

КООРДИНАЦИОННЫЙ МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ МНОГОУРОВНЕВОЙ ТРАНСПОРТНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СЕТИ ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ

По различным оценкам на долю сектора информационных и телекоммуникационных технологий (Information and Communication Technology, ICT), включая абонентские и магистральные сети, вычислительные- и дата-центры и прочее, приходится от 1 до 5,7 % от объемов электроэнергии, потребляемой во всем мире, что обуславливает до 4 % общего выброса в атмосферу так называемых парниковых газов [1 – 3]. С ростом числа абонентов, количества услуг и объемов передаваемого трафика эта цифра увеличивается приблизительно на 10 % в год при том, что суммарный рост потребления электроэнергии составляет около 3 % [3]. В таких условиях, с точки зрения экономической эффективности и сбережения окружающей среды, при проектировании новых и модернизации существующих телекоммуникационных сетей на первый план выходит критерий, связанный с уменьшением энергопотребления. Этот критерий определяет оптические телекоммуникационные технологии как наиболее перспективные. Например, использование технологий GPON (Gigabit Passive Optical Network) на уровне доступа сопряжено с потреблением 0,2 – 0,8 Вт на одного абонента при обеспечиваемых скоростях доступа 32 – 64 Мбит/с [2].

На уровне магистральных сетей одним из наиболее эффективных по критерию энергопотребления решений является прозрачная (transparent) архитектура IP-over-WDM с установлением прямых световых путей между IP-маршрутизаторами отправителя и получателя адресатами на оптическом уровне, без задействования транзитных маршрутизаторов (optical bypass) (рис. 1). Как показано в [2], поскольку на маршрутизаторы приходится около 80 % от общего энергопотребления сетью, построение прямых световых путей между определенными парами IP-маршрутизаторов в обход других позволяет экономить до 50 % электроэнергии.

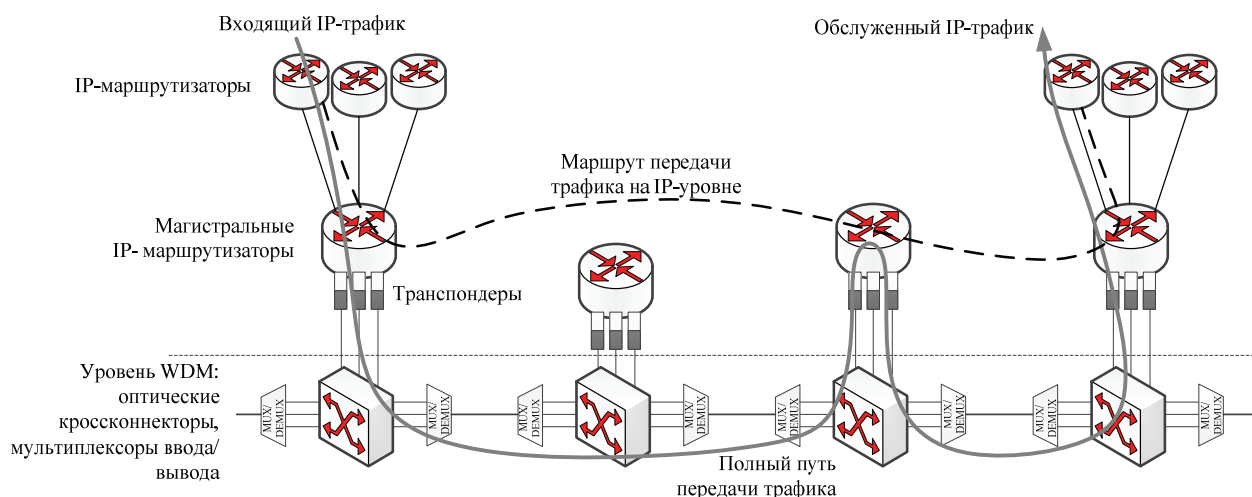


Рис. 1

Реализация такого подхода предполагает согласованное решение задач маршрутизации на уровне IP-сети (традиционная задача пакетной маршрутизации) и на уровне оптической сети (задача построения световых путей и распределения оптических несущих между ними). При этом как синтезируемая совокупность световых путей, образующая доступную на IP-уровне виртуальную топологию, так и методы распределения ресурсов этой виртуальной топологии между поступающими на обслуживание потоками IP-пакетов должны быть опти-

