

УДК 621.391

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И МЕТОД КОМПЛЕКСНОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ ТРАНСПОРТНОЙ ПРОГРАММНО- КОНФИГУРИРУЕМОЙ СЕТИ



[О.Ю. ЕВСЕЕВА](#), [Е.Н. ИЛЬЯШЕНКО](#), [Е.Б. ТКАЧЕВА](#)

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Abstract – A dynamic mathematical model and appropriate method for comprehensive resource management in transport packet optical networks were offered. They were developed for transport software defined networks in concordance with principles of virtualization and centralized optimal control. Method assumes virtualization of resources at underlying optical layer for their abstracted representation at IP-layer and separation of control functions at different levels. Total energy consumption was chosen as the optimality criterion for decision making according to the global energy-saving trend. The mathematical model of transport SDN has dynamic nature that involves the periodic recalculation of all types of control variables and allows to adapt to the structural and functional changes, such the failure of a cable, router or optical cross-connector, or changes in the incoming traffic pattern. The method includes three major sub-tasks: routing of packet flows at IP-level where virtual topology is assumed to be given, revision of requirements for this topology structure, and establishing of new lightpaths and creating of new virtual topology in accordance with arriving IP-traffic. As simulation results show, required structure of actual virtual topology is determined mainly by pattern of incoming traffic. It is shown that the establishment of a direct lightpath is reasonable only if the incoming traffic exceeds a certain threshold, the value of which depends on the current structure of the available routes.

Анотація – Запропоновані модель і метод комплексного управління різнотипними ресурсами транспортних пакетних оптичних мереж, побудованих відповідно до концепції програмного конфігурування. В якості критерію оптимальності було обрано мінімум сумарного енергоспоживання мережею. Метод передбачає виділення трьох основних підзадач: маршрутизації потоків на IP-рівні в умовах заданої віртуальної топології, перегляду вимог до цієї топології та формування нової структури світлових шляхів згідно до вимог трафіку, що надходить на обслуговування. Показано, що встановлення прямого світлового шляху є обґрунтованим лише при перевищенні трафіком певного порогу, величина якого залежить від поточної структури доступних шляхів.

Аннотация – Предложены модель и метод комплексного управления разнотипными ресурсами транспортных пакетных оптических сетей, построенных в соответствии с концепцией программного конфигурирования. В качестве критерия оптимальности выбран минимум энергопотребления. Метод предполагает выделение трех подзадач: маршрутизации потоков на IP-уровне в условиях заданной виртуальной топологии, пересмотра требований к топологии и формирования новой структуры световых путей в соответствии с поступающим трафиком. Показано, что установление прямого светового пути обосновано при превышении трафиком определенного порога, величина которого зависит от текущей структуры доступных путей.

Введение

Транспортные программно-конфигурируемые сети (Software-Defined Network, SDN) представляют собой результат наложения активно развивающейся в последние годы концепции централизованного программно-реализуемого оптимального управления на транспортные реконфигурируемые пакетные сети. При этом все ос-

новые принципы программно-конфигурируемых сетей не только сохраняются, но и распространяются на нижележащие уровни, включая управление физическими ресурсами, в качестве которых, как правило, выступает оптическая инфраструктура. Ключевая особенность идеологии SDN, включая транспортные SDN, заключается в принципиально ином подходе к управлению сетью [1, 2]: отделение задач управления от функций непосредственно передачи потоков данных; полностью программная реализация управления сетью; возможность динамической реконфигурации сети в соответствии с ее текущим или будущим состояниями; высокая степень централизации функций сетевого управления и оптимальность динамически принимаемых управляющих решений на основе полной информации о состоянии сети; абстрагирование и виртуализация ресурсов с целью их обобщенного и упрощенного представления для приложений и сервисов более высокого уровня.

Таким образом, концепция SDN ориентирует на централизованное динамическое оптимальное управление транспортной пакетной оптической сетью, включая все типы ее ресурсов: информационные, буферные, каналные, физические, что, в свою очередь, предполагает соответствующую формализацию процесса принятия управляющих решений. При этом вычислительные ресурсы, закладываемые в реализующие функции управления SDN-контроллеры, позволяют применить для формализации задач управления класс более сложных, но более эффективных динамических моделей. В этой связи в статье предлагается динамическая модель комплексного управления разнотипными ресурсами транспортной реконфигурируемой пакетной оптической сети, реализуемого в соответствии с принципами SDN, и метод принятия управляющих решений на ее основе.

I. Постановка задачи и математическая модель управления ресурсами транспортной программно-конфигурируемой сети

Лежащие в основе транспортных SDN пакетные оптические сети, как правило, представляют собой многоуровневые платформы, в рамках которых взаимодействуют ряд технологий, например, MPLS, IP, OTN, WDM или других, среди которых можно выделить как минимум два уровня: реконфигурируемой оптической сети и передаваемых поверх нее IP-потоков. Тогда в соответствии с принципами SDN ресурсы оптической сети с точки зрения вышестоящего IP-уровня могут рассматриваться как набор виртуальных трактов передачи (световых путей), обладающих определенной пропускной способностью и образующих доступную на IP-уровне виртуальную топологию. При этом детальная информация о структуре световых путей, используемых оптических несущих и настройках реконфигурируемых мультиплексоров ввода/вывода (Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer, ROADM), остается доступной лишь нижележащему оптическому уровню. Такой подход позволяет выделить в рамках задачи управления ресурсами пакетной оптической транспортной сети две подзадачи:

- управление ресурсами оптической сети с целью создания виртуальной IP-топологии путем установления определенной совокупности световых путей в соответствии с требованиями вышестоящего IP-уровня (т.н. задача маршрутизации и назначения оптических несущих, известная в англоязычной литературе как Routing and Wavelength Assignment, RWA);

- управление пулом виртуальных канальных ресурсов на IP-уровне с целью обслуживания потоков пакетов (традиционная задача IP-маршрутизации и управления трафиком).

