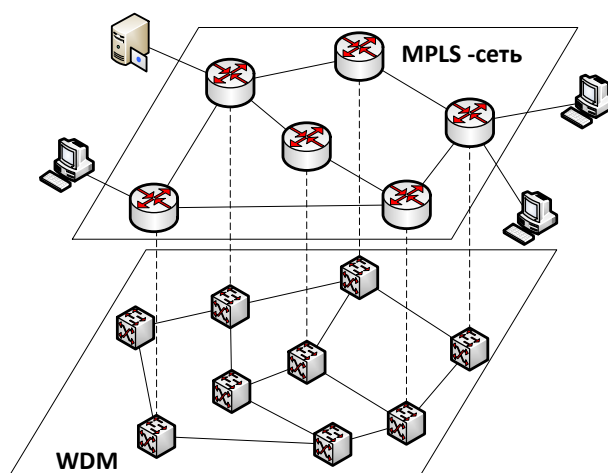


Рис. 1. Исходная структура синтезируемой наложенной сети

Для учета эффекта статистического мультиплексирования в данной работе используется упрощенная модель информационного потока [17]. Каждый информационный поток, передаваемый по каналам связи, характеризуется двумя парамет-

рами: средним значением f , Мбит/с и величиной всплеска f^+ . При выборе необходимой величины пропускной способности канала связи c_{ij} принимаем, что ее величина должна быть равна сумме средних значений потоков, передаваемых по каналу связи, плюс величина всплеска с максимальным значением:

$$c_{ij} \geq \max_k (f_{ij}^{+k}) + \sum_k f_{ij}^k. \quad (1)$$

Опишем математическую модель решаемой задачи.

Задано:

- $Z = \{z_i\}$ — множество узлов оптической сети;
- $Z^M = \{z_i^M\}$ — множество узлов оптической сети, где возможна установка LSR, $Z^M \subseteq Z$;
- $Z^U = \{z_i^U\}$ — множество узлов сети, которые являются источниками или получателями для информационных потоков $Z^U \subseteq Z^M$;
- $B = \{b_{ij}\}$ — множество каналов связи, использование которых возможно в проектируемой сети, $b_{ij} = (z_i, z_j)$;
- $B^M = \{b_{ij}^M\}$ — множество логических связей, использование которых допустимо в проектируемой MPLS-сети, $b_{ij}^M = (z_i^M, a_j^M)$;
- $M = \{\mu_k\}$ — множество потоков, передаваемых через сеть;
- $\mu_k = (z_k^S, z_k^D, f_k, f_k^+)$ — набор параметров, характеризующий поток μ_k , где:
- z_k^S — узел источник потока μ_k , $z_k^S \in Z^U$;
- z_k^D — узел — потребитель потока μ_k , $z_k^D \in Z^U$;
- f_k — среднее значение интенсивности потока μ_k ;
- f_k^+ — величина всплеска для потока μ_k ;
- $\Xi = \{\xi_i\}$ — множество типов интерфейсных плат, установка которых допустима в узлах сети IP/MPLS;
- $\xi_i = (c_i^\xi, d_i^\xi)$ — производительность c_i^ξ и стоимость d_i^ξ интерфейсной платы типа ξ_i , устанавливаемой в узлах LSR;
- $\Lambda = \{\lambda_i\}$ — множество длин волн, использование которых допустимо в рамках используемой технологии оптической сети;
- $D = \{d_{ij}\}$ — затраты на строительство оптической линии связи между узлами z_i и z_j оптической сети, $d_{ij} = D(b_{ij})$;
- $D^O = \{d_i^O\}$ — затраты на установку в узле сети z_i оборудования оптического кроссконнектора, $d_i^O = D^O(z_i)$;
- $D^M = \{d_i^M\}$ — затраты на установку в узле сети z_i^M оборудования LSR, $d_i^M = D^M(z_i^M)$;

Необходимо найти:

- $Z' = \{z'_i\}$ — множество узлов сети, входящих в состав результирующей телекоммуникационной системы, $Z' \subseteq Z$;
- $Z'^M = \{z'^M_i\}$ — множество узлов сети, в которых устанавливается оборудование LSR, $Z' \supseteq Z'^M \subseteq Z^M$;
- $B' = \{b'_{ij}\}$ — множество каналов связи, входящих в состав проектируемой системы (топологию сети), $b'_{ij} = (z'_i, z'_j)$;
- $B'^M = \{b'^M_{ij}\}$ — множество каналов связи между узлами LSR, используемых в проектируемой транспортной сети (топологию IP/MPLS сети), $b'^M_{ij} = (z'^M_i, z'^M_j)$, $z'_i \in Z'^M$;
- $c^M(b'^M_{ij})$ — пропускные способности каналов связи между узлами LSR (типы используемых плат $\xi(b'^M_{ij})$);
- $\Pi^M = \{\pi^M_k\}$ — маршруты передачи для каждого потока $\mu_k \in M$ через сеть MPLS, $\pi^M_k = (z^S_k, \dots, z_i, \dots, z^D_k)$, $z_i \in Z'^M$;
- $\Pi = \{\pi_m\}$ — маршруты (световые пути) для каждого потока, передаваемого по каналу связи между узлами LSR z^M_s и z^M_t сети IP/MPLS, по оптическим каналам связи сети WDM $\pi_m = (z_s, \dots, z_i, \dots, z_t)$, $z_i \in Z'$;
- $\lambda^m_{ij} = \lambda(b'_{ij})$, — распределение длин волн, используемых в каждом канале связи $b'_{ij} = (z_i, z_j)$, $z_i, z_j \in Z'$ оптической сети для передачи потоков по световым путям π_m , $\lambda^m_{ij} \in \Lambda$.