мальными и отвечать динамике поступления трафика в сеть. Как показывает анализ, представленные в литературе подходы к решению перечисленных задач либо носят эвристический характер, как, например, в [3, 4], либо формулируют задачу рекофигурирования виртуальной топологии и маршрутизации в ней как задачу целочисленного или смешанного линейного программирования, представленную в виде совокупности линейных алгебраических уравнений без учета динамики протекающих в сети процессов [5 – 7]. Более того, как правило, поверх одной оптической сети, принадлежащей крупному оператору, функционируют несколько наложенных IP-сетей, что, в свою очередь, ввиду ограниченного объема оптических ресурсов предполагает совместное (согласованное) формирование виртуальных топологий для каждой из них. Таким образом, в рамках задачи построения энергоэффективных транспортных сетей востребованным являются методы динамического согласованного управления разными типами сетевых ресурсами (на оптическом уровне и IP-уровне) в условиях множества IP-сетей, функционирующих на основе единой оптической инфраструктуры.

Динамический характер управления ресурсами транспортной оптической сети может быть обеспечен за счет использования в его основе модели, представленной совокупностью разностных уравнений состояния вида [8]:

$$x_{i,j}^h(k+1) = x_{i,j}^h(k) - \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq i}}^{N_h^r} b_{i,l}^h(k) \cdot \Delta t \cdot u_{i,l}^{h,j}(k) + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq i,j}}^{N_h^r} b_{m,i}^h(k) \cdot \Delta t \cdot u_{m,i}^{h,j}(k) + y_{i,j}^h(k), \quad (1)$$

где $i, j = 1, N_h^r$, $i \neq j$; $\Delta t = t(k+1) - t(k)$; $h = 1, N^v$; $x_{i,j}^h(k)$ – переменная состояния, указывающая на объем данных, которые находятся на i -м маршрутизаторе R_i^h , принадлежащем h -й IP-сети и предназначены для передачи j -му маршрутизатору R_j^h в рамках этой же сети в момент времени t_k ; $u_{i,l}^{h,j}(k)$ – управляющая переменная IP-уровня, которая определяет порядок маршрутизации IP-поток и указывает на долю пропускной способности канала (i,l) в h -й топологии, выделяемую в момент времени t_k для передачи потока с адресом R_j^h ; $b_{i,j}^h(k)$ – пропускная способность прямого тракта передачи (i,j) между маршрутизаторами R_i^h и R_j^h в h -й виртуальной топологии; $y_{i,j}^h(k) = \zeta_{i,j}^h(k) \Delta t$ – объем нагрузки, поступающей в момент времени t_k на маршрутизатор R_i^h и предназначенной для передачи маршрутизатору R_j^h ; $\zeta_{i,j}^h(k)$ – интенсивность поступления нагрузки, которая определяется как суммарная интенсивность потоков абонентов, подключенных к маршрутизатору R_i^h , с адресом получателя, находящимся в подсети маршрутизатора R_j^h ; N_h^r – количество маршрутизаторов в h -й IP-сети; N^v – количество IP-сетей, совместно функционирующих поверх общей оптической инфраструктуры.

Переменные состояния и управления в силу вкладываемого в них физического смысла и ограниченности буферных и канальных ресурсов h -й IP-сети (виртуальной топологии) должны удовлетворять условиям:

$$0 \leq x_{i,j}^h(k), \quad \sum_{\substack{j=1, \\ j \neq i}}^{N_h^r} x_{i,j}^h(k) \leq x_i^{h \max}, \quad (2)$$

$$0 \leq u_{i,j}^{h,j}(k) \leq 1, \quad \sum_{n=1}^{N_h^r} u_{i,j}^{h,n}(k) \leq 1, \quad (3)$$

где $x_i^{h \max}$ – объем буфера на маршрутизаторе R_i^h .

