

УДК 621.391

**РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ТРАФИКОМ В СЕТЯХ MPLS-TE
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕНЗОРНЫХ МОДЕЛЕЙ**

СТРЕЛКОВСКАЯ И. В., СОЛОВСКАЯ И.Н., СМАГЛЮК Г.Г.

Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова

**SOLUTION OF PROBLEMS OF TRAFFIC MANAGEMENT IN MPLS-TE
NETWORKS WITH THE USE OF TENSOR MODELS**

STRELKOVSKAYA I.V., SOLOVSKAYA I.N., SMAGLUK G.G.

Odessa national academy of telecommunications named after O.S. Popov

***Аннотация.** Предложено решение задачи управления трафиком в сетях MPLS-TE с применением тензорных моделей. На конкретном примере показано решение задачи маршрутизации трафика в сети MPLS-TE/FRR, получены результаты эффективного использования сетевых ресурсов с помощью организации TE-tunnel быстрой перемаршрутизации FRR при гарантированном минимальном времени доставки пакетов.*

***Annotation.** Was offered the solution of traffic management problem in MPLS-TE networks with the use of tensor models. On the concrete example was shown the solution of traffic routing problem in MPLS-TE/FRR network and obtained results of effective network resources use with the help of TE-tunnel fast rerouting FRR organization at a guaranteed minimal packet delivering time.*

Постановка проблемы. Характерной особенностью развития современных телекоммуникаций является внедрение сетей нового поколения *NGN (Next Generation Network)*, активное внедрение технологий мультисервисного абонентского доступа, пакетной коммутации, которые требуют качественно нового технологического развития транспортной сети. Использование на магистральном уровне технологии многопротокольной коммутации меток *MPLS (MultiProtocol Label Switching)* позволяет обеспечить эффективную передачу трафика с поддержкой параметров *QoS (Quality of Service)*. Возможности управления трафиком, направленные на обеспечение сбалансированного использования ресурсов сети *MPLS* с поддержкой *QoS* реализовываются с помощью технологий инжиниринга трафика *Traffic Engineering (TE)* за счет использования механизмов сбалансированной загрузки ресурсов сети, выбора оптимального маршрута прохождения трафика, использования процедур резервирования и распределения загрузки сети, балансировки трафика и механизмов предотвращения перегрузок. Использование технологий поддержки *QoS (IntServ/RSVP, DiffServ/RSVP+, DiffServ-TE)* позволяет предоставить различные классы услуг передачи за счет определения последовательности маршрутов прохождения трафика, оптимизации очередей и контроля пропускной способности [1,2,3].

Архитектура сети *MPLS*, базирующаяся на *LSR (Label Switching Router)*, обеспечивает быструю коммутацию пакетов за счет использования меток в заголовке пакета, хранящих адрес доставки и класс сетевого уровня (*Forwarding Equivalence Class, FEC*). Механизмом задания пути прохождения трафика в сети *MPLS-TE* является использование однонаправленных туннелей *TE-tunnel*, которые объединяют последовательность *LSR*, выбранную с учетом максимальной загрузки ресурсов сети и выполнения требований *QoS*. С целью обеспечения отказоустойчивой маршрутизации в сети *MPLS-TE* используется технология быстрой перемаршрутизации пакетов *Fast ReRoute (FRR)*, которая позволяет временно направить трафик по запасному, предварительно сконфигурированному *TE-tunnel*. Запасной туннель конфигурируется для возможностей перемаршрутизации трафика в случае отказа маршрута. Выбор *TE-tunnel* определяется по заданным критериям, например, таким как минимальное значение задержки пакетов [1,2].

Поэтому, достаточно актуальной задачей является теоретическое обоснование, разработка и исследование моделей управления трафиком, которые могут быть рассмотрены

для решения задач маршрутизации сетей *MPLS-TE/FRR*. Решение задач управления маршрутизацией с целью одновременной оценки структурных характеристик и функциональных свойств, а также прогнозирования состояния сети на определенном промежутке времени с учетом топологии сети, а также используемых протоколов, позволяет использование тензорного анализа. Возможности применения тензорного анализа сетей исследованы в работах Г. Крона [4], А.Е. Петрова [6], результаты тензорного моделирования телекоммуникационных сетей представлены в работах В.В. Поповского, А.В. Лемешко и др. [9,10]. Поэтому, для решения поставленной задачи воспользуемся аппаратом тензорного анализа, который позволяет учитывать сложную топологическую и функциональную архитектуру сетей *MPLS-TE/FRR*, а также возможности выбора *TE-tunnel* перемаршрутизации трафика при условии обеспечения гарантированного минимального времени доставки пакетов [4,6-12].