Существующие на данный момент решения предоставляют возможность технологической реализации описанного подхода. Например, в функции виртуальных коммутаторов Open Transport Switch (OTS) на основе протокола OpenFlow входят мониторинг и выделение ресурсов на уровнях пакетной и оптической сетей, обеспечивая тем самым возможность виртуализации ресурсов транспортной SDN [1]. Однако основная сложность заключается не в способе реализации, а в алгоритме принятия управляющих решений. Концепция SDN ориентирует на динамический и оптимальный характер управления всеми типами сетевых ресурсов, что в свою очередь требует строгого математического обоснования. При этом следует учитывать, что задачи управления ресурсами оптической сети и распределения ресурсов вышележащей виртуальной IP-топологии тесно взаимосвязаны: структура световых путей определяет пропускную способность сети на IP-уровне и, как следствие, порядок маршрутизации трафика, с другой стороны – именно порядок распределения виртуальных ресурсов между обслуживаемыми IP-потоками будет определять требования к создаваемой на оптическом уровне виртуальной топологии. Таким образом, в рамках единой задачи управления ресурсами транспортной SDN подзадачи создания виртуальной топологии (или виртуализации ресурсов оптической сети) и их назначения потокам IP-пакетов должны быть решены совместно или, по меньшей мере, согласованно.

Как показывает анализ, в литературе задача управления ресурсами пакетной оптической сети зачастую представляется в виде задачи целочисленного линейного программирования, где в качестве объектов управления выступают оптические несущие, световые пути и маршруты передачи трафика, для каждого из которых вводится свой тип управляющих переменных [2, 3]. Главный недостаток такого подхода связан с тем, что он не отражает процесс поступления IP-трафика и соответствующую реакцию сети в динамике.

Таким образом, определенное концепцией SDN требование относительно динамического и оптимального характера управления ресурсами транспортной оптической сети предполагает математическую формализацию и оптимизационную постановку данной задачи в классе динамических моделей. В этой связи заслуживают внимания модели сетей, представленные в виде дифференциально-разностных уравнений состояний. Данные модели успешно применяются для решения задач маршрутизации на уровне IP-сети, рассматривая ее как задачу распределения канальных и буферных ресурсов между поступающими на обслуживание потоками IP-

пакетов [4]. Тогда совокупность следующих выражений описывает процесс информационного обмена на уровне IP-сети [5]:

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

где $i, j = \overline{1, N^r}$, $i \neq j$; $\Delta t = t(k+1) - t(k)$; $x_{i,j}(k)$ – объем данных, которые находятся на i -м маршрутизаторе и предназначены для передачи j -му маршрутизатору в момент времени t_k (переменные состояния IP-сети); $u_{i,l}^j(k)$ – управляющая переменная, которая указывает на долю пропускной способности тракта передачи между i -м и l -м маршрутизаторами, выделяемую в момент времени t_k для передачи потока с адресом j ; $b_{i,j}(k)$ – пропускная способность канала тракта передачи (i, j) ; $y_{i,j}(k) = \zeta_{i,j}(k)\Delta t$ – объем нагрузки, поступающей в момент времени t_k на маршрутизатор i и предназначенной для передачи маршрутизатору j ; $\zeta_{i,j}(k)$ – интенсивность поступления нагрузки в сеть; N^r – количество маршрутизаторов в IP-сети.

В соответствии с физическим смыслом переменных состояния и управления на уровне IP-сети на них накладывается ряд ограничений:

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

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

где x_i^{\max} – максимально допустимая длина очереди на i -м маршрутизаторе.

С целью предоставления услуг гарантированного качества в модель (1) – (3) дополнительно могут быть введены QoS-ограничения, одна из возможных формализаций которых с использованием аппарата тензорного исчисления представлена в работах [6, 7]. Это совокупность условий, удовлетворение которые переменными управления ресурсами IP-сети гарантирует выполнение заданных показателей качества обслуживания на сетевом уровне.

Принципиальное отличие модели (1) – (3) от ранее известных связано с ролью переменных $b_{i,j}(k)$, отражающих пропускные способности трактов передачи между маршрутизаторами IP-сети. Физически тракты передачи между маршрутизаторами представляют собой световые пути, установленные между определенными парами мультиплексоров ввода/вывода на оптическом уровне. Поскольку в рамках транспортной SDN предполагается динамическое и оптимальное выделение ресурсов, то формирование светового пути должно отвечать обслуживаемым потокам данных, а потому структура и пропускные способности световых путей, формализуемые в (1) через переменные $b_{i,j}(k)$, подлежат расчету. Другими словами, переменные $b_{i,j}(k)$

определяют виртуальную топологию, доступную на уровне IP-сети, но физически обеспечиваемую за счет коммутации световых волн на оптическом уровне. Таким образом, переменные $b_{i,j}(k)$ (1) могут выступать как в качестве исходных данных, так и в качестве искомым переменных. Тогда, модель (1) – (3) может быть использована, во-первых, для распределения доступных на этом уровне буферных и виртуальных канальных ресурсов между множеством обслуживаемых потоков IP-пакетов (через переменные $u_{i,l}^j(k)$ и $x_{i,j}(k)$ при известных $b_{i,j}(k)$), во-вторых, для формирования виртуальной топологии, обладающей объемом ресурсов, достаточным для обслуживания поступающих в сеть потоков IP-пакетов с заданными показателями качества (в этом случае искомыми являются переменные $u_{i,l}^j(k)$, $x_{i,j}(k)$ и $b_{i,j}(k)$).