В состав уравнений состояния (1) входят переменные $\{b_{i,j}^h(k)\}$, которые в отличие от традиционной интерпретации модели в пространстве состояний являются неизвестными и подлежат расчету наряду с маршрутными переменными $\{u_{i,j}^{h,j}(k)\}$. Физически величины отражают синтезированные на оптическом уровне световые пути, которые и формируют топологию h -й IP-сети. Таким образом, с одной стороны согласно выражению (1) количественные значения переменных $\{b_{i,j}^h(k)\}$ обусловлены поступающей в сеть нагрузкой $\{y_{i,j}^h(k)\}$ и порядком ее маршрутизации, задаваемым в виде $\{u_{i,j}^{h,j}(k)\}$, а с другой – ограничены ресурсами нижележащей оптической сети, которые должны быть распределены между различными световыми путями в рамках несколькими IP-сетей в соответствии с принятой моделью распределения ресурсов, среди которых одной из наиболее эффективных является модель «русской матрешки» (Russian Dolls Model, RDM).

Модель RDM была описана в RFC 4127 применительно к распределению пропускной способности тракта передачи между потоками разноприоритетных классов обслуживаемая в рамках архитектуры Diffserv-aware MPLS Traffic Engineering. Идея заключается в том, что при отсутствии запросов с высоким уровнем приоритета ресурсы могут быть распределены для обслуживания низкоприоритетных запросов, но при этом высокоприоритетные запросы могут «вытеснять» низкоприоритетные в рамках определенных границ (рис. 2).

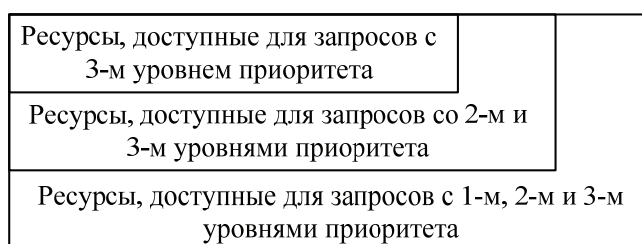


Рис. 2

Реализация идеи RDM при распределении ресурсов оптической сети в целях создания совокупности виртуальных топологий предполагает введение системы приоритетов $d = 1, N^{Pr}$ и пороговых значений $N_{pr=d}^w$, определяющих максимальное количество оптических несущих, которые могут быть выделены в рамках одного оптического тракта для организации виртуальных топологий с приоритетом d и выше.

Тогда распределение оптических несущих должно подчиняться условиям:

$$\sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^N \sum_{l=1}^{N_{m,n}^w} c^{l,m,n} w_{i,j,h}^{l,m,n}(k) - \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq m}}^N \sum_{l=1}^{N_{r,m}^w} c^{l,r,m} w_{i,j,h}^{l,r,m}(k) = \begin{cases} f_{i,j}^h(k), & \text{если } m = i; \\ 0, & \text{если } m \neq i, j; \\ -f_{i,j}^h(k), & \text{если } m = j, \end{cases} \quad (4)$$

$$\sum_{h=1}^{N^v} \sum_{i=1}^{N_h^r} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_h^r} w_{i,j,h}^{l,m,n}(k) \leq 1, \quad (5)$$

$$\sum_{h=1}^{N^v} \sum_{i=1}^{N_h^r} \sum_{j=1, j \neq i}^{N_h^r} \sum_{l=1}^{N_{m,n}^w} \delta_{h,d} w_{i,j,h}^{l,m,n}(k) \leq N_{pr=d}^w - \sum_{d'=d+1}^{N^{pr}} \sum_{h=1}^{N^v} \sum_{i=1}^{N_h^r} \sum_{j=1, j \neq i}^{N_h^r} \sum_{l=1}^{N_{m,n}^w} \delta_{h,d'} w_{i,j,h}^{l,m,n}(k), \quad (6)$$

$$f_{i,j}^h(k) \geq b_{i,j}^{h req}(k), \quad (7)$$

где $w_{i,j}^{l,m,n}(k)$ – булева переменная, принимающая единичное значение, если на k -м временном интервале управления предполагается использование l -й несущей в оптическом тракте (m,n) для создания светового пути между маршрутизаторами R_i^h и R_j^h в h -й виртуальной топологии; $c^{l,m,n}$ – пропускная способность l -й оптической несущей в тракте передачи (m,n) ; $\delta_{h,d} = 1$, если h -я виртуальная топология обладает приоритетом d , и $\delta_{h,d} = 0$ в противном случае; N^{pr} – число уровней приоритетов; N – число мультиплексов в оптической сети; $f_{i,j}^h(k)$ – пропускная способность формируемого светового пути (i,j) ; $b_{i,j}^{h req}$ – требуемая пропускная способность светового пути (i,j) в h -й виртуальной топологии.