Критерий оптимальности: минимум затрат на организацию сети, определяемых как сумма стоимости оборудования, устанавливаемого в узлах сети и используемого для организации канала связи с необходимой пропускной способностью:

$$\sum_{z_i \in Z'} d_i^O + \sum_{b'_{ij} \in B'} d_{ij} + \sum_{z'^M_i \in Z'^M} d_i^M + \sum_{b'^M_{ij} \in B'^M} d^M(b'^M_{ij}) \rightarrow \min, \quad (2)$$

где $d^M(b'^M_{ij})$ — затраты на организацию канала связи между узлами LSR сети MPLS с заданной пропускной способностью.

IV. Синтез математической модели наложенной сети IP/MPLS в виде многослойного графа

Суть решаемой задачи заключается в определении совокупности структур на различных уровнях абстрактного описания проектируемой транспортной сети. Каждая структура характеризуется множеством входящих в нее элементов и связями между этими элементами. Каждый из элементов и каждая связь характеризуется

набором параметров, величины которых должны быть известны в результате решения задачи структурного и параметрического синтеза наложенной сети IP/MPLS поверх сети WDM. Часть структур в проектируемой системе при решении задачи считаются известными и являются исходными данными. Между абстрактными структурами проектируемой сети существует связь, которая выражается в зависимости между топологиями рассматриваемых структур и параметрами их элементов и связей. Частично взаимные связи заданы в качестве исходных данных, остальные взаимосвязи необходимо определить из предметной постановки задачи во время синтеза ее математической модели.

Для решаемой нами задачи в качестве исходных данных являются:

- структура, описывающая информационные связи между узлами источниками и потребителями информации, а также параметры этих связей;
- наборы допустимых значений, которые совместно могут принимать параметры элементов и связей структур;
- местоположения узлов проектируемой сети.

Проектируемая сеть имеет многоуровневую технологическую архитектуру, образуемую наложенными сетями. Для ее описания удобно использовать в качестве математической модели многослойный граф.

Построим математическую модель решения задачи с использованием многослойных графов.

Согласно общей методике решения задачи синтеза мультисервисных телекоммуникационных систем с использованием многослойных графов мы должны синтезировать начальный избыточный многослойный граф $MLG = (G, V, E)$. Для этого мы должны выполнить следующие шаги:

- выделить в синтезируемой сети отдельные наложенные слои;
- каждый слой описать графом, описывающим связи на каждом из слоев;
- задать ребра, образующие связи между слоями;
- присвоить ребрам и вершинам МСГ MLG набор величин, характеризующих значения параметров соответствующих элементов и связей моделируемой системы.

Из анализа предметной постановки задачи можно выделить следующие уровни (рис. 2) синтезируемой транспортной сети, имеющие наложенный принцип:

- уровень информационных потоков, передаваемых в синтезируемой транспортной сети;
- уровень сети IP/MPLS, определяемый узлами LSR и каналами связи между ними;
- уровень оптической сети, определяемый узлами сети, где установлены оптические кроссконнекторы, и оптическими каналами связи и линиями связи;
- уровень световых путей, описывающий маршруты передачи оптических сигналов и используемые при этом длины волн.

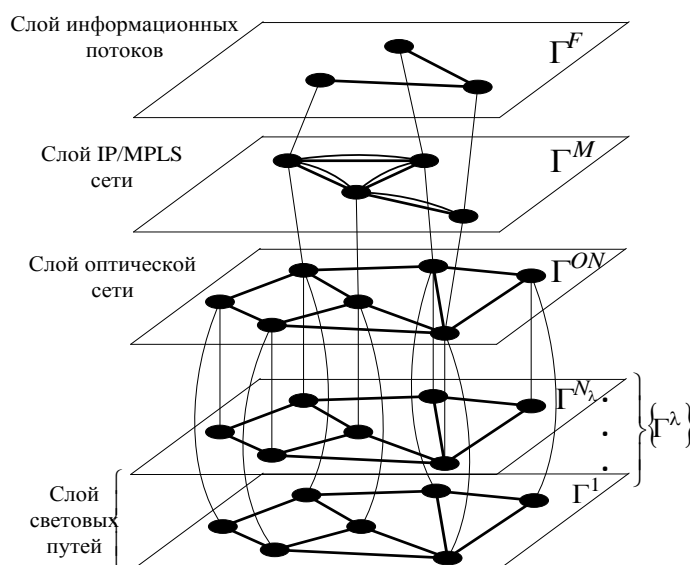


Рис. 2. Многослойный граф, описывающий структуру проектируемой сети

Согласно общей методике структурного синтеза с использование многослойного графа опишем каждый из наложенных уровней графом соответствующего слоя многослойного графа.

Граф верхнего слоя $\Gamma^F = (V^F, E^F)$ описывает потоки, передаваемые между пограничными узлами транспортной сети. Данный граф содержит вершины $V^F = \{v_i^F\}$, соответствующие узлам $z_i^U \in Z^U$, которые являются источниками и получателями:

$$\forall z_i^U \in Z^U \quad \exists v_i^F, v_j^F \in V^F \quad (3)$$

и ребра $E^F = \{e_{ij}^F\}$, соответствующие потокам $\mu_k \in M$, передаваемым через сеть IP/MPLS между парой узлов (z_i^U, z_j^U) :

$$\mu_k \Leftrightarrow e_{ij}^F, \quad \forall \mu_k \in M, e_{ij}^F \in E^F, e_{ij}^F = (v_i^F, v_j^F). \quad (4)$$

Граф слоя $\Gamma^M = (V^M, E^M)$, соответствующий уровню сети IP/MPLS, моделирует структуру наложенной сети. Рассмотрим данный граф подробнее. При описании структуры сети IP/MPLS нам необходимо учесть:

- узлы сети, входящие в ее состав;
- логические каналы связи, используемые в сети для организации передачи информационных потоков между узлами LSR;
- пропускные способности каналов связи (используемые типы интерфейсных плат).

Для учета приведенных выше характеристик предлагается структура графа Γ^M , получаемая в результате выполнения следующих шагов.