В свою очередь процесс формирования световых путей может быть формализован в рамках линейной модели:

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

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

$$f_{i,j}(k) \geq b_{i,j}^{req}(k), \quad (6)$$

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 i и j ; c^w – пропускная способность оптической несущей; N – число мультиплексов ввода/вывода в оптической сети; $N_{m,n}^w$ – число оптических несущих в тракте передачи (m,n) ; $f_{i,j}(k)$ – пропускная способность формируемого светового пути (i,j) ; $b_{i,j}^{req}(k)$ – требуемая пропускная способность светового пути (i,j) .

Искомыми в рамках (4)-(6) являются переменные $w_{i,j}^{l,m,n}(k)$, отражающие процесс назначения оптических несущих с целью установления того или иного светового пути. При этом на них накладывается ряд ограничений, связанных с сохранением потока (4), ограниченным количеством оптических несущих в каждом тракте передачи, каждая из которых может быть использована один раз (5), и требованиями относительно связности между маршрутизаторами на уровне IP (6).

В совокупности выражения (1)-(6) описывают процесс распределения разнотипных ресурсов пакетной оптической сети, где управляющими являются переменные трех типов: $u_{i,l}^j(k)$, $b_{i,j}(k)$ и $w_{i,j}^{l,m,n}(k)$, и их численные значения могут быть найдены в ходе решения оптимизационной задачи. В связи с общей тенденцией энергосбережения в качестве критерия оптимальности управления ресурсами опти-

ческих сетей предпочтительным становится минимум потребляемой сетью электро-энергии [8]. Количество потребляемой сетью электроэнергии напрямую связано с количеством задействованных устройств, что в свою очередь определяется выбранным способом наложения пакетной сети поверх оптической. Среди различных возможных вариантов с точки зрения экономии энергозатрат заслуживает внимания так называемая «прозрачная» (transparent) архитектура IP-over-WDM, в которой возможно установление световых путей исключительно на оптическом уровне без задействования транзитных маршрутизаторов. Тогда целевая функция принимает вид [5, 8]:

$$P_{\Sigma}(k) = P_{tr}(k) + P_{IP}(k) + P_o(k) + P_{am}(k) \rightarrow \min, \quad (7)$$

$$P_{tr}(k) = 2E_{tr} \sum_{i=1}^{N^r} \sum_{\substack{j, \\ j \neq i}}^{N^r} V_{i,j}(k), \quad (8)$$

$$P_{IP}(k) = E_{IP} \sum_{j=1}^{N^r} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{N^r} \left[\sum_{\substack{l=1 \\ l \neq i}}^{N^r} b_{i,l}(k) \cdot \Delta t \cdot u_{i,l}^j(k) + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq i,j}}^{N^r} b_{m,i}(k) \cdot \Delta t \cdot u_{m,i}^j(k) + y_{i,j}(k) \right], \quad (9)$$

$$P_o(k) = E_o \sum_{i=1}^{N^r} \sum_{\substack{j, \\ j \neq i}}^{N^r} \left(V_{ij} + \sum_m \sum_{\substack{n, \\ n \neq m}} \sum_l^{N_{m,q}^w} w_{i,j}^{l,m,n}(k) \right), \quad (10)$$

$$P_{am}(k) = E_{am} \sum_m \sum_{\substack{n, \\ n \neq m}} A_{m,n} N_{m,n}^F, \quad (11)$$

где $P_{tr}(k)$, $P_{IP}(k)$, $P_o(k)$, $P_{am}(k)$ – мощность, потребляемая транспондерами, IP-маршрутизаторами, оптическими элементами сети и линейными усилителями соответственно на протяжении k -го интервала управления; $V_{i,j}(k)$ – количество световых путей, установленных между i -м и j -м маршрутизаторами в k -й момент времени; E_{tr} , E_{IP} , E_o , E_{am} – номинальное энергопотребление оптического транспондера, маршрутизатора, оптического кроссконнектора 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 $L_{m,n}$, $A_{m,n} = \lceil L_{m,n}/L - 1 \rceil + 2$; $\lceil \cdot \rceil$ – операция округления в сторону ближайшего большего целого; L – номинальная длина оптического усилительного участка.

Таким образом, в рамках представленной модели задача распределения ресурсов пакетной оптической транспортной SDN может быть сформулирована как оптимизационная, связанная с минимизацией суммарной потребляемой сетью электроэнергии $P_{\Sigma}(k)$ (7) при ограничениях (1)-(6).

II. Метод управления ресурсами транспортной SDN

В силу ограничения (1) сформулированная задача носит нелинейный характер, для решения которой следует применять численные методы. При этом с точки зрения практической реализации используемый метод поиска должен обеспечивать такое решение, которое вело бы к улучшению текущего состояния сети в любой момент времени. С целью упрощения и одновременно получения реализуемого управляющего решения целесообразной является декомпозиция исходной задачи (1) – (7) на ряд следующих подзадач:

- задача управления ресурсами IP-сети в условиях известной ее топологии;
- задача формирования требований к виртуальной топологии на IP-уровне;
- задача непосредственного формирования виртуальной топологии путем распределения оптических несущих и установления соответствующих световых путей.