В качестве целевой функции для расчета переменных $\{u_{i,l}^{h,j}(k)\}$, $\{b_{i,j}^h(k)\}$ и $\{w_{i,j,h}^{l,m,n}(k)\}$ в рамках модели (1) – (7) в соответствии с отмеченными выше тенденциями выступает минимум суммарной потребляемой электроэнергии [7]:

$$\sum_{h=1}^{N^v} K_h^{pr} P_{\Sigma}^h(k) \rightarrow \min, \quad (8)$$

$$P_{\Sigma}^h(k) = P_{IP}^h(k) + P_{tr}^h(k) + P_o^h(k) + P_{am}^h(k) = P_{IP}^h(k) + P_{opt}^h(k), \quad (9)$$

$$P_{IP}^h(k) = E_{IP} \sum_{j=1}^{N_h^r} \sum_{i=1, i \neq j}^{N_h^r} \left[\sum_{l=1}^{N_h^r} b_{i,l}^h(k) \cdot \Delta t \cdot u_{i,l}^{h,j}(k) + \sum_{m=1}^{N_h^r} b_{m,i}^h(k) \cdot \Delta t \cdot u_{m,i}^{h,j}(k) + y_{i,j}^h(k) \right], \quad (10)$$

$$P_{tr}^h(k) = 2E_{tr} \sum_{i=1}^{N_h^r} \sum_{j, j \neq i}^{N_h^r} V_{i,j}^h(k), \quad (11)$$

$$P_o^h(k) = E_o \sum_{i=1}^{N^r} \sum_{j, j \neq i}^{N^r} \left(V_{ij}^h + \sum_{m, n, n \neq m}^N \sum_{l}^{N_{m,q}^w} w_{i,j,h}^{l,m,n}(k) \right), \quad (12)$$

$$P_{am}^h(k) = E_{am} \sum_{m, n, n \neq m}^N \sum_{n} A_{m,n} \alpha_{m,n,h}^F N_{m,n}^F, \quad (13)$$

где $P_{tr}^h(k)$, $P_{IP}^h(k)$, $P_o^h(k)$, $P_{am}^h(k)$ – мощность, потребляемая транспондерами, IP-маршрутизаторами, оптическими элементами сети и линейными усилителями соответственно на протяжении k -го интервала управления в рамках h -й виртуальной топологии;

K_h^{pr} – административно назначаемые весовые коэффициенты, связанные с приоритетами различных виртуальных топологий; $V_{i,j}^h(k)$ – количество световых путей, установленных между маршрутизаторами R_i^h и R_j^h в k -й момент времени; E_{tr} , E_{IP} , E_o , E_{am} – номинальное энергопотребление оптического транспондера, маршрутизатора, оптического кросс-коннектора и усилителя соответственно; $N_{m,n}^F$ – количество волокон в тракте передачи (m,n) на уровне оптической сети; $A_{m,n}$ – количество усилителей в оптическом тракте передачи (m,n) протяженностью $L_{m,n}$, $A_{m,n} = \lceil L_{m,n}/L - 1 \rceil + 2$; $\lceil \bullet \rceil$ – операция округления в сторону ближайшего большего целого; L – номинальная длина оптического усилительного участка; $\alpha_{m,n,h}^F$ – коэффициент, равный 1, если тракт передачи (m,n) задействован при создании h -й виртуальной топологии, и равный 0 в противном случае.

Таким образом, модель (1) – (13) обеспечивает оптимизационную постановку задачи распределения ресурсов многоуровневой транспортной оптической сети по критерию минимума энергопотребления, решение которой предполагает расчет взаимосвязанных переменных $\{u_{i,l}^{h,j}(k)\}$, $\{b_{i,j}^h(k)\}$ и $\{w_{i,j,h}^{l,m,n}(k)\}$. В силу нелинейного характера задачи и физического смысла отдельных подзадач целесообразным является декомпозиционный подход к ее решению.