1. Для каждого узла $z_i^M \in Z^M$ сети IP/MPLS в состав графа Γ^M вводится вершина:

$$\forall z_i^M \in Z^M \quad \exists v_i^M, v_j^M \in V^M. \quad (5)$$

2. Для каждого канала связи b_{ij}^M , кандидата на использование его в результирующей конфигурации сети, в состав Γ^M вводится два множества направленных дуг $\{\bar{e}_{st,m}^M\}$ и $\{\bar{e}_{ts,m}^M\}$, моделирующих типы интерфейсных плат, использование которых возможно при организации каналов связи между узлами IP/MPLS сети в соответствующем направлении связи:

$$b_{st}^M \Leftrightarrow \{\bar{e}_{st,m}^M, \bar{e}_{ts,m}^M\}, \quad \forall b_{st}^M \in B^M, \forall \xi_m \in \Xi, \quad (6)$$

$$\bar{e}_{st,m}^M = (v_s^M, v_t^M), \bar{e}_{ts,m}^M = (v_t^M, v_s^M), \{\bar{e}_{st,m}^M\} \cup \{\bar{e}_{ts,m}^M\} \subset E^M. \quad (7)$$

Структура графов уровней оптической сети и световых потоков аналогична графам соответствующих уровней задачи, рассмотренной в статье [18] и имеет следующий вид.

Граф слоя $\Gamma^{ON} = (V^{ON}, E^{ON})$ моделирует структуру оптической транспортной сети. Граф содержит вершины $V^{ON} = \{v_i^{ON}\}$, которые соответствуют узлам $z_i \in Z$ оптической сети WDM:

$$\forall z_i \in Z \quad \exists v_i^{ON}, v_i^{ON} \in V^{ON}. \quad (8)$$

Каждому потенциальному каналу связи $b_{ij} \in B$ оптической сети в состав графа вводится ребро e_{ij}^{ON} :

$$b_{ij} \Leftrightarrow e_{ij}^{ON}, \quad \forall b_{ij} \in B, e_{ij}^{ON} \in E^{ON}, e_{ij}^{ON} = (v_i^{ON}, v_j^{ON}). \quad (9)$$

Избыточная структура графа $\Gamma^{ON} = (V^{ON}, E^{ON})$, описывающая избыточную топологию оптической сети, в процессе решения задачи подлежит оптимизации, в результате которого на данном уровне будет найден подграф Γ'^{ON} исходного графа Γ^{ON} .

Уровень световых путей представлен совокупностью графов $\Gamma^{LP} = \{\Gamma^\lambda\}$, где каждый граф Γ^λ моделирует логическую структуру, образуемую световыми путями. Количество графов Γ^λ в совокупности Γ^{LP} равно количеству доступных для передачи потоков длин волн:

$$\forall \lambda \in \Lambda \quad \exists \Gamma^\lambda \in \Gamma^{LP}. \quad (10)$$

Синтез графов $\{\Gamma^\lambda\}$ проведем следующим образом. Для каждой длины волны $\lambda \in \Lambda$ создадим граф Γ^λ . Вершины графа $V^\lambda = \{v_i^\lambda\}$ соответствуют узлам $z_i \in Z$ оптической сети WDM. Ребра $e_{ij}^\lambda = (v_i^\lambda, v_j^\lambda)$ графа Γ^λ соответствуют использованию в соответствующем оптическом канале $b_{ij} \in B$ длины волны $\lambda \in \Lambda$:

$$\forall \lambda \in \Lambda, \forall z_i \in Z \quad \exists v_i^\lambda \in V^\lambda; \quad (11)$$

$$\forall \lambda \in \Lambda, \forall b_{ij} \in B \quad \exists e_{ij}^\lambda \in E^\lambda, e_{ij}^\lambda = (v_i^\lambda, v_j^\lambda); \quad (12)$$

$$v_i^{ON} \Leftrightarrow v_i^\lambda, \quad \forall v_i^{ON} \in V^{ON}, \forall \lambda \in \Lambda; \quad (13)$$

$$e_{ij}^{ON} \Leftrightarrow e_{ij}^\lambda, \quad \forall e_{ij}^{ON} \in E^{ON}, \forall \lambda \in \Lambda, \forall e_{ij}^\lambda \in E^\lambda. \quad (14)$$

На втором этапе необходимо определить множество ребер, образующих связи между слоями многослойного графа.

Между слоем сети IP/MPLS и слоем информационных потоков в состав графа MLG вводятся ребра e_{ij}^{FM} , связывающие вершины v_i^F графа Γ^F слоя информационных потоков, соответствующие источникам и получателям потоков $z_i^U \in Z^U$ с вершинами v_j^M графа Γ^M слоя IP/MPLS сети, соответствующие узлам сети z_j^M , где данные потребители расположены

$$\forall z_j^M \in Z^U, z_i^U \equiv z_j^M \quad \exists e_{ij}^{FM} \in \Gamma', e_{ij}^{FM} = (v_i^F, v_j^M). \quad (15)$$

Между слоем оптической сети и слоем сети IP/MPLS графа MLG вводится связь между вершинами $v_i^M \in V^M$, соответствующими узлам LSR $z_i^M \in Z^M$ с вершинами слоя оптической сети $v_j^{ON} \in V^{ON}$, соответствующими узлам транспортной сети $z_j \in Z$, где данное оборудование устанавливается. Указанная связь между слоями моделирует логическую связь «расположен»:

$$\forall z_i^M \in Z^M \quad \exists e_{ij}^{M,ON} \in \Gamma', e_{ij}^{M,ON} = (v_i^M, v_j^{ON}), z_j \equiv z_i^M. \quad (16)$$

Для обеспечения связи графа Γ^{ON} слоя оптической сети с графами слоя световых путей в состав связывающего графа Γ' для каждой вершины вводится множество ребер $\{e_i^{ON,\lambda}\}$, связывающих соответствующую этому узлу вершину v_i^{ON} графа уровня оптической сети Γ^{ON} и вершины $\{v_i^\lambda\}$ графов $\{\Gamma^\lambda\}$:

$$\forall \lambda \in \Lambda, \forall z_i \in Z \quad \exists e_i^{ON,\lambda} \in \Gamma', e_i^{ON,\lambda} = (v_i^{ON}, v_i^\lambda), \\ v_i^{ON} \in V^{ON}, v_i^\lambda \in V^\lambda. \quad (17)$$

