

УДК 621.391

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КАЧЕСТВА СИСТЕМ СЛОЖНОЙ СТРУКТУРЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕНЗОРОВ НА ОСНОВЕ ДЕКОМПОЗИЦИИ



[И.В. СТРЕЛКОВСКАЯ,](#)
[И.Н. СОЛОВСКАЯ, Г.Г. СМАГЛЮК](#)

Одесская национальная
академия связи им. А.С. Попова

Abstract - Active implementation of NGN networks requires a qualitatively new technological development of the transport network, which will be based on MPLS technology and will ensure the effective traffic transmission with QoS parameters support, high scalability and broad abilities of configuration and integration with external networks. Certainly, the architecture of such network has high dimensionality and rather unwieldy and complicated.

In this work is considered method of obtaining quality characteristics of the systems with complex structure using tensor-based decomposition. Managed objects of this structure are: the core network IP/MPLS, geographically distributed VPN and interaction links PE-CE, the totality of which forms MPLS/VPN network architecture. Combination of the decomposition and tensor methods of research enabled us to calculate for each network object the desired quality characteristics: packet delay and packet queue length, which allowed use of obtained data for the original network.

Considered an example of obtaining the delay time and the packet queues length for whole network MPLS/VPN and for each object separately. Input data and results of quality characteristics of MPLS/VPN network calculation have been presented in the form of block matrices, that allows obtain the results simultaneously for all virtual subnets.

Анотація – Отримані характеристики якості систем складної структури з використанням тензорів на основі декомпозиції. Як об'єкти цієї структури розглянуті опорна мережа IP/MPLS, територіально-розподілені VPN та ділянки взаємодії PE-CE, які складають досліджувану архітектуру мережі MPLS/VPN. Розглянуто приклад знаходження пропускних здатностей, затримок та довжини пакетної черги як для мережі MPLS/VPN в цілому, так і для кожного об'єкту окремо.

Аннотация – Получены характеристики качества систем сложной структуры с использованием тензоров на основе декомпозиции. В качестве объектов этой структуры рассмотрены опорная сеть IP/MPLS, территориально-распределенные VPN и участки взаимодействия PE-CE, что составляет исследуемую архитектуру сети MPLS/VPN. Рассмотрен пример нахождения пропускных способностей, задержек и длин пакетных очередей как для сети MPLS/VPN в целом, так и для каждого объекта в отдельности.

Характерной особенностью развития современных телекоммуникаций является внедрение сетей нового поколения NGN (Next Generation Network), которые являются конвергентными и обладают свойством гетерогенности, т.к. одновременно используют значительное количество технологий и протоколов. Активное внедрение технологий мультисервисного доступа, пакетной коммутации в сетях NGN требует качественно нового технологического развития транспортной сети, которая на магистральном уровне будет использовать технологию многопротокольной коммутации меток MPLS (MultiProtocol Label Switching) и позволит обеспечить эффективную передачу трафика с поддержкой параметров QoS (Quality of Service), обеспечит высокую масштабируемость сети, широкие возможности конфигурирования и интеграции с

внешними сетями. Безусловно, архитектура такой сети обладает большой размерностью, достаточно громоздка и сложна [1,2]. В качестве системы сложной структуры рассмотрим архитектуру сети *MPLS/VPN* (рис. 1), которая согласно рекомендации *RFC 2547bis* базируется на опорной магистральной сети *MPLS* и подключенных к ней изолированных территориально-распределенных виртуальных сетей *VPN* [1, 2]. Функционирование опорной магистральной сети *IP/MPLS* обеспечивают внутренние маршрутизаторы *P* (*Provider router*), которые не взаимодействуют с *VPN* ввиду отсутствия маршрутной информации, и пограничные маршрутизаторы *PE* (*Provider Edge router*), которые функционально более сложны и поддерживают маршрутизацию к сетям *VPN* за счет использования таблиц *VRF* (*VPN routing and forwarding*). При этом изолированные *VPN* построены на базе маршрутизаторов *LSR* (*Label Switching Router*) и взаимодействуют с опорной сетью только через пограничные маршрутизаторы *CE* (*Customer Edge router*), установленные на границе каждой *VPN* [2, 3].