В качестве основных подзадач, решаемых в рамках модели (1) – (13), можно выделить: управление ресурсами h -й IP-сети в условиях известной ее топологии, что формализовано посредством переменных $\{u_{i,l}^{h,j}(k)\}$; формирования требований к h -й виртуальной топологии, что связано с пересчетом переменных $\{b_{i,j}^h(k)\}$; установления световых путей и распределения оптических несущих путем расчета переменных $\{w_{i,j,h}^{l,m,n}(k)\}$.

Тогда имеем следующую вычислительную структуру метода управления ресурсами многоуровневой транспортной оптической сети (рис. 3). В рамках каждой наложенной h -й IP-сети решается задача внутренней маршрутизации, где объемы поступающего в сеть трафика и структура доступных трактов передачи предполагается известными. Задача формализуется как оптимизационная, связанная с минимизацией $P_{\Sigma}^h(k)$ по переменным $\{u_{i,l}^{h,j}(k)\}$ при ограничениях (1) – (3) и известных переменных $\{b_{i,j}^{*h}(k)\}$ и $\{y_{i,j}^{*h}(k)\}$. Параллельно с задачей внутренней маршрутизации обеспечивается контроль соответствия текущей топологии объемам и структуре поступающего трафика. Это осуществляется путем расчета переменных $\{b_{i,j}^h(k)\}$ в соответствии с критерием $P_{IP}^h(k) \rightarrow \min$ на основании модели (1) – (3).

С целью формирования требований к h -й виртуальной топологии уравнение состояния соответствующей h -й IP-сети может быть представлено в виде [9]:

$$x_{i,j}^h(k+1) = x_{i,j}^h(k) - \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq i}}^{N_h^r} \varphi_{i,l}^{h,j}(k) \cdot \Delta t + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq i,j}}^{N_h^r} \varphi_{m,i}^{h,j}(k) \cdot \Delta t + y_{i,j}^{h\langle req \rangle}(k), \quad (14)$$

где $\varphi_{i,l}^{h,j}(k) = b_{i,l}^h(k) \cdot u_{i,l}^{h,j}(k)$ – интенсивность потока, адресованного маршрутизатору R_j^h и передаваемого на k -м временном интервале от R_i^h к R_l^h ; $\{y_{i,j}^{h\langle req \rangle}(k)\}$ – требования к объему

мам передаваемого трафика с учетом запаса на обеспечение требуемых показателей качества обслуживания [9].