Исходный избыточный многослойный граф MLG получаем в результате объединения описанных выше графов слоев и графа, связывающего слои между собой:

$$MLG = \Gamma^F \cup \Gamma^M \cup \Gamma^{ON} \cup \left(\bigcup_{\lambda} \Gamma^\lambda \right) \cup \Gamma'. \quad (18)$$

На последнем этапе синтеза многослойного графа, описывающего исходную структуру IP/MPLS сети, наложенной поверх сети WDM, ребрам графа присваивается набор величин, характеризующих значения параметров соответствующих элементов и связей моделируемой системы. Такими параметрами, которые необходимо учесть в рамках решаемой задачи структурного и параметрического синтеза, согласно предметной постановке задачи, являются затраты d_{ij} на строительство оптической линии связи между узлами z_i и z_j оптической сети; затраты d_i^O на установку в узле сети оптической сети z_i оборудования оптического кроссконнектора; затраты d_i^M на установку в узле z_i^M IP/MPLS сети оборудования LSR; производительность c_i^M и стоимость d_i^M интерфейсных плат, устанавливаемых в узлах LSR, а также ограничения, накладываемые используемой в оптической сети технологией WDM.

В качестве параметров дугам графа Γ^M слоя IP/MPLS сети присваиваются пропускная способность и его вес.

Пропускная способность $c(\bar{e}_{st,m}^M)$ дуги $\bar{e}_{st,m}^M$ равна производительности c_m^ξ соответствующей интерфейсной платы, с которой эта дуга ассоциирована:

$$c(\bar{e}_{st,m}^M) = c_m^\xi, \quad \forall \bar{e}_{st,m}^M, b_{st}^M \in B^M, \forall \xi_m \in \Xi. \quad (19)$$

В качестве веса $d(\bar{e}_{st,m}^M)$ дуги $\bar{e}_{st,m}^M$ присваивается вес, равный стоимости d_m^ξ использования в узле LSR интерфейсной платы типа ξ_m при организации канала связи между узлами сети IP/MPLS z_s^M и z_t^M :

$$d(\bar{e}_{st,m}^M) = d_m^\xi, \quad \forall \bar{e}_{st,m}^M, b_{st}^M \in B^M, \forall \xi_m \in \Xi. \quad (20)$$

С целью учета затрат на установку оборудования LSR вершинам v_s^M графа Γ^M слоя IP/MPLS сети присваиваются вес, равный затратам d_i^M на установку в узле z_i^M IP/MPLS сети этого оборудования:

$$d(v_s^M) = d_s^M, \quad \forall v_s^M \in V^M, z_s^M \in Z^M. \quad (21)$$

Многослойный граф, описывающий исходную структуру синтезируемой сети, должен учитывать затраты на строительство оптических линий связи и установку оптических кроссконнекторов. Для этого выполним следующие операции.

Ребрам $e_{ij}^{ON} = (v_i^{ON}, v_j^{ON})$ графа Γ^{ON} слоя оптической сети, описывающему исходную избыточную топологию транспортной сети, присваивается вес, равный затратам d_{ij} на строительство оптической линии связи между узлами z_i и z_j :

$$d(e_{ij}^{ON}) = d_{ij}, \quad \forall e_{ij}^{ON} \in E^{ON}, e_{ij}^{ON} = (v_i^{ON}, v_j^{ON}), b_{ij} \in B, \{v_i^{ON}, v_j^{ON}\} \subset V^{ON}. \quad (22)$$

Вершинам v_i^{ON} графа Γ^{ON} слоя оптической сети WDM присваивается вес, равный затратам d_i^O на установку в узле z_i оптической сети оборудования кроссконнектора:

$$d(v_i^{ON}) = d_i^O, \quad \forall v_i^{ON} \in V^{ON}, z_i \in Z. \quad (23)$$

С целью учета ограничения, которое накладывается используемой в оптической транспортной сети технологией WDM на то, что в каждом канале связи на одной и той же длине волны может передавать только один поток, ребрам $e_{ij}^\lambda = (v_i^\lambda, v_j^\lambda)$ графов $\{\Gamma^\lambda\}$ присваивается пропускная способность равная единице:

$$c(e_{ij}^\lambda) = 1, \quad \forall e_{ij}^\lambda, \forall \lambda \in \Lambda. \quad (24)$$

Этим самым мы ограничиваем количество потоков, которые могут протекать по этим ребрам и учитываем указанное выше ограничение.

Остальным ребрам графа, неуказанным выше, присваивается нулевой вес и неограниченная пропускная способность.

Синтезированный многослойный граф MLG используется для решения задачи проектирования сети MPLS с определением:

- мест установки узлов LSR;
- маршрутов передачи потоков в сети IP/MPLS;
- пропускных способностей каналов связи сети IP/MPLS;
- топологии оптической транспортной сети WDM;
- световых путей и привязки длин к ним.

V. Решение задачи с использованием математической модели многослойного графа

Решение указанной задачи сводится к нахождению многослойного подграфа $MLG' \subset MLG$ минимального веса, обеспечивающего пропускание информационных потоков $\lambda_i \in \Lambda$, с учетом требований к структуре многослойного графа и потокам, протекающим по его ребрам, при выполнении ограничений на пропускную способность ребер многослойного графа (17), (22).

Опишем потоковую модель на многослойном графе, используемую при решении задачи.