Задачей верхнего уровня управления является распределение ресурсов доступной виртуальной топологии между поступающими на обслуживание IP-потоками, которая формализуется как задача минимизации (7) при ограничениях (1) – (3). Искомыми являются переменные $\{u_{i,l}^j(k)\}$, являющиеся фактически маршрутными переменными, а в качестве исходных данных выступают известная структура виртуальной топологии IP-сети, заданная в виде переменных $\{b_{i,j}^*(k)\}$, и объемы передаваемого трафика $\{y_{i,j}^*(k)\}$, также предполагаются известными. Интервал перерасчета управляющих переменных определяется моделью (1) в виде величины Δt , которая в общем случае должна отвечать динамике поступающего на обслуживание трафика.

Вторая среди перечисленных подзадач связана с пересмотром структуры и/или параметров виртуальной топологии IP-сети. Обновление виртуальной топологии сводится к расчету $\{b_{i,j}^{\langle req \rangle}(k)\}$ и математически заключается в минимизации (7) по переменным $\{u_{i,l}^j(k)\}$ и $\{b_{i,j}(k)\}$ при ограничениях (1)-(3). Результирующие значения $\{b_{i,j}^{\langle req \rangle}(k)\}$ отражают требования к количеству и пропускным способностям световых путей, которые должны быть установлены между определенными парами маршрутизаторов. При этом в качестве исходных данных выступают объемы передаваемого трафика $\{y_{i,j}^*(k)\}$, подлежащего обслуживанию на IP-уровне с надлежащими показателями качества обслуживания. Это означает, что в процессе расчета новой виртуальной топологии должны быть приняты во внимание QoS-требования обслуживаемых потоков, что может быть реализовано путем введения в модель (1)-(3) соответствующих QoS-ограничений и сопряжено с усложнением расчетных процедур. Избежать дополнительных усложнений возможно за счет использования в качестве исходных данных не оценок объемов передаваемого трафика $\{y_{i,j}^*(k)\}$, а величины $\{y_{i,j}^{\langle req \rangle}(k)\} = (\lambda_{i,j}^{\langle req \rangle} + \Delta \lambda_{i,j}) d_{i,j} \Delta t$, где $\lambda_{i,j}^{\langle req \rangle}$ – пакетная интенсивность потока от i -го

маршрутизатора к j -му, наблюдаемая на IP-уровне; $d_{i,j}$ – средняя длина IP-пакета в потоке (i, j) ; $\Delta\lambda_{i,j}$ – дополнительные требования к пропускной способности, призванные обеспечить QoS-требования потока от i -го маршрутизатора к j -му на уровне IP-сети.

Согласно положениям теории массового обслуживания задержка передачи потока пакетов зависит не столько от абсолютного значения интенсивности этого потока, сколько от его отношения к пропускной способности сформированного для его обслуживания пути. То есть передача потока с заданной задержкой $\tau_{\langle req \rangle}$ предполагает выделение пропускной способности в объеме, превышающем интенсивность поступления этого потока на некоторую величину $\Delta\lambda_{i,j} = f(\tau_{\langle req \rangle}, \lambda_{i,j}^{\langle req \rangle}, b_{i,j}(k))$. Величина «запаса» $\Delta\lambda_{i,j} = \mu_{i,j} - \lambda_{i,j}^{\langle req \rangle}$, где $\mu_{i,j}$ – средняя интенсивность обслуживания IP-пакетов в тракте передачи (i, j) на IP-уровне, $\mu_{i,j} = b_{i,j}/d_{i,j}$, может быть рассчитана с использованием результатов теории массового обслуживания, исходя из принятой модели трафика и его обслуживания на маршрутизаторах IP-сети. Известно, что потоки IP-пакетов обладают свойствами самоподобия, и величина задержки может быть оценена как [9]

$$\tau_{i,j} = \frac{1}{\mu_{i,j}} \left[1 + \frac{(\rho_{i,j})^{\frac{1}{2(1-H)}}}{(1 - \rho_{i,j})^{\frac{H}{1-H}}} \right], \quad (12)$$

где $\rho_{i,j} = \lambda_{i,j}^{\langle req \rangle} / \mu_{i,j}$; H – параметр Херста.

Результаты расчетов согласно выражению (12) при $\mu_{i,j}=100$ пак/с приведены на рис. 1. Заметим, что при $H=0,5$ выражение (12) совпадает с моделью M/M/1, и в этом случае имеем $\Delta\lambda_{i,j} = 1/\tau_{i,j}^{i,j}$.