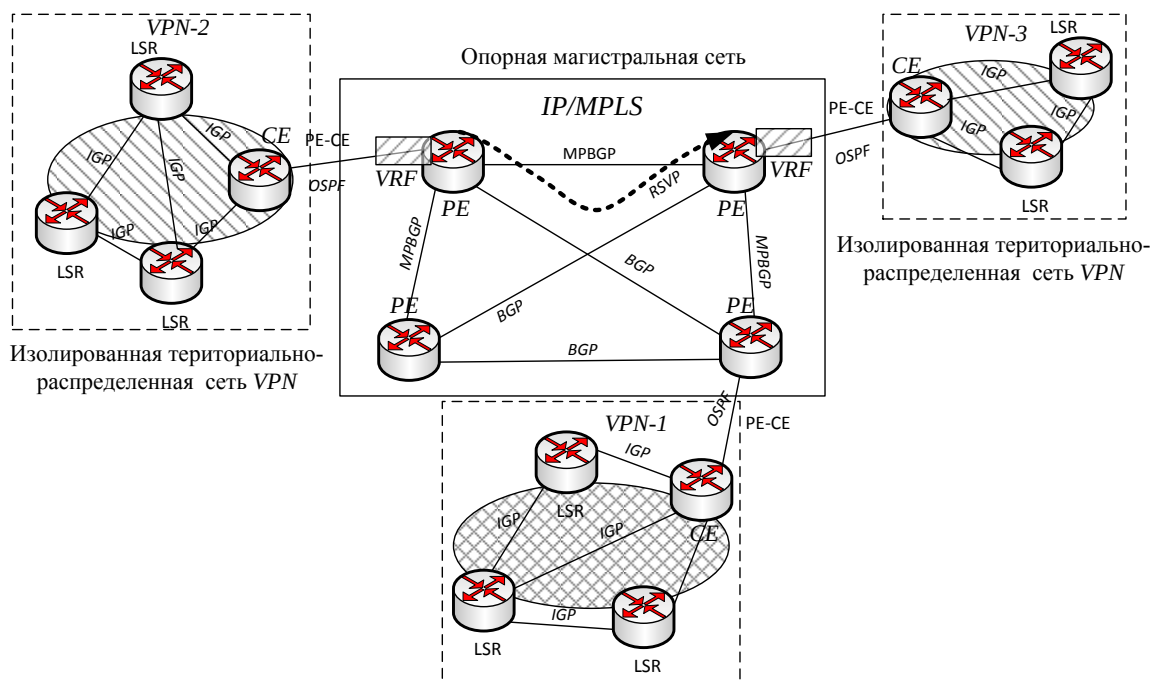


Рис. 1. Архитектура сети *MPLS/VPN*

Рациональное использование сетевых ресурсов в сетях *MPLS/VPN* достигается за счет применения различных протоколов маршрутизации (*OSPF*, *RSVP*, *BGP*, *RIP*), обеспечивающих оптимальную загрузку, выбор оптимального маршрута и поддержку необходимых параметров *QoS* всех сетевых элементов. В опорной сети *IP/MPLS* требуемое качество обслуживания регулирования ресурсов сети обеспечивается протоколом *RSVP/BGP*, в виртуальных *VPN* – протоколом *IGP* (на основе выбора кратчайшего пути), на участке *PE-CE* – протоколом *OSPF* (на основе данных о пропускной способности) [1-3].

На этапе проектирования и внедрения важнейшей задачей, способствующей формированию и развитию современных телекоммуникационных сетей, является задача оценки характеристик качества сети в целом, а также отдельных ее фрагментов. Од-

нако задача анализа характеристик качества реальных сетевых архитектур большой размерности и сложности достаточно громоздка, а получение аналитических решений, которые будут учитывать сложность топологии и функциональных свойств сетевых объектов, крайне затруднительна. Ранее такая задача для телекоммуникационной системы более простой структуры была решена авторами в работах [4, 5]. Для исследования телекоммуникационных систем сложной структуры предлагается использовать тензорный метод, предложенный авторами в [4, 5], применяя декомпозицию.

Найдем характеристики качества сети *MPLS/VPN*. Для рассматриваемой сети наиболее значимым, с точки зрения эффективного использования ресурсов сети с заданными параметрами качества обслуживания в сети *MPLS/VPN*, является участок соединения *PE-CE*, для которого с учетом возможностей протокола динамической маршрутизации *OSFP* должны быть обеспечены гарантированные значения задержек пакетов, значения пропускных способностей и вероятности потерь пакетов при условии эффективного использования ресурсов сети.

Пусть задана исходная структура сети *MPLS/VPN*, представленная на рис. 2, состоящая из опорной сети *IP/MPLS*, построенной на базе внутренних маршрутизаторов *P* и пограничных маршрутизаторов *PE*, и *k* территориально-распределенных виртуальных подсетей *VPN* ($k=3$), построенных на базе пограничных маршрутизаторов *CE* и *LSR*.