Синтезируемая транспортная сеть предназначена для передачи потоков между узлами источник-получатель. Для моделирования этого пропустим по ребрам e_{ij}^F графа Γ^F слоя информационных потоков поток γ_k^F от вершины v_i^F к v_j^F величиной равной интенсивности потока μ_k , передаваемого в транспортной сети, которому поток γ_k^F соответствует:

$$\forall \mu_k \in M, z_i^U \equiv z_k^S, z_j^U \equiv z_k^D \quad \exists \gamma_k^F = \gamma(e_{ij}^F) = f_k, e_{ij}^F = (v_i^F, v_j^F). \quad (25)$$

Кроме этого, для каждого потока γ_k^F , протекающего ребрами графа Γ^F , зададим величину всплеска потока μ_k :

$$\gamma^+(\gamma_k^F) = f_k^+, \quad \forall \mu_k \in M. \quad (26)$$

Согласно свойствам многослойного графа, для каждого потока, протекающего ребрами графа Γ^F , должен существовать поток такой же величины, протекающий по ребрам, связывающим слои и вдоль пути, содержащего ребра графа нижележащего слоя Γ^M . При этом должны выполняться ограничения по пропускной способности ребер графа Γ^M .

Сформулируем условия, которым должны отвечать потоки, протекающие ребрами нижележащего графа Γ^M .

Введем обозначения:

- γ_k^M – поток, протекающий ребрами графа Γ^M слоя IP/MPLS сети, который вызван потоком γ_k^F в графе Γ^F вышележащего слоя информационных потоков;

$\Pi^K = \{\pi_i^k\}$ – множество путей в графе Γ^M слоя IP/MPLS сети, используемые для передачи потока γ_k^M ,

$$\pi_i^k = ((v_s^M, v_{j_1}^M), (v_{j_1}^M, v_{j_2}^M), \dots, (v_{j_n}^M, v_d^M)), v_s^M \Leftrightarrow z_s^M, z_s^M \equiv z_k^S, v_d^M \Leftrightarrow z_d^M, z_d^M \equiv z_k^D; \quad (27)$$

x_i^k – переменная, отображающая использование для передачи потока γ_k^M пути π_i^k : $x_i^k = 1$, если для передачи потока γ_k^M используется путь π_i^k , иначе $x_i^k = 0$;

$x_{st,m}^M$ – переменная, отображающая использование для передачи потоков, протекающих в графе Γ^M дуги $\bar{e}_{st,m}^M$: $x_{st,m}^M = 1$, если дуга $\bar{e}_{st,m}^M$ используется для передачи потоков, иначе $x_{st,m}^M = 0$;

c_{st}^+ – величина запаса пропускной способности интерфейсов между узлами (z_s^M, z_t^M) .

Для дуг, связующих смежные вершины v_s^M и v_t^M графа Γ^M , должно выполняться условие, что суммарный поток, протекающий по ним, не должен превышать их пропускную способность. Это условие соответствует условию, что суммарный поток в канале связи не должен превышать его пропускную способность. В этом случае, учитывая используемую при решении данной задачи модель информационного потока, описываемую неравенством (1), приведенное выше условие можно записать следующим образом:

$$\sum_k \sum_{\pi_i^k \in \Pi^k: (v_s^M, v_t^M) \in \pi_i^k} \gamma(\gamma_k^M) \cdot x_i^k + c_{st}^+ \leq \sum_m c(\bar{e}_{st,m}^M) \cdot x_{st,m}^M, \forall (v_s^M, v_t^M), \{v_s^M, v_t^M\} \subset V^M, \{\bar{e}_{st,m}^M\} \subset E^M, \quad (28)$$

$$\gamma^+(\gamma_k^M) \cdot \left(\sum_{\pi_i^k \in \Pi^k: (v_s^M, v_t^M) \in \pi_i^k} x_i^k \right) \leq c_{st}^+, \forall \mu_k \in M, \forall (v_s^M, v_t^M), \{v_s^M, v_t^M\} \subset V^M, \{\bar{e}_{st,m}^M\} \subset E^M. \quad (29)$$

Выражение (28) учитывает, что суммарный поток в дугах между смежными вершинами с учетом запаса пропускной способности не должен превышать их пропускную способность, а выражение (29) задает условие, что величина запаса пропускной способности должна быть не меньше, чем максимальная величина всплеска среди потоков, протекающих по этим дугам.

Для передачи потока γ_k^M в графе Γ^M может использоваться только один путь из допустимого множества путей Π^k :

$$\sum_{\pi_i^k \in \Pi^k} x_i^k = 1, \quad \forall \mu_k \in M. \quad (30)$$

Согласно свойству многослойного графа, для каждой дуги в графе Γ^M должен существовать путь, проходящий через нижележащий граф Γ^{ON} слоя оптической сети. Потоки, протекающие по дуге Γ^M , вызывают протекание потока вдоль пути в нижележащем графе Γ^{ON} .

Единицей передаваемого потока в оптической сети является световой поток. Каждому каналу связи (логической связи) в наложенной IP/MPLS сети соответствует

световой поток в оптической сети. Таким образом, при синтезе потоковой модели на многослойном графе, каждой дуге графа Γ^M соответствует поток в графе Γ^{ON} , величина которого равна единице, если по дуге протекает поток, отличный от нуля и нулю — в противном случае:

$$\vec{e}_{st,m}^M \Leftrightarrow \gamma_\beta^{ON}, \quad \forall \vec{e}_{st,m}^M \in E^M; \quad (31)$$

$$\gamma(\gamma_\beta^{ON}) = x_{st,m}^M, \quad \forall \vec{e}_{st,m}^M \in E^M. \quad (32)$$

При описании потоков в графе Γ^{ON} слоя оптической сети воспользуемся многопродуктовой потоковой моделью. Для этого введем обозначения:

$x_{ij\beta}^{ON}$ — величина потока β -го продукта, протекающего по ребру $e_{ij}^{ON} = (v_i^{ON}, v_j^{ON})$ графа слоя оптической сети Γ^{ON} ;

y_{ij}^{ON} — переменная, отображающая, входит ли ребро $e_{ij}^{ON} = (v_i^{ON}, v_j^{ON})$ в состав результирующего многослойного графа.