Постановка задачи. Пусть задана исходная структура сети *MPLS-TE/FRR*, состоящая из n узлов, представленных маршрутизаторами *LSR*, связанных m ветвями – трактами. Задана пропускная способность в ветвях сети, представленная в виде координат матрицы L_v и направления передачи – исток и сток. Известна длина исходной пакетной очереди между заданной парой узлов, заданная в виде координат вектора H_v^+ . Необходимо рассчитать минимальную задержку передачи пакетов из очереди на исходящем *LSR*, а также загруженности очередей на всех транзитных *LSR* сети для определения однонаправленного туннеля *TE-tunnel* прохождения трафика *MPLS-TE/FRR*, выбрав последовательность прохождения трафика по *LSR*, для которой значение задержки является одинаковым для возможных путей доставки пакетов.

Тензорное моделирование сети *MPLS-TE/FRR* предполагает ее описание в метрическом пространстве [4,6,7-9]. Причем, в качестве метрики может выступать трафик в каналах связи, что наглядно может быть подтверждено в ходе тензорного обобщения формулы Литтла [5]:

$$h_v^i = l_v^i \tau_v^i, \quad i = \overline{1, m}, \quad (1)$$

где h_v^i – длина очереди, в которой помещаются пакеты для передачи i -м тракте; τ_v^i – средняя задержка пакетов в i -м канале связи; l_v^i – интенсивность трафика в i -м канале связи; m – общее число трактов.

По аналогии с тензорным подходом, предложенным Г. Кроном и развитым в работах [4,6,7–12], структура сети *MPLS-TE/FRR* описывается одномерным симплицальным комплексом (одномерной сетью), которая, в свою очередь, определяет дискретное m -мерное пространство. При этом ветви сети $v_i, i = \overline{1, m}$ моделируют тракты сети, а узлы сети $N_j, j = \overline{1, n}$ – маршрутизаторы *LSR*. Во введенном m -мерном пространстве произведем тензорное описание системы в рамках узловых сетей. В качестве информативных систем координат (СК) введем в рассмотрение две координатные системы. Первая – система координат ветвей сети, а вторая – система координат узловых пар $\eta_k, k = \overline{1, \rho}$ сети. В системе координат ветвей сети необходимо рассчитать неизвестные величины – загруженность пакетами буферов очередей на *LSR* и их временные задержки в каждом тракте. В системе координат узловых пар проекции тензора H определяют исходную длину очереди на *LSR* – отправителе [4,6,7–12]. В узловых сетях в качестве воздействующей переменной в уравнении (1) выступает величина h_v^i , а в качестве переменной отклика – задержка τ_v^i . Тогда уравнение (1) можно представить в тензорном виде:

$$H = L T, \quad (2)$$

где L – дважды контравариантный тензор интенсивностей трафика в базисных путях сети, который в системе координат ветвей примет форму.

$$H_v = L_v T_v, \quad (3)$$

где вектор $H_v = \langle h_v^1 \ h_v^2 \ \dots \ h_v^\rho \rangle$ определяет длину очереди в системе координат ветвей, $T_v = \langle \tau_v^1 \ \tau_v^2 \ \dots \ \tau_v^\rho \rangle$ – вектор задержек передачи пакетов в ветвях сети, $L_v = \langle l_v^{ij} \rangle$ – квадратная матрица интенсивностей трафика в ветвях сети m -го порядка, которая имеет диагональную структуру, ρ – ранг сети, а t – знак транспонирования матрицы

Уравнение (2) в системе координат узловых пар имеет вид:

$$H_\eta = L_\eta T_\eta, \quad (4)$$

где H_η , T_η и L_η – проекции тензоров H , T и L в базисе узловых пар, причем $H_\eta = \langle h_\eta^1 \ h_\eta^2 \ \dots \ h_\eta^\rho \rangle$ и $T_\eta = \langle \tau_\eta^1 \ \tau_\eta^2 \ \dots \ \tau_\eta^\rho \rangle$ – векторы длин очередей и задержек передачи пакетов в узловых парах сети соответственно, а L_η – квадратная матрица интенсивностей трафика в системе координат узловых пар сети ρ -го порядка, которая имеет диагональную структуру.