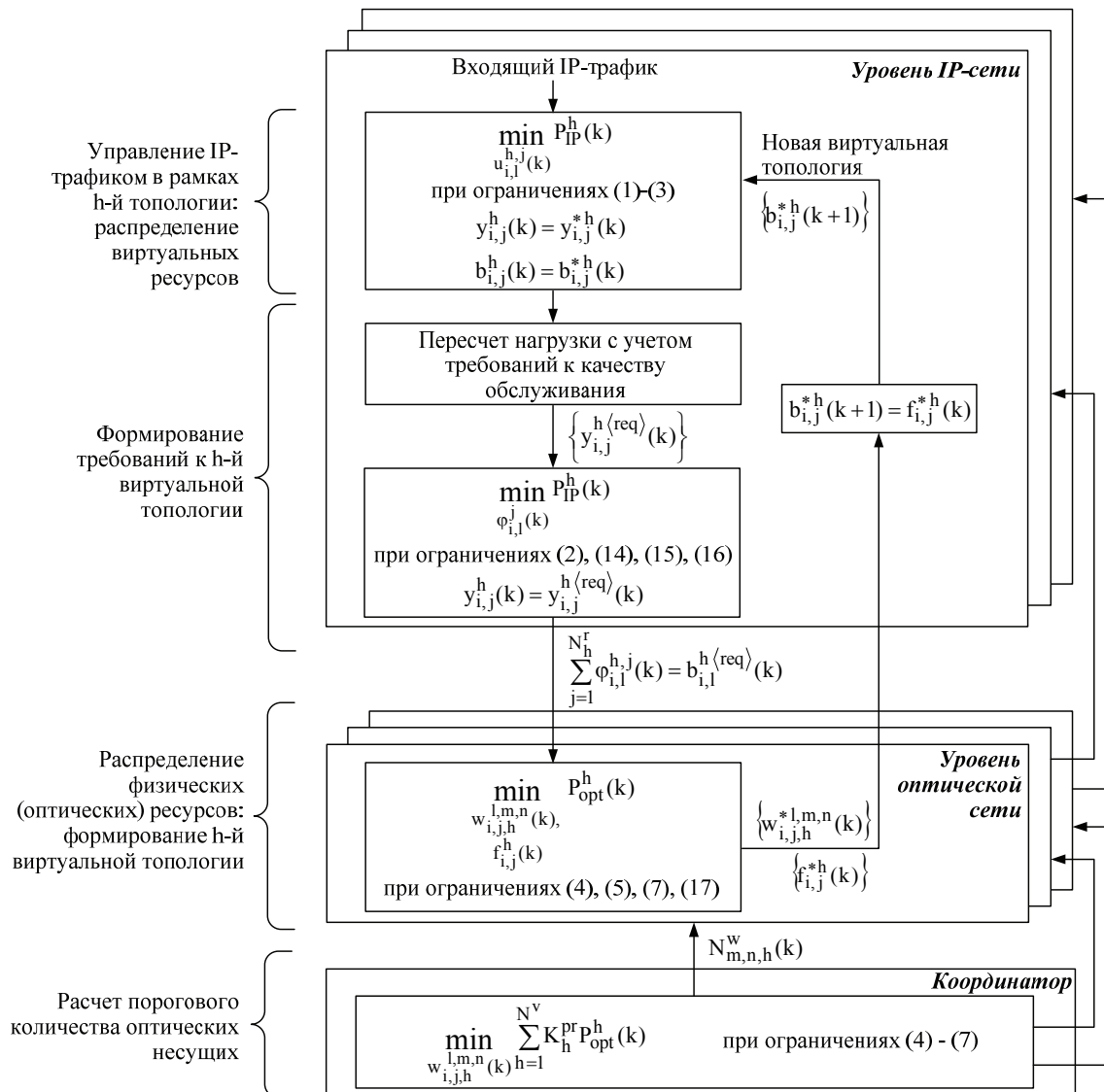


Рис. 3

Переменная $\varphi_{i,l}^{h,j}(k)$ отражает абсолютную величину потока, а потому подчиняется условиям

$$0 \leq \varphi_{i,l}^{h,j}(k) \leq b_{i,l}^h(k), \quad (15)$$

$$\sum_{j=1}^{N_h^r} \varphi_{i,l}^{h,j}(k) \leq b_{i,l}^{h,max}(k), \quad (16)$$

где $b_{i,l}^{h,max}(k)$ – максимально допустимая пропускная способность, которая может быть выделена тракту передачи (i,l) в рамках h-й виртуальной топологии.

Тогда задача формирования требований к виртуальной топологии принимает вид оптимизационной задачи $P_{IP}^h(k) \rightarrow \min$ при ограничениях (2), (14), (15), (16), где в качестве искомых переменных выступают $\{\varphi_{i,l}^{h,j}(k)\}$ (рис. 3). Результаты решения будут представлять собой требования к структуре и пропускным способностям трактов передачи, которые долж-

ны быть установлены между маршрутизаторами h -й IP-сети, т.е. $\sum_{i=1}^{N_h^r} \varphi_{i,l}^{h,j}(k) = b_{i,l}^{h(req)}(k)$. Тогда на основании (4) – (7) в соответствии с критерием (8) может быть рассчитано оптимальное распределение оптических несущих между световыми путями $\{b_{i,j}^{h req}\}$.

Поскольку речь идет о совместном использовании ресурсов, в общем случае изменение требований со стороны одной из наложенных IP-сетей обуславливает пересмотр текущего распределения оптических несущих и структуры установленных световых путей для всех виртуальных топологий. Для того чтобы обеспечить независимость различных виртуальных топологий друг от друга, целесообразно воспользоваться идеями координационного управления сложными системами [10]. Взяв за основу принцип оценки взаимодействия, условие (6) можно записать в упрощенном виде:

$$\sum_{h=1}^{N^v} \sum_{i=1}^{N_h^r} \sum_{j=1, j \neq i}^{N_h^r} \sum_{l=1}^{N_{m,n}^w} w_{i,j,l}^{l,m,n}(k) \leq N_{m,n,h}^w(k), \quad (17)$$

где $N_{m,n,h}^w$ – число оптических несущих в тракте передачи (m,n) , доступных для создания световых путей в рамках h -й виртуальной топологии.