В этом случае для потоков слоя оптической сети должно выполняться условие сохранения потоков в вершинах графа, которое можно записать как:

$$\sum_j x_{ij\beta}^{ON} = \begin{cases} x_{st,m}^M, & z_i \equiv z_s^M \\ 0, & z_i \in Z \setminus \{z_s^M, z_t^M\}; \\ -x_{st,m}^M, & z_i \equiv z_t^M \end{cases} \quad \forall \gamma_\beta^{ON}. \quad (33)$$

Поток может протекать по ребру $e_{ij}^{ON} = (v_i^{ON}, v_j^{ON})$ только в том случае, если оно входит в состав графа:

$$\sum_\beta x_{ij\beta}^{ON} \leq K y_{ij}^{ON}, \quad \forall e_{ij}^{ON} \in E^{ON}, K = |\{\gamma_\beta^{ON}\}|. \quad (34)$$

Потоки, протекающие в графе Γ^{ON} , вызывают потоки, протекающие вдоль путей, проходящих в графах $\{\Gamma^\lambda\}$ нижележащего слоя световых путей. При описании потоков в графах $\{\Gamma^\lambda\}$ и ребрах, связывающих граф Γ^{ON} и графы $\{\Gamma^\lambda\}$, введем обозначения:

$x_{i\beta}^{ON,\lambda}$ — величина потока β -го продукта, протекающего по ребру $e_i^{ON,\lambda} = (v_i^{ON}, v_i^\lambda)$, связывающему вершину v_i^{ON} графа слоя оптической сети Γ^{ON} с вершиной v_i^λ графа слоя световых путей Γ^λ ;

x_{ij}^λ — величина потока β -го продукта, протекающего по ребру $e_{ij}^\lambda = (v_i^\lambda, v_j^\lambda)$ графа слоя световых путей Γ^λ .

Тогда для потоков, протекающих ребрами графов $\{\Gamma^\lambda\}$ слоя световых путей, условие сохранения потоков в вершинах графа можно записать следующим образом:

$$\sum_j x_{ij}^\lambda = x_{i\beta}^{ON,\lambda}, \quad \forall \lambda \in \Lambda, \forall \gamma_b^{ON}, \quad (35)$$

Кроме условия сохранения потоков в вершине (29) для потоков, протекающих ребрами графов $\{\Gamma^\lambda\}$, должно выполняться ограничение на пропускную способность ребер:

$$\sum_{\beta} x_{ij\beta}^\lambda \leq c(e_{ij}^\lambda), \quad \forall e_{ij}^\lambda \in E^\lambda, \forall \lambda \in \Lambda. \quad (36)$$

А также условие, что потоку, протекающему по ребру графа Γ^{ON} слоя оптической сети, должен соответствовать поток в слое световых путей:

$$\sum_{\lambda} x_{ij\beta}^\lambda = x_{ij\beta}^{ON}, \quad \forall e_{ij}^{ON} \in E^{ON}, \forall \gamma_{\beta}^{ON}. \quad (37)$$

Для потоков, протекающих ребрами графа Γ' , связывающих граф Γ^{ON} слоя оптической сети с графами слоя световых путей, должны выполняться следующие условия

$$x_{i\beta}^{ON,\lambda} = \begin{cases} x_{st,m}^M, & z_i \equiv z_s^M \\ 0, & z_i \in Z \setminus \{z_s^M, z_t^M\}; \\ -x_{st,m}^M, & z_i \equiv z_t^M \end{cases} \quad \forall \lambda \in \Lambda, \forall \gamma_{\beta}^{ON}. \quad (38)$$

Решение задачи можно свести, как указывалось ранее, к нахождению структуры многослойного подграфа минимального веса и распределения потока в нем, так что выполнялось ограничения накладываемой потоковой моделью (28) – (38). Запишем выражение, которое позволяет определить вес многослойного подграфа, где $\Gamma'^F = (V'^F, E'^F)$, $\Gamma'^M = (V'^M, E'^M)$, $\Gamma'^{ON} = (V'^{ON}, E'^{ON})$, $\Gamma'^\lambda = (V'^\lambda, E'^\lambda)$, – подграфы соответствующих графов слоев исходного многослойного графа MLG :

$$\begin{aligned} & \sum_{\vec{e}_{st,m}^M \in E'^M} d(\vec{e}_{st,m}^M) + \sum_{v_s^M \in V'^M} d(v_s^M) + \sum_{e_{ij}^{ON} \in E'^{ON}} d(e_{ij}^{ON}) + \sum_{v_i^{ON} \in V'^{ON}} d(v_i^{ON}) = \\ & = \sum_{\vec{e}_{st,m}^M \in E'^M} d_m^{\vec{e}} + \sum_{v_s^M \in V'^M} d_s^M + \sum_{e_{ij}^{ON} \in E'^{ON}} d_{ij} + \sum_{v_i^{ON} \in V'^{ON}} d_i^O. \end{aligned} \quad (39)$$

Для решения задачи синтеза структуры многослойного подграфа и распределения потоков в нем сформулируем ее как задачу целочисленного линейного программирования. Введем обозначения:

y_s^M – переменная, отображающая входит ли в состав результирующего многослойного графа Γ'^M вершина v_s^M : $y_s^M = 1$, $v_s^M \in \Gamma'^M$, иначе $y_s^M = 0$;

y_i^{ON} – переменная, отображающая входит ли в состав результирующего многослойного графа Γ'^{ON} вершина v_i^{ON} : $y_i^{ON} = 1$, $v_i^{ON} \in \Gamma'^{ON}$, иначе $y_i^{ON} = 0$.

Таким образом, задачу целочисленного линейного программирования можно записать в следующей формулировке.