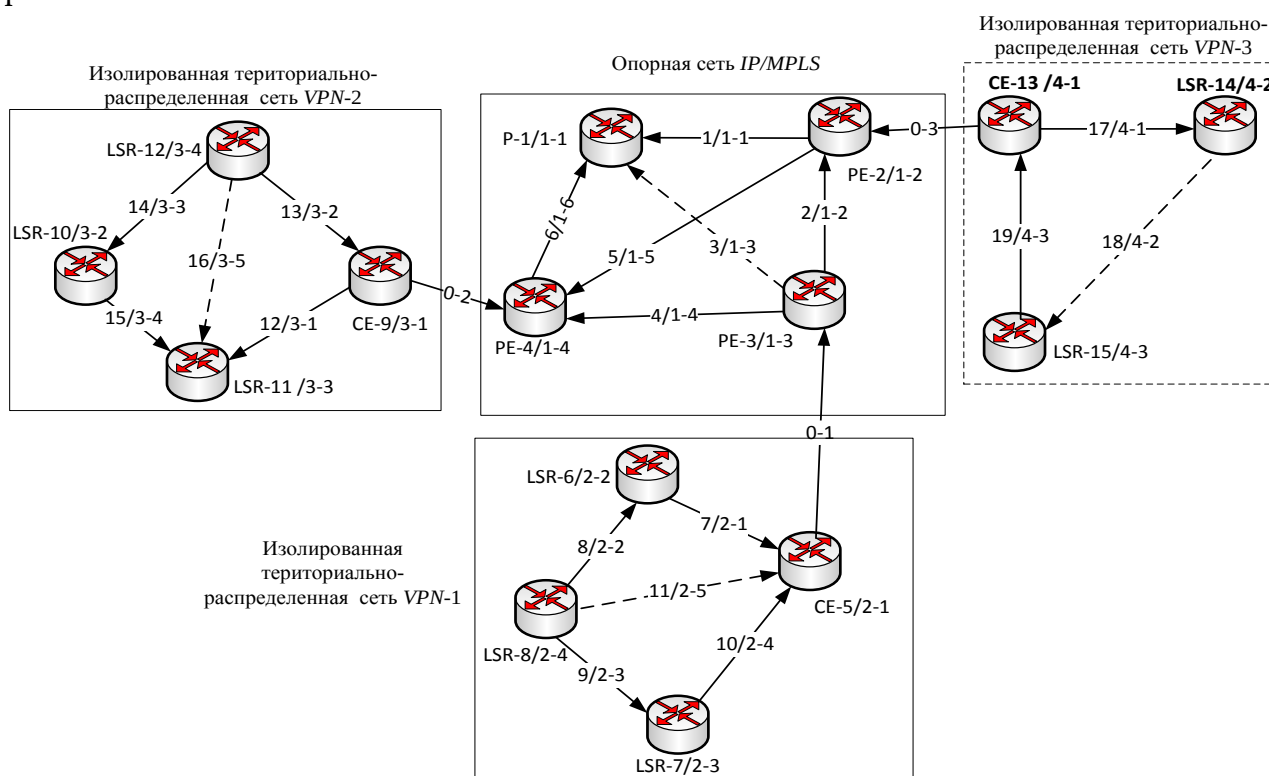


Рис. 2. Структурная схема сети *MPLS/VPN*

Обозначим маршрутизаторы через $A-i/j-p$, где A – тип маршрутизатора (P , PE , CE , LSR), i – порядковый номер маршрутизатора, j – номер подсети, p – номер маршрутизатора в данной подсети. Аналогичная нумерация применяется и для

трактов передачи. Рассматриваемая сеть состоит из m узлов ($m=15$), моделирующих маршрутизаторы, связанных между собой n ветвями – трактами ($n=19$).

Определим основные характеристики качества сети *MPLS/VPN*: значения минимального времени задержки пакетов, длины пакетной очереди для каждого из маршрутизаторов (P и PE) и трактов соединений в опорной сети *IP/MPLS*; аналогичные значения для каждого из маршрутизаторов (CE и LSR) и связывающих их трактов территориально-распределенной виртуальной подсети *VPN*.

Так как сеть *MPLS/VPN* имеет большую размерность и сложную топологическую структуру, то целесообразно применить метод декомпозиции для этой сети [6, 7]. Под декомпозицией понимают разделение сети на конечное количество элементов, каждый из которых обладает свойствами системы, с последующим независимым исследованием этих элементов [6, 7]. Совместное использование метода декомпозиции и тензорных методов исследования позволит рассчитать характеристики качества, такие как длина пакетной очереди и задержки передачи пакетов в узлах, для каждой подсети и каждого объекта сети, после чего возможно перенести эти решения на исходную сеть.

Для этого воспользуемся следующим алгоритмом:

1) выполним декомпозицию сети *MPLS/VPN* с целью рассмотрения отдельно опорной магистральной сети и k изолированных территориально-распределенных подсетей *VPN* путем удаления соединений *PE-CE*;

2) определим необходимые характеристики качества обслуживания для каждой изолированной подсети *VPN*;

3) определим необходимые характеристики качества обслуживания в трактах *PE-CE* между подсетями с учетом решений, полученных в пункте 2.

Аналогично [4, 5], для определения необходимых характеристик качества обслуживания, воспользуемся формулой Литтла [8-10]:

$$h^i = l^i \cdot \tau_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где h^i – длина очереди, в которой помещаются пакеты для передачи в i -м тракте сети *MPLS/VPN*; l^i – интенсивность трафика в i -м тракте сети *MPLS/VPN*; τ_i – средняя задержка пакетов в i -м тракте сети *MPLS/VPN*; n – общее число трактов сети. Выражение (1) является инвариантным уравнением.

По аналогии с тензорным подходом, предложенным Г. Кроном и развитым в работах [4, 5, 8, 10], структура сети *MPLS/VPN* представляется одномерной сетью, состоящей из m узлов, которая, в свою очередь, определяет дискретное m -мерное пространство. При этом ветви сети $v_i, i = \overline{1, n}$ моделируют тракты сети *MPLS/VPN*, а узлы сети *MPLS/VPN* $N_j, j = \overline{1, m}$ – маршрутизаторы сети. Во введенном m -мерном пространстве произведем тензорное описание в рамках узловых сетей. В качестве информативных систем координат (СК) введем в рассмотрение две координатные системы. Первая – система координат ветвей, вторая – система координат узловых пар сети. В узловых сетях в качестве воздействующей переменной в уравнении (1) выступает величина h^i , а в качестве переменной отклика – задержка τ_i [10].