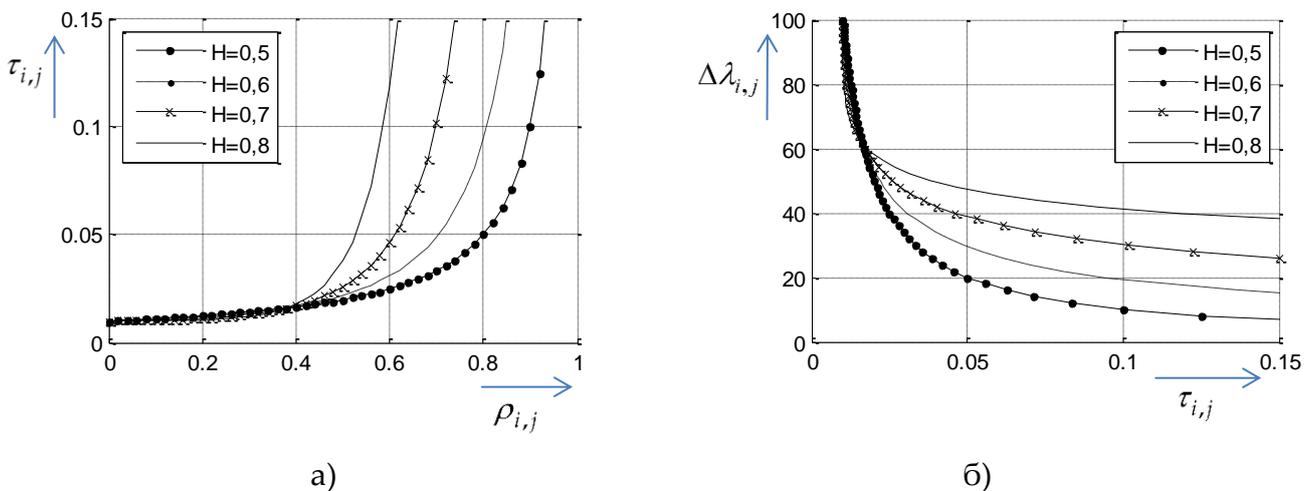


Рис. 1. Зависимость задержки передачи пакетов (а) и величины $\Delta\lambda_{i,j}$ (б), необходимой для ее обеспечения, при различных значениях параметра Херста H

Таким образом, зная $\{y_{i,j}^{\langle req \rangle}(k)\}$, для расчета требуемой виртуальной топологии необходимо решить оптимизационную задачу (7) при ограничениях (1)-(3), где неизвестными являются переменные $\{u_{i,l}^j(k)\}$ и $\{b_{i,j}(k)\}$, но искомыми с точки зрения физики решаемой задачи – лишь переменные $\{b_{i,j}(k)\}$. В этой связи перепишем уравнение состояния IP-сети в виде:

$$x_{i,j}(k+1) = x_{i,j}(k) - \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq i}}^{N^r} \varphi_{i,l}^j(k) \cdot \Delta t + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq i,j}}^{N^r} \varphi_{m,i}^j(k) \cdot \Delta t + y_{i,j}^{\langle req \rangle}(k), \quad (13)$$

где $\varphi_{i,l}^j(k) = b_{i,l}(k) \cdot u_{i,l}^j(k)$ – интенсивность потока, передаваемого на k -м временном интервале от i -го к l -му маршрутизатору и адресованного j -му маршрутизатору.

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

$$0 \leq \varphi_{i,l}^j(k) \leq b_{i,l}(k). \quad (14)$$

В условиях заданной топологии, т.е. при $b_{i,l}(k) = b_{i,l}^*(k) = const$, выражение (13) представляет собой лишь иную форму записи (1), где условие (3) заменяется на

$$\sum_{j=1}^{N^r} \varphi_{i,l}^j(k) \leq b_{i,l}^*(k). \quad (15)$$

Однако в случае формирования топологии условие (15) теряет силу и должно быть заменено на выражение

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

где $b_{i,l}^{\max}(k)$ – максимально допустимая пропускная способность, которая может быть выделена тракту передачи (i,l) .

Тогда задача формирования требований к виртуальной топологии принимает вид оптимизационной задачи (7) при ограничениях (2), (13), (14), (16), где в качестве искоемых переменных выступают $\{\varphi_{i,l}^j(k)\}$ (рис. 2). Результаты решения $\{\varphi_{i,l}^{*j}(k)\}$ и будут представлять собой требования к структуре и пропускным способностям трактов передачи, которые должны быть установлены между маршрутизаторами IP-сети, исходя из известных объемов передаваемого трафика и их QoS-показателей,