Тензорный характер геометрических объектов H , T и L по отношению к введенным системам координат подтверждается линейным характером преобразования их проекций при смене системы координат [4,6, 7–12]. Проекция тензора H_η в системе координат базисных узловых пар определяются как:

$$H_\eta = B_\eta H_v^+. \quad (5)$$

Дважды контравариантный тензор интенсивностей трафика в системе координат узловых пар определяется выражением [4,6–12]:

$$L_\eta = B_\eta L_v B_\eta^t. \quad (6)$$

Расчет тензора временных задержек передачи пакетов в системе координат базисных узловых пар производится согласно формуле:

$$T_\eta = L_\eta^{-1} H_\eta, \quad (7)$$

где L_η^{-1} – обратная матрица к матрице L_η .

Проекция ковариантных тензоров T_v в системе координат ветвей сети, находим используя выражение:

$$T_v = B_\eta^t T_\eta, \quad (8)$$

Для расчета туннеля *TE-tunnel* исходной сети *MPLS-TE/FRR*, который обеспечит минимальную задержку передачи пакетов из очереди на исходящем *LSR* и загруженности очередей на всех транзитных *LSR* сети (нахождение вектора H_v), рассмотрим сеть заданной

структуры, которая содержит шесть узлов ($n = 6$), соединяющих десять ветвей ($m = 10$), показанную на рис. 1.

Анализируя структуру исходной сети *MPLS-TE/FRR*, с учетом использования узлового метода расчета, зададим направление мнимой ветви передачи пакетов – *LSR-1*→*LSR-3*. На рис. 1 сплошными линиями выделены реальные ветви сети, а пунктирной – мнимая ветвь направления *LSR-1*→*LSR-3*, для которого необходимо обеспечить передачу пакетов из очереди условной длиной 100 тыс. пакетов.

Таким образом, полюсами сети являются первый и третий *LSR*. Отсутствие реальной ветви в анализируемом направлении передачи подразумевает введение дополнительной мнимой ветви с нулевой загруженностью.

Согласно заданной структурной схеме узловой сети *MPLS-TE/FRR* (рис. 1), выбираем исходящий узел *LSR-1* в качестве опорного, определив тем самым остов сети, относительно которого производим выбор базисных разрезов, представленных узловыми парами в сети.