Тогда уравнение (1) можно представить в векторно-матричном виде в системах координат ветвей (v) и узловых пар (η) для рассматриваемой сети *MPLS/VPN*:

$$H_{v_MPLS/VPN} = L_{v_MPLS/VPN} \cdot T_{v_MPLS/VPN}, \quad (2)$$

где вектор $H_{v_MPLS/VPN}$ определяет длину пакетной очереди в системе координат ветвей сети, $T_{v_MPLS/VPN}$ – вектор задержек передачи пакетов в системе координат ветвей сети, а L_v – диагональная матрица интенсивностей трафика в системе координат ветвей сети, t – знак транспонирования матрицы;

$$H_{\eta_MPLS/VPN} = L_{\eta_MPLS/VPN} T_{\eta_MPLS/VPN}, \quad (3)$$

где $L_{v_MPLS/VPN}$ и $L_{\eta_MPLS/VPN}$ – дважды контравариантные тензоры интенсивностей трафика в ветвях и узлах сети соответственно, $H_{v_MPLS/VPN}$ и $H_{\eta_MPLS/VPN}$ – контравариантные тензоры длин пакетных очередей в ветвях и узлах сети соответственно, $T_{v_MPLS/VPN}$ и $T_{\eta_MPLS/VPN}$ – ковариантные тензоры времени задержки передачи пакетов в ветвях и узлах сети соответственно.

Формулы преобразования между системами координат определяются согласно тензорному методу узловой сети, предложенному в работах [4, 5, 8, 10]:

$$H_{\eta_MPLS/VPN} = B_{\eta_MPLS/VPN} \cdot H_{v_MPLS/VPN}^+, \quad (4)$$

$$L_{\eta_MPLS/VPN} = B_{\eta_MPLS/VPN} \cdot L_{v_MPLS/VPN} \cdot B_{\eta_MPLS/VPN}^t, \quad (5)$$

$$T_{v_MPLS/VPN} = B_{\eta_MPLS/VPN}^t \cdot T_{\eta_MPLS/VPN}, \quad (6)$$

где $H_{\eta_MPLS/VPN}$ – длина пакетной очереди в узлах сети *MPLS/VPN*, $B_{\eta_MPLS/VPN}$ – матрица базисных разрезов сети, $H_{v_MPLS/VPN}^+$ – длина исходящей пакетной очереди, $L_{\eta_MPLS/VPN}$ и $L_{v_MPLS/VPN}$ – интенсивности трафика в узлах и ветвях сети соответственно, $T_{v_MPLS/VPN}$ и $T_{\eta_MPLS/VPN}$ – задержки передачи пакетов в ветвях и узлах сети *MPLS/VPN* соответственно.

Выполним разделение сети *MPLS/VPN* путем удаления ветвей, соединяющих опорную сеть *IP/MPLS* с виртуальными территориально-распределенными подсетями *VPN*. Таким образом, получаем независимые подсети – опорную магистральную сеть *IP/MPLS* и территориально-распределенные подсети *VPN*. Тогда, для каждой из полученных изолированных подсетей, возможно применить узловой тензорный метод расчета задержек передачи пакетов и длины пакетной очереди в ветвях [4, 5].

Для одновременного решения задачи расчета качественных характеристик сети *MPLS/VPN* во всех виртуальных подсетях зададим интенсивности трафика в ветвях в виде квадратной матрицы $L_{v_MPLS/VPN}^n$ n -го порядка:

$$L_{v_MPLS/VPN}^n = \begin{bmatrix} L_{v_VPN}^{1,j_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{v_VPN}^{2,j_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & L_{v_VPN}^{k,j_k} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_{v_MPLS}^{j_{MPLS}} \end{bmatrix},$$

где $L_{v_VPN}^{i,j_i}$ – диагональная матрица j_i -ого порядка $i = \overline{1, k}$, $j_1 + j_2 + \dots + j_k + j_{MPLS} = n$, $k \leq n-1$, на главной диагонали которой находятся интенсивности трафика в ветвях VPN , $L_{v_MPLS}^{j_{MPLS}}$ – диагональная матрица интенсивностей трафика в ветвях опорной подсети $IP/MPLS$, k – количество изолированных подсетей.

Для использования узлового тензорного метода рассмотрения сети в исходную структуру каждой территориально-распределенной подсети VPN и опорной сети $IP/MPLS$ вводим мнимые ветви, показанные на рис. 2 пунктирными линиями. Согласно структурной модели сети $MPLS/VPN$, которая включает в себя опорную и все территориально-распределенные виртуальные подсети, и заданным направлениям передачи формируем базисную матрицу разрезов сети $B_{\eta_MPLS/VPN}$:

$$B_{\eta_MPLS/VPN} = \begin{bmatrix} B_{\eta_VPN}^{1,j_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B_{\eta_VPN}^{2,j_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & B_{\eta_VPN}^{k,j_k} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & B_{\eta_MPLS}^{j_{MPLS}} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где $B_{\eta_VPN}^{i,j_i}$ – матрица базисных разрезов k виртуальных подсетей VPN , $i = \overline{1, k}$, $k \leq n-1$, $B_{\eta_MPLS}^{j_{MPLS}}$ – матрица базисных разрезов опорной сети $IP/MPLS$, k – количество изолированных подсетей.