$$\sum_{j=1}^{N^r} \varphi_{i,l}^j(k) = b_{i,l}^{\langle req \rangle}(k).$$

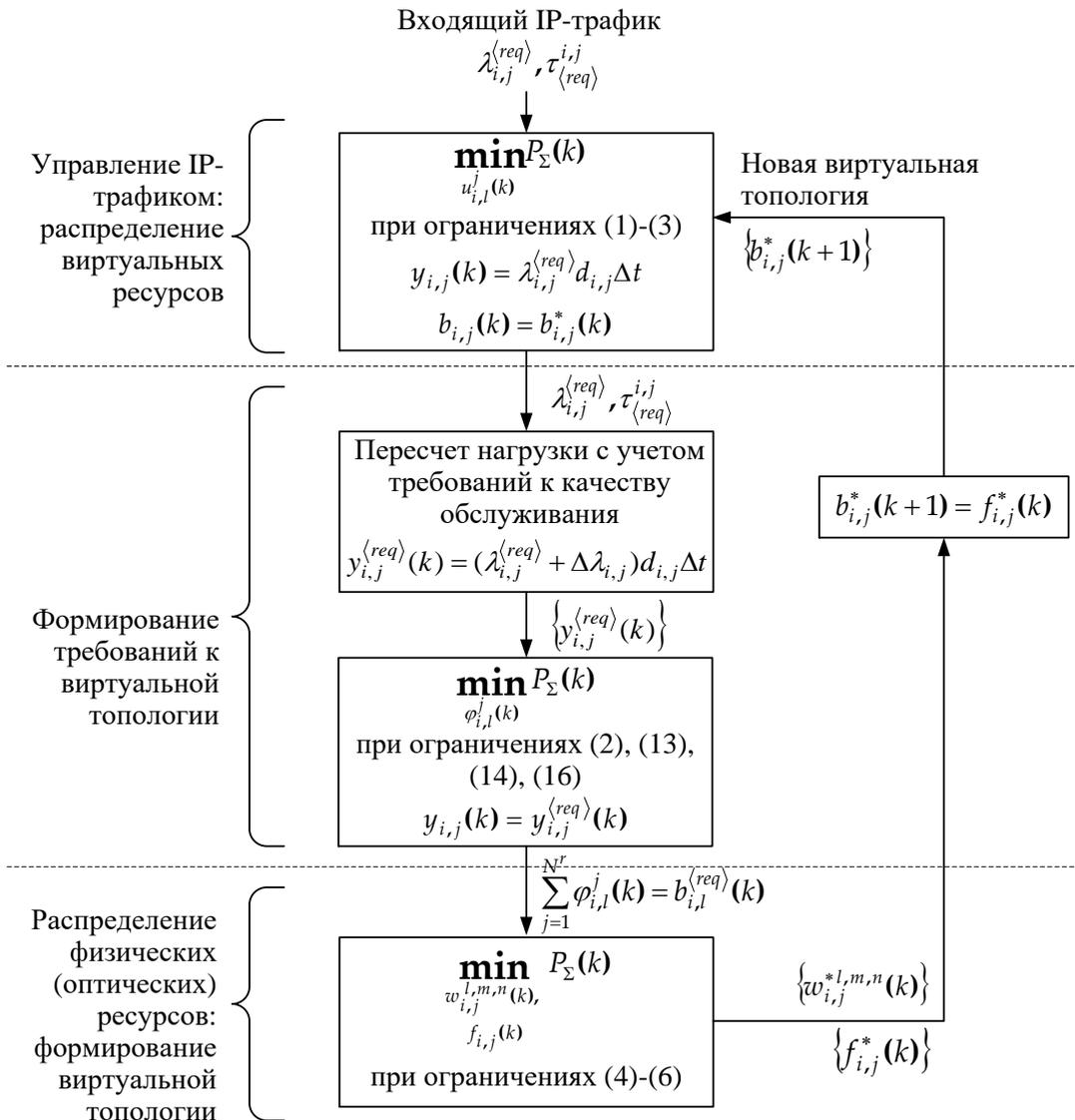


Рис. 2. Упрощенная структура метода управления ресурсами транспортной SDN

Рассчитанные требования к структуре световых путей $\{b_{i,j}^{\langle req \rangle}(k)\}$ спускаются на нижний уровень управления, который ассоциирован с оптической сетью (рис. 2). Этот уровень путем минимизации (7) по переменным $\{w_{i,j}^{l,m,n}(k)\}$ при ограничениях (4)-(6) формирует совокупность световых путей $\{f_{i,j}(k)\}$ и распределяет оптические несущие вдоль них.

Таким образом, предложенный метод (рис. 2) представляет собой совокупность расчетных процедур, связанных с поочередным управлением различными типами ресурсов транспортной SDN. При этом все уровни управления связаны единой целевой функцией – минимумом суммарного энергопотребления, и их решения скоординированы между собой.

III. Анализ предлагаемого метода управления ресурсами

В рамках предлагаемого метода к верхнему уровню управления относятся две задачи: распределение ресурсов доступной на IP-уровне виртуальной топологии между поступающими на обслуживание потоками пакетов и пересчет этой топологии. Закономерно предположить, что частота структурных изменений IP-сети значительно ниже, чем изменение порядка маршрутизации внутри нее. В этой связи представляет интерес анализ условий, обуславливающих смену виртуальной топологии, и установление/освобождение световых путей. Как показывают результаты моделирования, решение об установлении прямых световых путей (прямых трактов передачи на IP-уровне) в первую очередь связано со структурой уже установленных трактов передачи, объемами поступающего трафика и параметрами энергопотребления элементов сети.

Например, для фрагмента сети, представленного на рис. 3, оптимальные с точки зрения потребляемой энергии решения об установлении тех или иных световых путей отражены в табл. 1. При этом были использованы следующие параметры: пропускная способность одной оптической несущей была принята $c=100$ Гбит/с, номинальное энергопотребление элементов сети в соответствии с [10] составляло $E_{tr} = 150$ Вт, $E_{IP} = 5$ Вт на 1 Гбит/с обрабатываемого трафика, $E_o = 7,5$ Вт на одну оптическую несущую, а суммарная интенсивность трафика не превышала пропускную способность одной оптической несущей, $\zeta_{1,2} + \zeta_{2,3} + \zeta_{1,3} \leq c$.