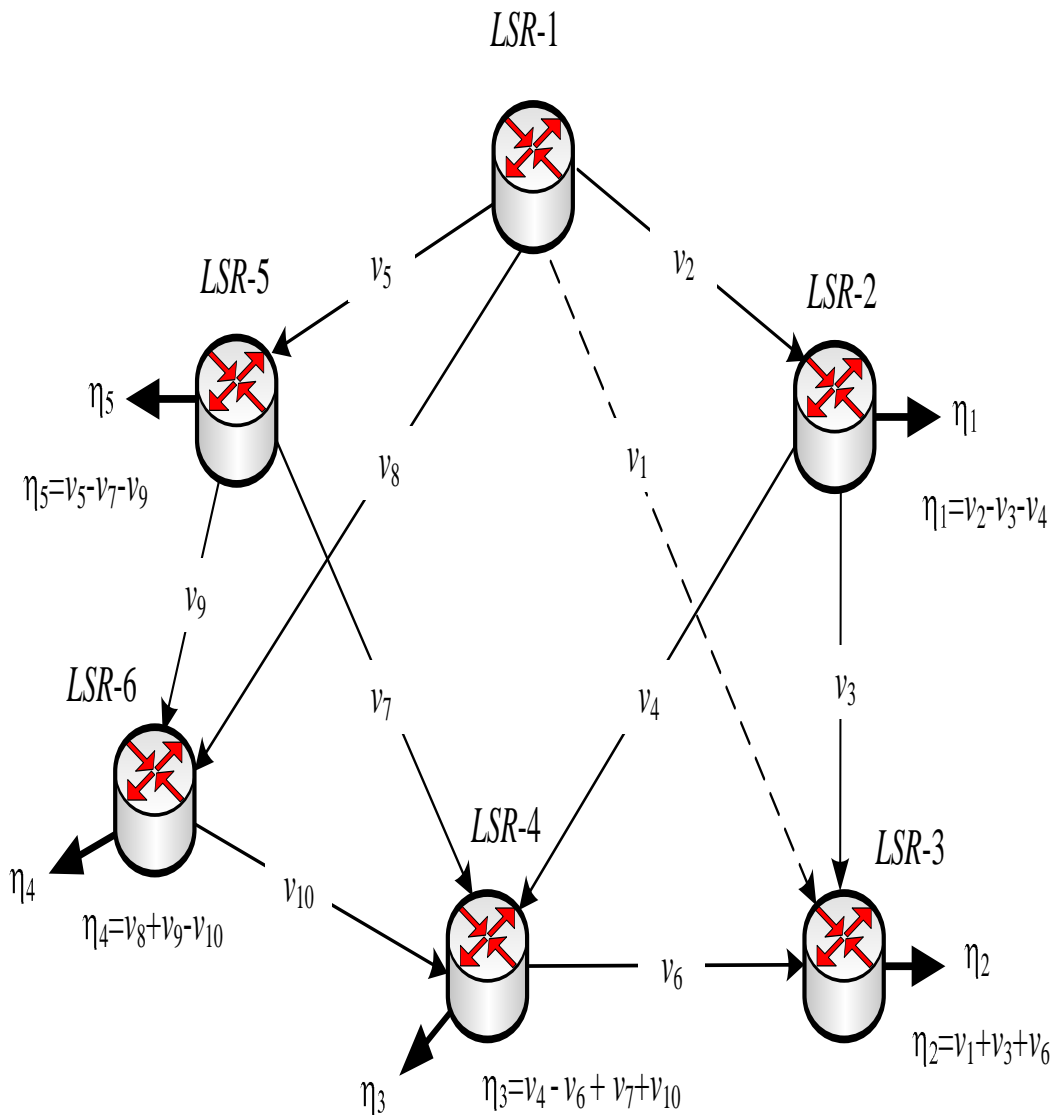


Рисунок 1 – Структурная схема сети *MPLS-TE/FRR*

Зависимость между узловыми парами η_k , $k = \overline{1,5}$ и ветвями сети v_i , $i = \overline{1,10}$ имеет вид [3,4]:

$$\begin{cases} \eta_1 = v_2 - v_3 - v_4; \\ \eta_2 = v_1 + v_3 + v_6; \\ \eta_3 = v_4 - v_6 + v_7 + v_{10}; \\ \eta_4 = v_8 + v_9 - v_{10}; \\ \eta_5 = v_5 - v_7 - v_9. \end{cases}$$

Согласно структурной схеме сети и заданных направлений передачи формируем базисную матрицу разрезов (узловых пар) B_η сети [3,4,6]:

$$B_\eta = \begin{pmatrix} 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Длина исходной пакетной очереди между заданной парой транзитных LSR задана в виде координат вектора H_v^+ , который имеет вид:

$$H_v^+ = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0). \quad (10)$$

Пропускные способности в трактах сети заданы в виде в виде координат диагональных элементов матрицы L_v :

$$L_v = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 500 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 300 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 500 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 700 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 900 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 200 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 900 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 500 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 700 \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Определим загруженность LSR сети передачи исходной пакетной очереди направления $LSR-1 \rightarrow LSR-3$, произведя расчет проекции тензора H_η в системе координат базисных узловых пар согласно (5), (9) и (10):

$$H_{\eta} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 100 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 100 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Рассчитаем матрицу пропускных способностей транзитных *LSR* сети L_{η} , которая определяет проекции дважды контравариантных тензоров в системе координат узловых пар согласно (6), (9), (11):