Для определения тензора интенсивностей трафика в СК узловых пар $L_{\eta_MPLS/VPN}$ воспользуемся формулой (5). Нетрудно определить, что $L_{\eta_MPLS/VPN}$ будет иметь вид квадратной матрицы m -го порядка:

$$\begin{bmatrix} L_{\eta_VPN}^{1,j_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{\eta_VPN}^{2,j_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & L_{\eta_VPN}^{k,j_k} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_{\eta_MPLS}^{j_{MPLS}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{\eta_VPN}^{1,j_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B_{\eta_VPN}^{2,j_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & B_{\eta_VPN}^{k,j_k} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & B_{\eta_MPLS}^{j_{MPLS}} \end{bmatrix} \times$$

$$\times \begin{bmatrix} L_{v_VPN}^{1,j_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{v_VPN}^{2,j_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & L_{v_VPN}^{k,j_k} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_{v_MPLS}^{j_{MPLS}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{\eta_VPN}^{1,j_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B_{\eta_VPN}^{2,j_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & B_{\eta_VPN}^{k,j_k} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & B_{\eta_MPLS}^{j_{MPLS}} \end{bmatrix}^t,$$

где $L_{\eta_VPN}^{i,j_i}$ и $L_{\eta_MPLS}^{j_{MPLS}}$ – диагональные матрицы интенсивностей трафика в узлах подсетей VPN и опорной сети IP/MPLS соответственно, $L_{v_VPN}^{i,j_i}$ и $L_{v_MPLS}^{j_{MPLS}}$ – диагональные матрицы интенсивностей трафика в ветвях подсети VPN и опорной сети IP/MPLS, $B_{\eta_VPN}^{i,j_i}$ и $B_{\eta_MPLS}^{j_{MPLS}}$ – матрицы базисных разрезов виртуальных подсетей VPN и опорной сети IP/MPLS соответственно, $i = \overline{1, k}$, $k \leq n-1$, k – количество подсетей VPN.

Для определения длины пакетной очереди $H_{\eta_MPLS/VPN}$ в буферных устройствах маршрутизаторов сети MPLS/VPN, используя выражение (4), получаем:

$$\begin{bmatrix} H_{\eta_VPN}^{1,j_1} \\ H_{\eta_VPN}^{2,j_2} \\ \vdots \\ H_{\eta_VPN}^{k,j_k} \\ H_{\eta_MPLS}^{j_{MPLS}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{\eta_VPN}^{1,j_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B_{\eta_VPN}^{2,j_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & B_{\eta_VPN}^{k,j_k} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & B_{\eta_MPLS}^{j_{MPLS}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{v_VPN}^{+,1} \\ H_{v_VPN}^{+,2} \\ \vdots \\ H_{v_VPN}^{+,k} \\ H_{v_MPLS}^{+} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где $H_{\eta_VPN}^{i,j_i}$ и $H_{\eta_MPLS}^{j_{MPLS}}$ – тензоры длин пакетных очередей буферных устройств маршрутизаторов подсети VPN и опорной сети IP/MPLS соответственно, $B_{\eta_VPN}^{i,j_i}$ и $B_{\eta_MPLS}^{j_{MPLS}}$ – матрицы базисных разрезов подсетей VPN и опорной сети IP/MPLS соответственно, $H_{v_VPN}^{+,j_i}$ и $H_{v_MPLS}^{+}$ – тензоры исходящей пакетной очереди маршрутизаторов подсети VPN и опорной сети IP/MPLS соответственно, $i = \overline{1, k}$, $k \leq n-1$, k – количество подсетей VPN.

Для нахождения времени задержки передачи пакетов в узлах территориально-распределенных подсетей VPN и опорной сети IP/MPLS воспользуемся следующим выражением, вытекающим из (3):

$$T_{\eta_MPLS/VPN} = [L_{\eta_MPLS/VPN}]^{-1} \cdot H_{\eta_MPLS/VPN}. \quad (9)$$

Как видно из (9), тензор задержек передачи пакетов $T_{\eta_MPLS/VPN}$ имеет вид вектора размерности $1 \times m$:

$$\begin{bmatrix} T_{\eta_VPN}^{1,j_1} \\ T_{\eta_VPN}^{2,j_2} \\ \vdots \\ T_{\eta_VPN}^{k,j_k} \\ T_{\eta_MPLS}^{j_{MPLS}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{\eta_VPN}^{1,j_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{\eta_VPN}^{2,j_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & L_{\eta_VPN}^{k,j_k} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_{\eta_MPLS}^{j_{MPLS}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} H_{\eta_VPN}^{1,j_1} \\ H_{\eta_VPN}^{2,j_2} \\ \vdots \\ H_{\eta_VPN}^{k,j_k} \\ H_{\eta_MPLS}^{j_{MPLS}} \end{bmatrix}, \quad (9')$$