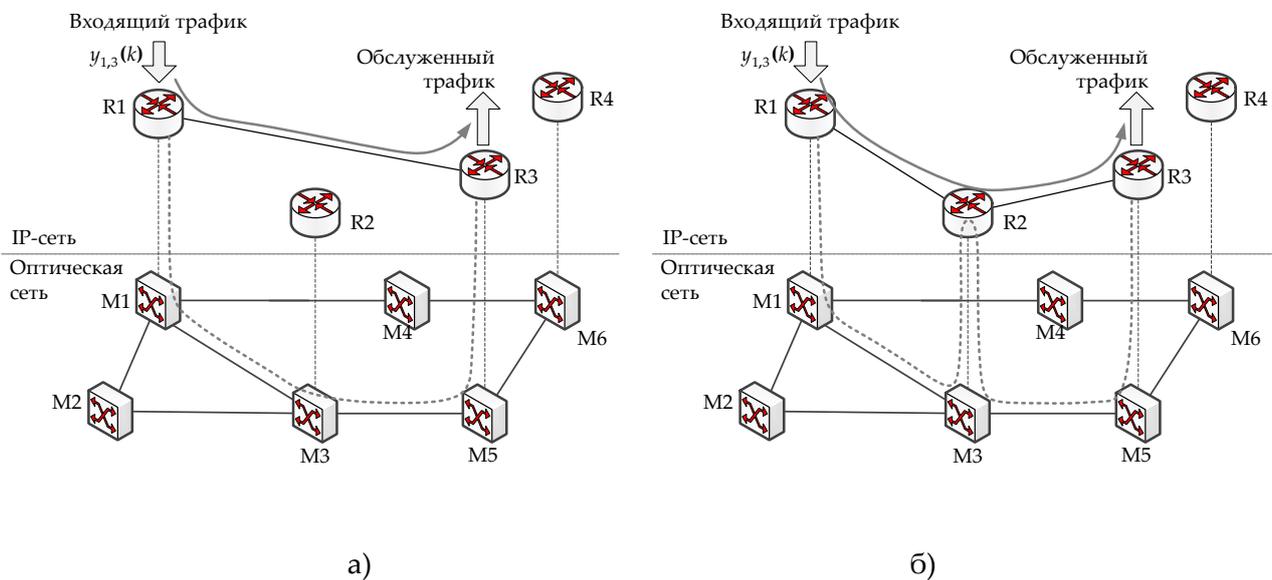


Рис. 3. Моделируемый фрагмент сети

Таблица 1. Результаты решения задачи распределения ресурсов

	Наличие трафика			Устанавливаемые световые пути	Используемые маршруты передачи
	$y_{1,2}$	$y_{2,3}$	$y_{1,3}$		
1	-	-	✓	R1-M1-M3-M5-R3	R1->R3
2	✓	-	✓	R1-M1-M3-R2 R1-M1-M3-M5-R3	R1->R2 R1->R3
3	✓	✓	-	R1-M1-M3-R2 R2-M3-M5-R3	R1->R2 R2->R3
4	✓	✓	✓	При $\zeta_{1,3} \leq 32$ Гбит/с: R1-M1-M3-R2 R2-M3-M5-R3 При $\zeta_{1,3} > 32$ Гбит/с: R1-M1-M3-R2 R2-M3-M5-R3 R1-M1-M3-M5-R3	При $\zeta_{1,3} \leq 32$ Гбит/с: R1->R2 R2->R3 R1->R2->R3 При $\zeta_{1,3} > 32$ Гбит/с: R1->R2 R2->R3 R1->R3

На рис. 3 отражены варианты маршрутизации потока $y_{1,3}$, наблюдаемые в ходе эксперимента, представленного в табл. 1 под номером 4. Зависимость мощности, потребляемой при этом различными маршрутами в предположении, что $\zeta_{1,2}(k) = \zeta_{2,3}(k) = 20$ Гбит/с, а скорость потока из R1 в R3 варьируется, показана на рис. 4. Таким образом, при наличии уже установленных световых путей R1->R2 и R2->R3 установление прямого светового пути из R1 в R3 происходит в случае, если интенсивность трафика $\zeta_{1,3}$ превышает порог $\Delta\zeta$, равный 32 Гбит/с.

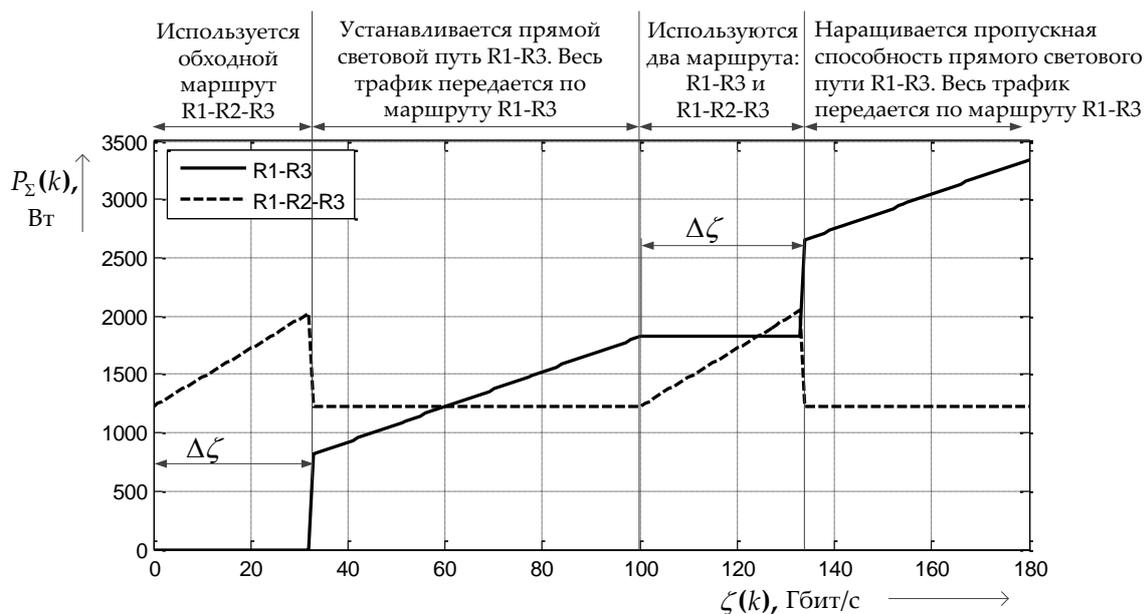


Рис. 4. Зависимость энергии, потребляемой различными маршрутами, от интенсивности обслуживаемых потоков

Как показали результаты моделирования, величина порога $\Delta\zeta$, при превышении которого, т.е. при $\zeta_{i,j} > \Delta\zeta$, между i -м и j -м маршрутизаторами предпочтительным с точки зрения экономии потребляемой электроэнергии становится установление прямого светового пути, зависит в наибольшей степени от количества трактов передачи в существующем маршруте (рис. 5). Причем эта зависимость носит нелинейный характер.