Целевая функция:

$$\sum_{\bar{e}_{st,m}^M \in E^M} d_m^{\xi} x_{st,m}^M + \sum_{v_s^M \in V^M} d_s^M y_s^M + \sum_{e_{ij}^{ON} \in E^{ON}} d_{ij} y_{ij}^{ON} + \sum_{v_i^{ON} \in V^{ON}} d_i^O y_i^{ON} \rightarrow \min. \quad (40)$$

Ограничения:

$$\sum_k \left[\sum_{\pi_i^k \in \Pi^k: (v_s^M, v_t^M) \in \pi_i^k} \gamma(\gamma_k^M) \cdot x_i^k \right] + c_{st}^+ \leq \sum_m c(\bar{e}_{st,m}^M) \cdot x_{st,m}^M, \\ \forall (v_s^M, v_t^M), \{v_s^M, v_t^M\} \subset V^M, \{\bar{e}_{st,m}^M\} \subset E^M; \quad (41)$$

$$\gamma^+(\gamma_k^M) \cdot \left[\sum_{\pi_i^k \in \Pi^k: (v_s^M, v_t^M) \in \pi_i^k} x_i^k \right] \leq c_{st}^+, \quad \forall \mu_m \in M, \\ \forall (v_s^M, v_t^M), \{v_s^M, v_t^M\} \subset V^M, \{\bar{e}_{st,m}^M\} \subset E^M; \quad (42)$$

$$\sum_{\pi_i^k \in \Pi^k} x_i^k = 1, \quad \forall \mu_k \in M; \quad (43)$$

$$\sum_j x_{ij\beta}^{ON} = \begin{cases} x_{st,m}^M, & z_i \equiv z_s^M \\ 0, & z_i \in Z \setminus \{z_s^M, z_t^M\}; \quad \forall \gamma_\beta^{ON}; \\ -x_{st,m}^M, & z_i \equiv z_t^M, \end{cases} \quad (44)$$

$$\sum_\beta x_{ij\beta}^{ON} \leq K y_{ij}^{ON}, \quad \forall e_{ij}^{ON} \in E^{ON}, K = |\{\gamma_\beta^{ON}\}|; \quad (45)$$

$$\sum_j x_{ij\beta}^\lambda = x_{i\beta}^{ON,\lambda}, \quad \forall \lambda \in \Lambda, \forall \gamma_b^{ON}; \quad (46)$$

$$\sum_\beta x_{ij\beta}^\lambda \leq c(e_{ij}^\lambda), \quad \forall e_{ij}^\lambda \in E^\lambda, \forall \lambda \in \Lambda; \quad (47)$$

$$\sum_\lambda x_{ij\beta}^\lambda = x_{ij\beta}^{ON}, \quad \forall e_{ij}^{ON} \in E^{ON}, \forall \gamma_\beta^{ON}; \quad (48)$$

$$x_{i\beta}^{ON,\lambda} = \begin{cases} x_{st,m}^M, & z_i \equiv z_s^M \\ 0, & z_i \in Z \setminus \{z_s^M, z_t^M\}; \quad \forall \lambda \in \Lambda, \forall \gamma_\beta^{ON}; \\ -x_{st,m}^M, & z_i \equiv z_t^M, \end{cases} \quad (49)$$

$$\sum_m \sum_t x_{st,m}^M + \sum_m \sum_t x_{ts,m}^M \leq K' y_s^M, \quad \forall v_s^M \in V^M, K' = |E^M|; \quad (50)$$

$$\sum_j y_{ij}^{ON} \leq K'' y_i^{ON}, \quad \forall v_i^{ON} \in V^{ON}, K'' = |E^{ON}|. \quad (51)$$

В дальнейшем сформулированная задача, (41)–(51), решается с применением программного пакета решения оптимизационных задач, например, CPLEX v.12.

VI. Исследование эффективности предложенного метода синтеза

Экспериментальное исследование метода структурного и параметрического синтеза наложенной сети IP/MPLS поверх сети WDM заключается в сравнительном

анализе предложенного в работе метода решения задачи, который базируется на применении многослойного графа, с методом, который предусматривает последовательный синтез топологий сетей на каждом из ее уровней, определения мест установки узлов LSR и решения задач выбора световых путей и привязки длин волн.

При применении альтернативного метода (без учета многослойной структуры синтезируемой сети) суть решаемой задачи сводилась к задаче оптимального распределения потока, который обеспечивал бы минимальное количество используемых оптических каналов связи. Критерием оптимальности в обеих задачах выступала стоимостная функция с одинаковыми значениями, входящих в нее удельных параметров.

Результаты экспериментального исследования представим в виде графика относительного выигрыша по стоимостному показателю результирующей структуры сети (рис. 3).

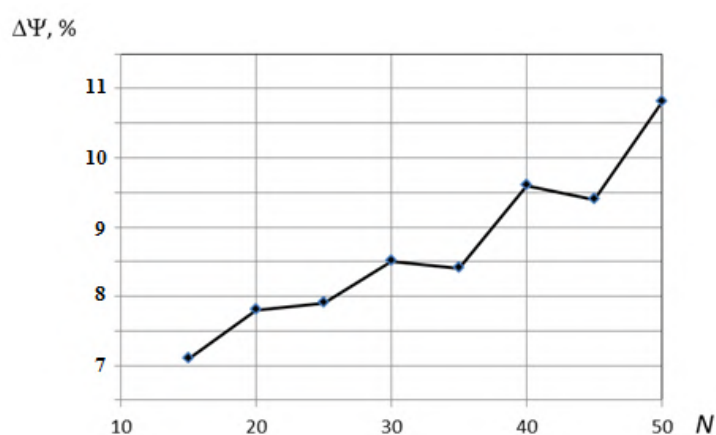


Рис. 3. График зависимости относительного выигрыша от применения, предложенного в работе метода синтеза наложенной IP/MPLS сети

Анализ приведенных результатов показал, что использование метода, базирующегося на применении многослойного графа, позволяет получить структуру сети, которая по своим стоимостным показателям меньше стоимости структуры, полученной альтернативным методом в среднем на 7 – 11 %.

Выигрыш по стоимости объясняется тем, что при выборе мест установки оборудования LSR в узлах сети не учитывались световые пути и возникающие внутренние блокировки. Это привело к необходимости использования большего количества LSR и оптических линий связи, затраты на которые не удастся скомпенсировать за счет передачи по каналам WDM сети группового потока. Объединение индивидуальных потоков между каждой из пар взаимодействующих LSR позволяет уменьшить количество выделяемых каналов в опорной сети и может способствовать уменьшению затрат на развертывание сети.