где $L_{v_VPN}^{i,j_i}$ и $L_{v_MPLS}^{j_{MPLS}}$ – диагональные матрицы интенсивностей трафика в ветвях подсети VPN и опорной подсети IP/MPLS соответственно, $T_{\eta_VPN}^{i,j_i} = (\tau_{\eta_VPN}^1 \quad \tau_{\eta_VPN}^2 \quad \dots \quad \tau_{\eta_VPN}^j)^t$ и $T_{\eta_MPLS}^{j_{MPLS}} = (\tau_{\eta_MPLS}^1 \quad \tau_{\eta_MPLS}^2 \quad \dots \quad \tau_{\eta_MPLS}^j)^t$ –

векторы задержек передачи пакетов в узлах изолированных подсетей VPN и опорной сети IP/MPLS соответственно, $i = \overline{1, k}$, k – количество подсетей.

Определим тензор задержек передачи пакетов в ветвях территориально-распределенных подсетей VPN и опорной сети IP/MPLS согласно формуле (6) и получим:

$$\begin{bmatrix} T_{v_VPN}^{1,j_1} \\ T_{v_VPN}^{2,j_2} \\ \vdots \\ T_{v_VPN}^{k,j_k} \\ T_{v_MPLS}^{j_{MPLS}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{\eta_VPN}^{1,j_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B_{\eta_VPN}^{2,j_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & B_{\eta_VPN}^{k,j_k} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & B_{\eta_MPLS}^{j_{MPLS}} \end{bmatrix}^t \begin{bmatrix} T_{\eta_VPN}^{1,j_1} \\ T_{\eta_VPN}^{2,j_2} \\ \vdots \\ T_{\eta_VPN}^{k,j_k} \\ T_{\eta_MPLS}^{j_{MPLS}} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где $T_{v_VPN}^{i,j_i}$ и $T_{v_MPLS}^{j_{MPLS}}$ – векторы задержек передачи пакетов в трактах подсетей VPN и опорной сети IP/MPLS соответственно, $B_{\eta_VPN}^{i,j_i}$ и $B_{\eta_MPLS}^{j_{MPLS}}$ – матрицы базисных разрезов виртуальной подсети VPN и опорной сети IP/MPLS соответственно, $T_{\eta_VPN}^{i,j_i}$ и $T_{\eta_MPLS}^{j_{MPLS}}$ – векторы задержек передачи пакетов в узлах подсети VPN и опорной сети IP/MPLS соответственно, $i = \overline{1, k}$, $k \leq n-1$, k – количество подсетей.

Для расчета вектора длины пакетной очереди $H_{v_MPLS/VPN}$ в трактах сети MPLS/VPN воспользуемся формулой (2) и получим:

$$\begin{bmatrix} H_{v_VPN}^{1,j_1} \\ H_{v_VPN}^{2,j_2} \\ \vdots \\ H_{v_VPN}^{k,j_k} \\ H_{v_MPLS}^{j_{MPLS}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{v_VPN}^{1,j_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{v_VPN}^{2,j_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & L_{v_VPN}^{k,j_k} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_{v_MPLS}^{j_{MPLS}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{v_VPN}^{1,j_1} \\ T_{v_VPN}^{2,j_2} \\ \vdots \\ T_{v_VPN}^{k,j_k} \\ T_{v_MPLS}^{j_{MPLS}} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

где $H_{v_VPN}^{i,j_i}$ и $H_{v_MPLS}^{j_{MPLS}}$ – векторы длин очередей пакетов в ветвях подсетей VPN и опорной сети IP/MPLS соответственно, $L_{v_VPN}^{i,j_i}$ и $L_{v_MPLS}^{j_{MPLS}}$ – диагональные матрицы интенсивностей трафика в трактах подсетей VPN и опорной подсети IP/MPLS соответственно, $T_{v_VPN}^{i,j_i}$ и $T_{v_MPLS}^{j_{MPLS}}$ – векторы задержек передачи пакетов в ветвях подсетей VPN и опорной сети IP/MPLS соответственно, $i = \overline{1, k}$, k – количество подсетей.

Определив значения минимального времени задержки пакетов и длины пакетной очереди в опорной сети IP/MPLS и в каждой виртуальной подсети VPN, получаем характеристики всех элементов сети, необходимых для этапов установления соединения между VPN, за исключением соединений PE-CE. Для их расчета рассмотрим модель сети, в которой все территориально-распределенные подсети VPN представлены в качестве узлов сети, подключенных к опорной магистральной сети IP/MPLS, также представленной виде узла, а соединения PE-CE являются ветвями модели сети. Построим матрицу базисных разрезов сети B_{η_PE-CE} согласно рис. 2, объектами которой являются матрицы связности всех рассматриваемых подсетей:

$$B_{\eta_PE-CE} = \begin{bmatrix} B_{\eta_PE-CE}^{1,j_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B_{\eta_PE-CE}^{2,j_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & B_{\eta_PE-CE}^{k,j_k} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

где $B_{\eta_PE-CE}^{i,j_i}$ матрица базисных разрезов рассматриваемой подсети *MPLS/VPN*, $i = \overline{1, k}$, k – количество виртуальных подсетей *VPN*.