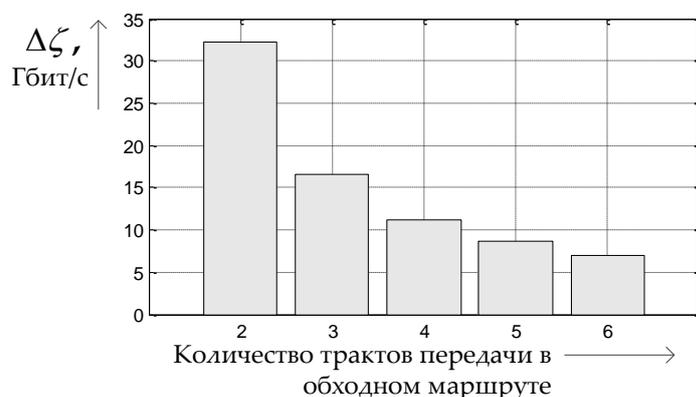


Рис. 5. Зависимость величины порога $\Delta\zeta$ установления прямого светового пути от количества трактов передачи в существующем маршруте

Таким образом, формирование новой топологии определяется в первую очередь поступающим на обслуживание трафиком и не зависит от принятого порядка маршрутизации на IP-уровне. Тогда эти задачи могут быть решены параллельно. Их принципиальным отличием является условие (16), позволяющее выйти за рамки существующей структуры трактов передачи. В таком случае результаты решения двух задач будут отличаться, что и может трактоваться как признак смены топологии.

Выводы

В работе представлены модель и метод комплексного управления разнотипными ресурсами транспортных пакетных оптических сетей, построенных в соответствии с концепцией программного конфигурирования. Метод ориентирует на централизованное программно-реализуемое оптимальное управление, основанное на виртуализации ресурсов нижележащего оптического уровня и разделении функций управления разными уровнями. При этом в качестве критерия оптимальности был выбран минимум суммарного энергопотребления сетью, что обеспечивает актуальность предлагаемого метода в рамках глобальной задачи энергосбережения. Предлагаемая математическая модель транспортной SDN является динамической, что предполагает периодический перерасчет всех типов переменных и позволяет подстроиться под структурные и функциональные изменения в сети, связанные, например, с выходом из строя маршрутизатора, оптического кроссконнектора, обрывом кабеля или изменениями в интенсивностях поступающего трафика.

Метод предполагает выделение трех основных подзадач: маршрутизации потоков на IP-уровне в условиях заданной виртуальной топологии, пересмотра требований к этой топологии и формирования новой структуры световых путей в соответствии с требованиями поступающего на обслуживание трафика. При этом, как показали результаты моделирования, реализуемая структура виртуальной топологии сети преимущественно определяется поступающим в сеть трафиком. Показано, что установление прямого светового пути является обоснованным лишь при превышении поступающим в сеть трафиком определенного порога, величина которого зависит от текущей структуры доступных путей.

Список литературы:

1. Open transport switch: a software defined networking architecture for transport networks / Sadasivarao A., Syed S., Pan P. [and other] // Second ACM SIGCOMM workshop on Hot topics in software defined networking, HotSDN '13: proc. of the conf. – 2013.– P. 115 – 120.
2. Energy Efficiency in Telecom Optical Networks / Yi Zhang, Chowdhury P., Tornatore M., Mukherjee B. // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2010. – Vol.12, Is. 4. – P. 441 – 458.
3. Yetginer E., Rouskas G.N. Power Efficient Traffic Grooming in Optical WDM Networks // IEEE Global Telecommunications Conference, GLOBECOM 2009, Nov. 30 2009-Dec. 4 2009: proc. of the conf. – 2009. – P. 1 – 6.
4. Поповский В.В., Лемешко А.В., Евсеева О.Ю. Математические модели телекоммуникационных систем. Часть 1. Математические модели функциональных свойств телекоммуникационных систем [Электронный ресурс] // Проблемы телекоммуникаций. – 2011. – № 2 (4). – С. 3 – 41.
5. Evseeva O.Yu., Ilyashenko Ye.N., Khader M.B. Method for optimal resource management of transport software-defined networks // Telecommunications and Radio Engineering. – 2015. – Vol. 74, Is. 19. – P. 1715-1728.
6. Лемешко А.В., Евсеева О.Ю. Тензорная модель многопутевой маршрутизации с гарантиями качества обслуживания одновременно по множеству разнородных показателей [Электронный ресурс] // Проблемы телекоммуникаций. – 2012. – № 4 (9). – С. 16 – 31. – Режим доступа: http://pt.journal.kh.ua/2012/4/1/124_lemeshko_tensor.pdf.
7. Лемешко А.В., Гаркуша С.В. Обеспечение качества обслуживания в условиях согласованного решения задач управления трафиком в телекоммуникационной сети [Электронный ресурс] // Проблемы телекоммуникаций. – 2014. – № 2 (14). – С. 52-66. – Режим доступа: http://pt.journal.kh.ua/2014/2/1/142_lemeshko_qos.pdf.
8. Musumeci F., Tornatore M., Pattavina A. A Power Consumption Analysis for IP-over-WDM Core Network Architectures // IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking. – 2012. – Vol. 4 (1). – P. 108-117.
9. Кучеренко Ю. Ф., Шубин Е.В., Гузько О.Н. Среднее время задержки пакета в сети передачи данных с самоподобным трафиком // Системы обработки информации. – 2005. – № 5(45). – С. 69-73.
10. Power consumption modeling in optical multilayer networks / W. Van Heddeghem, F. Idzikowski, W. Vereecken [and other] // Photonic Network Communications. – 2012. – 24(2). – P. 86-102.