$$L_{\eta} = \begin{pmatrix} 1300 & -300 & -500 & 0 & 0 \\ -300 & 1200 & -900 & 0 & 0 \\ -500 & -900 & 2300 & -700 & -200 \\ 0 & 0 & -700 & 2100 & -500 \\ 0 & 0 & -200 & -500 & 1400 \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Найдя обратную матрицу L_{η}^{-1} и используя выражения (7) и (12), рассчитываем проекции ковариантных тензоров в системе координат базисных узловых пар, определяя значение величин задержки передачи пакетов T_{η} на каждом *LSR*

$$T_{\eta} \approx \begin{pmatrix} 0.0012 & 0.0008 & 0.0007 & 0.0003 & 0.0002 \\ 0.0008 & 0.0018 & 0.0010 & 0.0004 & 0.0002 \\ 0.0006 & 0.0010 & 0.0011 & 0.0004 & 0.0003 \\ 0.0003 & 0.0004 & 0.0005 & 0.0007 & 0.0003 \\ 0.0002 & 0.0003 & 0.0003 & 0.0003 & 0.0009 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 100 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.0824 \\ 0.1825 \\ 0.1047 \\ 0.0420 \\ 0.0299 \end{pmatrix}. \quad (14)$$

Найдем время доставки пакетов T_v из очереди на исходящем *LSR*-1. Для этого, транспонируя матрицу B_{η} и используя выражения (8) и (14) получим проекции ковариантных тензоров в системе координат ветвей сети:

$$T_v \approx \begin{pmatrix} 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}^t \begin{pmatrix} 0.0824 \\ 0.1825 \\ 0.1047 \\ 0.0420 \\ 0.0299 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.1825 \\ 0.0824 \\ 0.1001 \\ 0.0223 \\ 0.0299 \\ 0.0778 \\ 0.0747 \\ 0.0420 \\ 0.0121 \\ 0.0627 \end{pmatrix}. \quad (15)$$

Определим порядок загруженности очередей пакетами на транзитных *LSR* сети, определив проекции тензора H_v в системе координат ветвей сети:

$$H_v = \begin{pmatrix} 9.875 & 3.066 & 6.815 & 61.35 & 3.069 & 10.85 & 28.79 & 27.81 & 0.973 \end{pmatrix}. \quad (16)$$

Результаты расчета времени задержки пакетов T_η и длины пакетной очереди H_η в транзитных *LSR* сети сведем в табл. 1, а результаты расчета среднего времени задержек пакетов T_v и длины пакетной очереди H_v в трактах сети в табл. 2. Результаты решения задачи представлены на рис. 2.

Таблица 1 – Результаты расчета среднего времени задержки пакетов T_η и длины пакетной очереди H_η в транзитных *LSR* сети

Номер узла сети	Пропускная способность (L_η , тыс.пак/с) транзитных <i>LSR</i>	Среднее время задержки пакетов (T_η , с) в транзитных <i>LSR</i> сети	Длина пакетной очереди (H_η , тыс.пак) в транзитных <i>LSR</i> сети
η_1	1300	0.0824	0
η_2	1200	0.1825	100
η_3	2300	0.1047	0
η_4	2100	0.0420	0
η_5	1400	0.0299	0

Таблица 2 – Результаты расчета среднего времени задержек пакетов T_v и длины пакетной очереди H_v в трактах сети

Номер ветви сети	Пропускная способность (L_v , тыс.пак/с) в трактах сети	Среднее время задержки пакетов (T_v , с) в трактах сети	Длина пакетной очереди (H_v , тыс.пак) в трактах сети
v_1	0	0.1825	0
v_2	500	0.0824	9.87
v_3	300	0.1001	3.07
v_4	500	0.0223	6.18

v_5	700	0.0299	61.33
v_6	900	0.0778	3.07
v_7	200	0.0747	10.85
v_8	900	0.0420	28.79
v_9	500	0.0121	27.82
v_{10}	700	0.0627	0.97