Тогда задача распределения оптических несущих между N^v различными топологиями может быть декомпозицирована на N^v решаемых отдельно подзадач, координируемых посредством величины $N_{m,n,h}^w(k)$ (рис. 3).

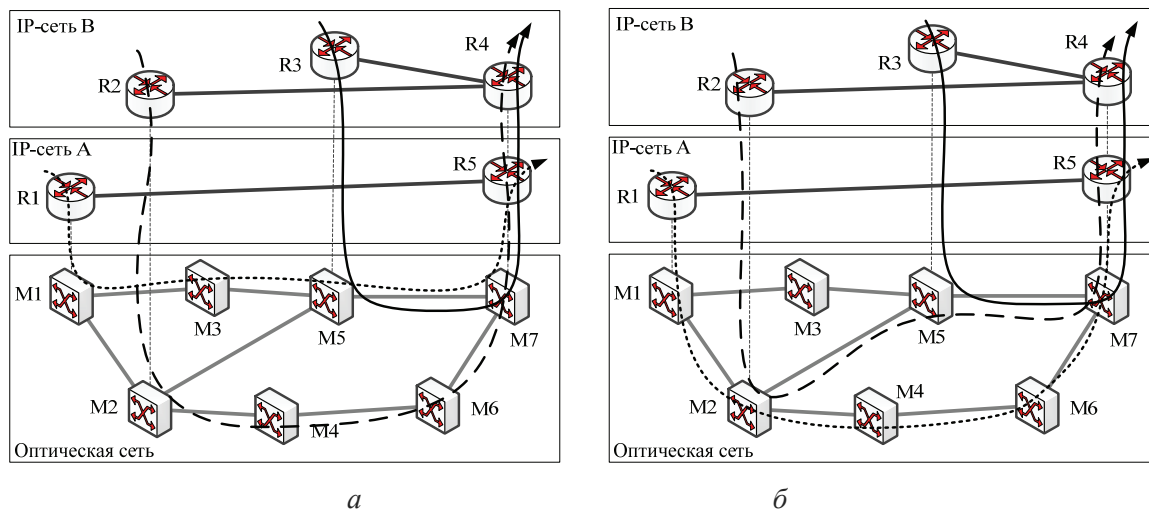


Рис. 4

Пример решения задачи распределения ресурсов в многоуровневой транспортной оптической сети при помощи описанного метода представлен на рис. 4, а. Предполагается две IP-сети с разными уровнями приоритета: приоритет сети А был установлен равным 1, приоритет сети В – 3 ($\delta_{A,1} = 1, \delta_{B,3} = 1$). Поступающие на обслуживание потоки в каждой из них обуславливают следующие требования к виртуальным топологиям: $b_{1,5}^{A(req)} = 2c$, $b_{3,4}^{B(req)} = 2c$, где c – пропускная способность одной оптической несущей, для упрощения приняты равными по всей сети. В таких условиях пороговое значение для использования тракта передачи М5-М7 сетью В будет установлено $N_{5,7,B}^w = 2$. При росте нагрузки в сети В