Значения задержек передачи пакетов в узлах определяются как сумма задержек передачи пакетов в каждой подсети. Используя значения $\tau_{\eta_MPLS/VPN}^{i,j}$, полученные из (9'), определим задержки передачи пакетов в подсетях $\tau_{\eta_PE-CE}^i$:

$$\tau_{\eta_PE-CE}^i = \sum_{j=1}^p \tau_{\eta_MPLS/VPN}^{i,j}, \quad (13)$$

где $\tau_{\eta_PE-CE}^i$ – задержки передачи пакетов в i -той сети, $\tau_{\eta_MPLS/VPN}^{i,j}$ – задержки передачи пакетов в j -том ($j = \overline{1, p}$) маршрутизаторе i -той сети ($i = \overline{1, k+1}$, k – количество виртуальных подсетей *VPN*), p – количество маршрутизаторов в i -той сети.

Аналогично выражению (6) определим задержки передачи пакетов в соединениях *PE-CE* T_{v_PE-CE} как:

$$T_{v_PE-CE} = B_{\eta_PE-CE}^t \cdot T_{\eta_PE-CE}, \quad (14)$$

то есть

$$\begin{bmatrix} \tau_{v_PE-CE}^1 \\ \tau_{v_PE-CE}^2 \\ \vdots \\ \tau_{v_PE-CE}^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{\eta_PE-CE}^{1,j_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B_{\eta_PE-CE}^{2,j_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & B_{\eta_PE-CE}^{k,j_k} \end{bmatrix}^t \begin{bmatrix} \tau_{\eta_PE-CE}^1 \\ \tau_{\eta_PE-CE}^2 \\ \vdots \\ \tau_{\eta_PE-CE}^{k+1} \end{bmatrix},$$

где $\tau_{\eta_PE-CE}^i$ – задержка пакетов в i -й подсети *VPN*, $\tau_{v_PE-CE}^i$ – задержка пакетов в соединении *PE-CE* i -той подсети *VPN*, $i = \overline{1, k}$, k – количество подсетей *VPN*.

Длина пакетной очереди в соединениях *PE-CE* в системе координат ветвей сети H_{v_PE-CE} определяется согласно формуле (2) как:

$$H_{v_PE-CE} = L_{v_PE-CE} \cdot T_{v_PE-CE}, \quad (15)$$

то есть

$$\begin{bmatrix} h_{v_PE-CE}^1 \\ h_{v_PE-CE}^2 \\ \vdots \\ h_{v_PE-CE}^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{v_PE-CE}^1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & l_{v_PE-CE}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & l_{v_PE-CE}^{k+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_{v_PE-CE}^1 \\ \tau_{v_PE-CE}^2 \\ \vdots \\ \tau_{v_PE-CE}^{k+1} \end{bmatrix},$$

где $l_{v_PE-CE}^i$ – интенсивность трафика в трактах *PE-CE*, $h_{v_PE-CE}^i$ – длина пакетной очереди в тракте на участке *PE-CE* i -той подсети, $i = \overline{1, k}$, k – количество подсетей *VPN*.

Таким образом, с помощью предложенной методики и выражений (10) и (11) возможно определить длины пакетных очередей $H_{v_MPLS/VPN}$ и задержки передачи пакетов $T_{v_MPLS/VPN}$ в трактах территориально-распределенных виртуальных сетей VPN и опорной сети IP/MPLS. Также с помощью выражений (8) и (9) возможно определить длины пакетных очередей $H_{\eta_MPLS/VPN}$ и задержки передачи пакетов $T_{\eta_MPLS/VPN}$ в маршрутизаторах территориально-распределенных виртуальных сетей VPN и опорной сети IP/MPLS.

Для участка PE-CE, соединяющего опорную сеть IP/MPLS и изолированные подсети VPN, определены задержки передачи пакетов T_{v_PE-CE} и длины пакетных очередей H_{v_PE-CE} в трактах PE-CE.

Вышеизложенная методика была применена для решения задачи на конкретном примере для сети MPLS/VPN, представленной на рис. 2, исходные данные для расчета приведены в табл. 1.

Таблица 1. Значения интенсивностей трафика в ветвях сети

Номер ветви	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Интенсивность трафика, тыс. пак/с	200	800	0	500	800	400	800	900	400	300	0
Номер ветви	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Интенсивность трафика, тыс. пак/с	500	600	900	300	0	900	0	600	1200	1300	1400

В качестве примера рассчитаны значения задержки передачи пакетов в трактах и маршрутизаторах виртуальных сетей VPN и опорной сети IP/MPLS, а также в соединениях PE-CE. Результаты расчета показаны на рис. 3.

Заключение

1. Применение метода декомпозиции для систем сложной топологической структуры позволило исследовать более простые объекты – подсети с последующим переносом результатов на исходную структуру. Таким образом, значительно упрощается процесс нахождения характеристик качества сложной структуры и уменьшается количество вычислительных операций.