Использование многослойного графа при решении данной задачи позволяет комплексно подойти к выбору мест установки LSR, обеспечивающих группирование и перегруппирование потоков, передаваемых между абонентами сети и задачи вы-

бора маршрутов передачи групповых потоков в опорной сети так, чтобы минимизировать затраты на развертывание сети.

Выводы

При синтезе IP/MPLS сети, наложенной поверх оптической сети WDM, необходимо учитывать процессы, протекающие на различных ее уровнях и определять топологии каждой из ее сетей. Для решения этой задачи можно использовать модель в виде многослойного графа, которая позволяет адекватно описать структуру проектируемой сети, учесть взаимосвязь процессов на разных ее уровнях и представить проектируемую телекоммуникационную сеть как единый целостный объект.

При описании IP/MPLS сети, наложенной поверх оптической сети WDM, многослойный граф должен содержать следующие слои: слой информационных потоков, слой IP/MPLS сети, слой оптической сети, слой световых путей.

За счет синтеза потоковой модели на многослойном графе решаемую задачу можно свести к задаче нахождения многослойного подграфа минимальной стоимости и распределения потоков в нем, обеспечивающего выполнение ограничений, накладываемых потоковой моделью. Данная задача, в свою очередь, может быть сведена к задаче смешанного линейного программирования и может быть решена стандартными математическими пакетами.

По результатам сравнительного анализа метода структурно-параметрического синтеза IP/MPLS сети, наложенной поверх сети WDM, оптимальной согласно критерию минимума стоимости установлено, что применение предложенного метода позволяет получить структуру сети на 7 – 11 % меньшей стоимостью в сравнении с методами, базирующимися на последовательном проектировании каждого уровня.

Разработанная методика рекомендуется для использования в проектных организациях, на этапах проектирования вновь строящихся или реконструируемых телекоммуникационных систем с числом узлов до нескольких десятков.

Список литературы:

1. Gerstel O., Ramaswami R. Optical layer survivability: a services perspective // IEEE Communications magazine. – 2000. – Vol. 38, № 3. – P. 104–113.
2. Sahasrabudde L., Ramaswami R., Mukherjee B. Fault Management in IP-Over-WDM Networks: WDM Protection Versus IP Restoration // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2002. – Vol. 20, Issue 1. – P. 21–33.
3. Haider M., Mazurek M., Dymora P. Designing of multichannel optical communication systems topologies criteria optimization // Informatica. – 2003. – Vol. 1. – P. 277–284.
4. Хайдер М. Эффективный метод проектирования и реконфигурации вычислительной системы с многоканальными связями // Проблемы програмування. – 2006. – № 2–3. – P. 701–707.
5. Knippel A., Lardeux B. The Multi-Layered Network Design Problem // European Journal of Operational Research. – 2007. – Vol. 138, Issue 1. – P. 87–99.
6. Guolong Zhu, Qingji Zeng, Tong Ye, Junjie Yang Joint network design in multilayer networks // Proceedings of SPIE. – 2003. – Vol. 5282. – P. 460–469.

7. Dahl G., Martin A., Stoer M. Routing through Virtual Paths in Layered Telecommunication Networks // Operations Research. – 1999. – № 47. – P. 693 – 702.
8. Belotti P., Capone A., Carello G., Malucelli F., Senaldi F., Totaro A. MPLS over Transport Network: Two Layers Approach to Network Design with Statistical Multiplexing // Conference on Next Generation Internet Design and Engineering (NGI 2006). – Valencia, 2006. – P. 308–318.
9. De Maesschalck S., Pickavet M. Multi-layer traffic grooming in networks with an IP/MPLS layer on top of a meshed optical layer // Global Telecommunications Conference, GLOBECOM '03. – Washington: IEEE, 2003. – P. 2750–2754.
10. Gouveia L., Patricio P., de Sousa A.F., Valadas R. MPLS over WDM Network Design with Packet Level QoS Constraints based on ILP Models // IEEE INFOCOM. – 2003. – Vol. 1. – P. 576–586.
11. Chen S., Gunluk O., Yener B. The multicast packing problem // IEEE/ACM Trans. on Networking. – 2000. – Vol. 8, Issue 3. – P. 311–318.
12. Charikar M., Naor J., Schieber B. Resource optimization in QoS multicast routing of real-time multimedia // IEEE INFOCOM. – 2000. – Vol. 12, Issue 2. – P. 1518–1527.
13. Saad M., Luo Z-Q. On the Routing and Wavelength Assignment in Multifiber WDM Networks // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2004. – Vol. 22, № 9. – P. 1708–1717.
14. Агеев Д.В. Проектирование современных телекоммуникационных систем с использованием многоуровневых графов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – № 4. – С. 75–77.
15. Агеев Д.В. Моделирование современных телекоммуникационных систем многослойными графами [Электронный ресурс] // Проблемы телекоммуникаций. – 2010. – № 1(1) – С. 23–34. – Режим доступа: http://pt.journal.kh.ua/2010/1/1/101_ageyev_simulation.pdf.
16. Агеев Д.В. Методика описания структуры современных телекоммуникационных систем с использованием многослойных графов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – № 6. – С. 56–59.
17. Capone A., Carello G., Matera R. Multi-Layer Network Design with Multicast Traffic and Statistical Multiplexing // Global Telecommunications Conference, GLOBECOM '07, 26-30 Nov. 2007. – Washington: IEEE, 2007. – P. 2565–2570.
18. Агеев Д.В. Структурный синтез сети WDM с оптическими конвертерами с применением модели, представленной в виде многослойного графа / Д.В. Агеев, Хайдара Абдалла [Электронный ресурс] // Проблемы телекоммуникаций. – 2012. – № 2 (7). – С. 3 – 17. – Режим доступа: http://pt.journal.kh.ua/2012/2/1/122_ageyev_mlg.pdf.