и необходимости организации нового светового пути $b_{2,4}^{B\langle req \rangle} = 2c$ текущее значение $N_{5,7,B}^w = 2$ препятствует установлению пути с минимальным числом мультиплексоров (R2-M2-M5-M7-R4). Однако наличие свободных ресурсов в других трактах передачи позволяет установить световой путь M2-M4-M6-M7. Для сравнения на рис. 4, б продемонстрирована оптимальная совокупность путей, рассчитанная для тех же исходных данных без декомпозиции. Потребление электроэнергии оптической сетью в случае, представленном на рис. 4, а, составляет $P_{opt}^A = 4E_{tr} + 7E_o$ и $P_{opt}^B = 8E_{tr} + 10E_o$ при том, что для распределения, показанном на рис. 4, б, $P_{opt}^A = 4E_{tr} + 9E_o$ и $P_{opt}^B = 8E_{tr} + 8E_o$. Однако в обоих случаях $P_{opt}^A + P_{opt}^B = 12E_{tr} + 17E_o$. Таким образом, несоответствие параметра $N_{m,n,h}^w$ текущим запросам ведет к решению, отличающемуся от оптимального. Как следует из описанного примера, это не всегда ведет к ухудшению качества обслуживания (например, отказам в обслуживании) или существенному росту энергопотребления. Тогда период перерасчета пороговых значений $N_{m,n,h}^w$ может быть увеличен или связан с появлением отказов, когда ресурсы, занимаемые потребителями с низким уровнем приоритета, должны быть перераспределены в интересах потребителей (IP-сетей) с более высокими приоритетами.

Предлагаемый в работе метод управления обеспечивает комплексное распределение ресурсов нижележащей оптической сети с целью создания совокупности виртуальных топологий для ряда одновременно функционирующих поверх нее IP-сетей, согласованное с распределением ресурсов этих топологий между обсуживаемыми потоками IP-пакетов. Модель предполагает приоритетное использование оптических ресурсов разными IP-сетями, раздельное управление которыми достигается за счет введения функции координатора, применяющего принцип оценки взаимодействия. В качестве координирующих переменных выступают пороговые значения числа оптических несущих, которые могут быть выделены в каждом конкретном тракте передачи. Их период перерасчета превышает период перерасчета управляющих переменных на оптическом уровне и на уровне IP-сетей и может быть связан с появлением отказов при формировании виртуальных топологий.

Список литературы: 1. *Green Communications: Principles, Concepts and Practice* / Editors K. Samdanis, P. Rost, A. Maeder [and other]. John Wiley & Sons, 2015. 430 p. 2. *Optical networks: How much power do they consume and how can we optimize this?* / Willem Vereecken, Ward Van Heddeghem, Bart Puype [and other] // 36th European Conference and Exhibition on Optical Communication, 19-23 Sept. 2010: proc. of the conf. 2010. P. 1 – 4. 3. *Green optical backbone networks: virtual topology adaptation using a page rank-based rating system* / P. Melidis, P. Nicopolitidis, G. Papadimitriou [and other] // *International Journal of Communication Systems*. 2015. Vol. 28, Is. 16. P. 2112 – 2121. 4. *Dynamic hybrid grooming based on power efficiency in green IP over WDM networks* / Weigang Hou, Lei Guo, Xiaoxue Gong [and other] // *Photonic Network Communications*. – 2012. – Vol. 23, Is. 3. – P. 230 – 245. 5. *Energy Efficiency in Telecom Optical Networks* / Yi Zhang, P. Chowdhury, M. Tornatore [and other] // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. – 2010. – Vol.12, Is. 4. – P. 441 – 458. 6. *Energy-Minimized Design and Operation of IP Over WDM Networks With Traffic-Aware Adaptive Router Card Clock Frequency* / Xuejiao Zhao, Gangxiang Shen, Weidong Shao [and other] // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. – 2015. – Vol. 33, Is. 12. – P. 2847 – 2862. 7. *Musumeci F., Tornatore M., Pattavina A. A Power Consumption Analysis for IP-Over-WDM Core Network Architectures* // *Journal of Optical Communications and Networking*. – 2012. – Vol. 4. Is. 2. – P. 108 – 117. 8. *Евсеева О.Ю., Ильяшенко Е. Н. Модель энергоэффективного управления ресурсами сети IP-over-DWDM* // *Системы обработки информации*. – 2014. – № 8 (124). – С. 107 – 113. 9. *Евсеева О.Ю., Ильяшенко Е.Н., Ткачева Е.Б. Математическая модель и метод комплексного управления ресурсами транспортной программно-конфигурируемой сети [Электронный ресурс]* // *Проблемы телекоммуникаций*. – 2016. – № 1 (18). – С. 22 – 35. 10. *Сингх М., Титли А. Системы: декомпозиция, оптимизация, управление*. – М. : Машиностроение, 1986. – 496 с.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 29.08.2016