2. Использование метода декомпозиции совместно с тензорным методом для сети MPLS/VPN позволило осуществить одновременное исследование структурных свойств и функциональных характеристик сети, а также получение результатов оценки длин пакетных очередей и задержек передачи пакетов в аналитическом виде.

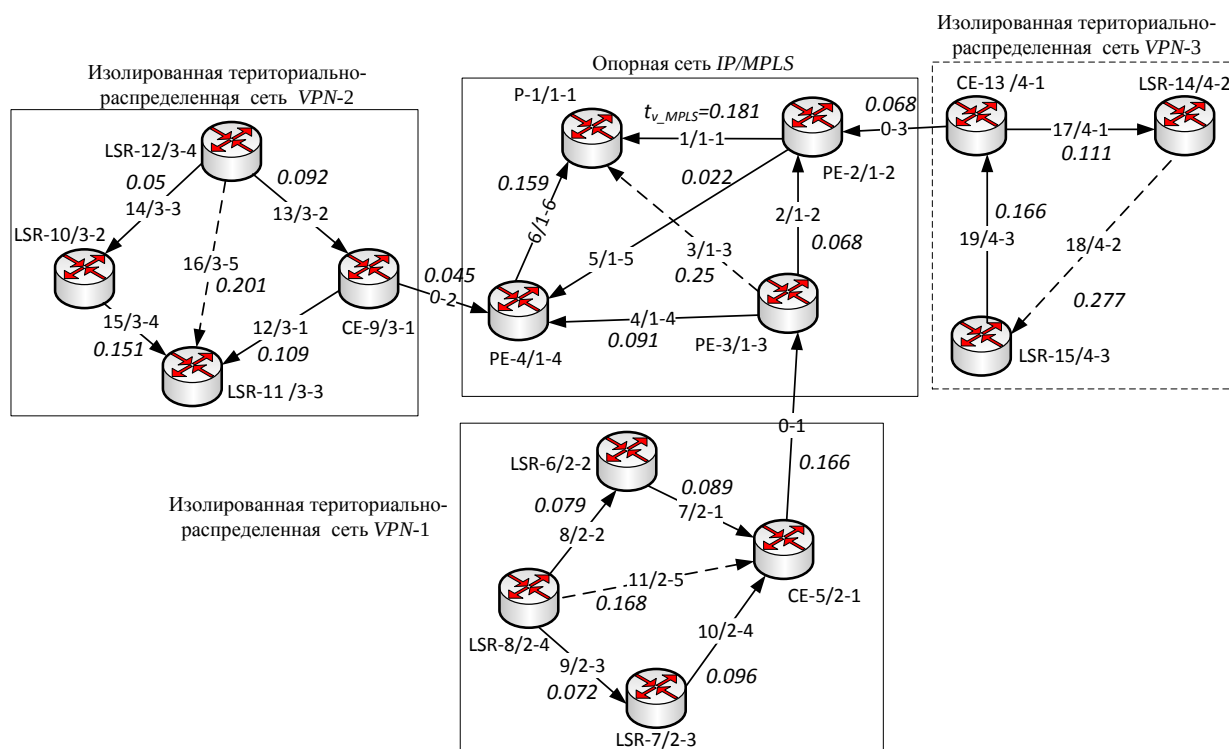


Рис. 3. Результаты расчета сети MPLS/VPN

Список литературы:

1. Воробієнко П.П., Нікітюк Л.А., Резніченко П.І. Телекомунікаційні та інформаційні мережі: Підручник для вищих навчальних закладів –К: САММІТ-КНИГА, 2010. – 640 с.
2. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Учебник для вузов 3-е изд. – СПб: Питер, 2008. – 958 с.
3. Захватов М. Построение виртуальных частных сетей (VPN) на базе технологии MPLS. – М.: Cisco Systems, 2007. – 52 с.
4. Стрелковская И.В. Использование тензорного метода при расчете ТКС, представленной узловой сетью [Электронный ресурс] / И.В. Стрелковская, И.Н. Соловская // Проблемы телекоммуникаций. – 2010. – № 1 (1). – С. 68 – 75. – Режим доступа к журн.: http://pt.journal.kh.ua/2010/1/1/101_strelkovskaya_tensor.pdf.
5. Стрелковская И.В. Решение задач управления трафиком в сетях MPLS-TE с использованием тензорных моделей / И.В. Стрелковская, И.Н. Соловская, Г.Г. Смаглюк // Цифрові технології. – 2010. – №8. – С. 57-66.
6. Сохор В.Н. Вычислительные модели и алгоритмы тензорного анализа сетей: Учебно-методическое пособие. Изд. ППИ, 2008. – С. 93-103.
7. Юдин Д.Б., Гольштейн Е.Г. Задачи и методы линейного программирования. – М.: Советское радио, 1964. – 493с.
8. Крон Г. Тензорный анализ сетей. – М.: Сов. Радио, 1978. – 720 с.
9. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.
10. Математичні основи теорії телекомунікаційних систем / Поповський В.В., Сабурова С.О., Олійник В.Ф. та інші; за загальною редакцією В.В. Поповського. – Х.: Тов. «Компанія СМІТ», 2006. – 564 с.