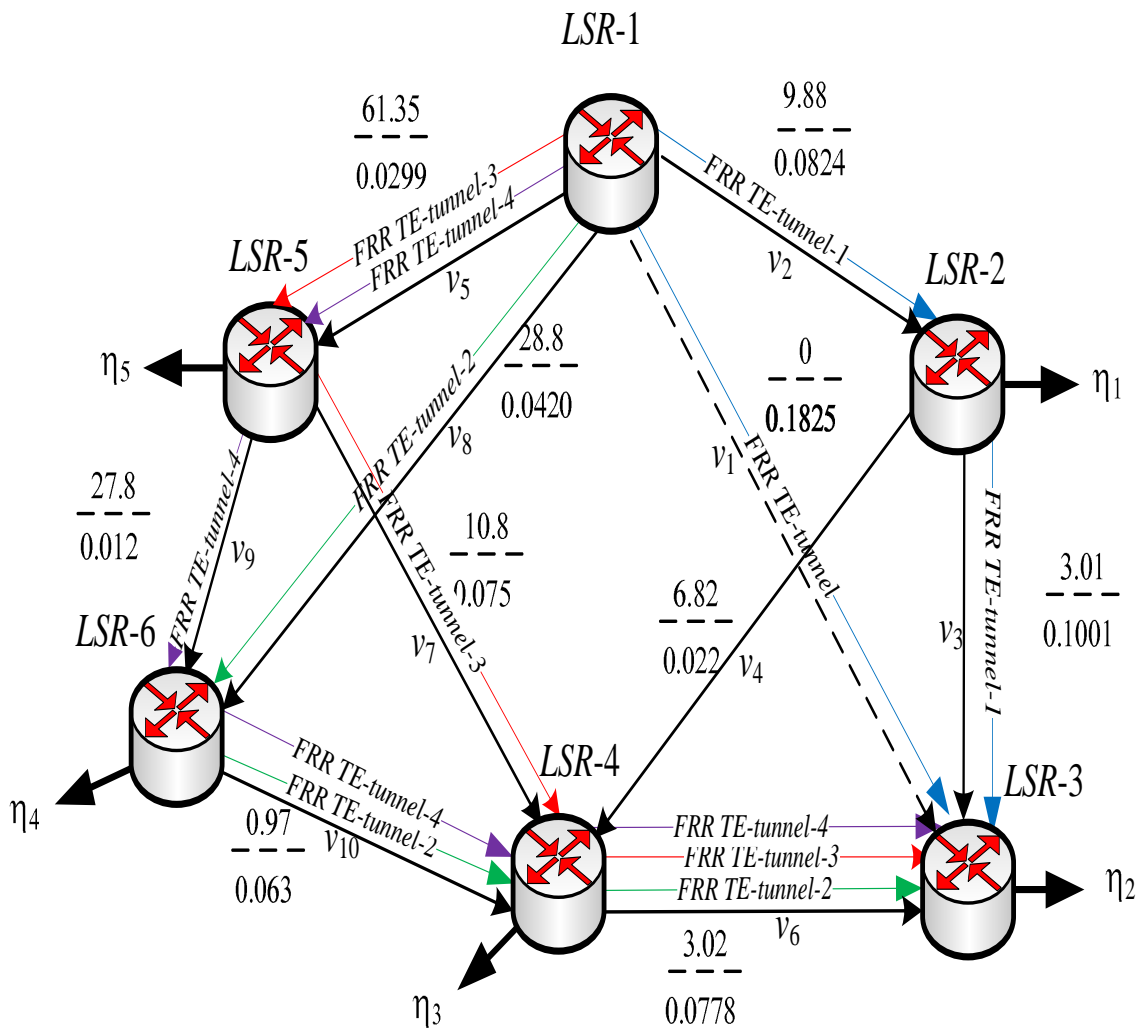


Рисунок 2 – Результаты расчета сети MPLS-TE/FRR

Анализ полученных результатов расчетов показывает, что для определения однонаправленного туннеля *TE-tunnel* обходного направления быстрой перемаршрутизации *FRR* прохождения трафика в сети *MPLS-TE/FRR*, можно выбрать определенную последовательность *LSR* в направлении от *LSR-1* к *LSR-3*:

TE-tunnel-1 FRR $LSR-1 \rightarrow LSR-2 \rightarrow LSR-3$;

TE-tunnel-2 FRR $LSR-1 \rightarrow LSR-6 \rightarrow LSR-4 \rightarrow LSR-3$;

TE-tunnel-3 FRR LSR-1→LSR-5→LSR-4→LSR-3;

TE-tunnel-4 FRR LSR-1→LSR-5→LSR-6→LSR-4→LSR-3,

для которой значение задержки является одинаковым для возможных путей доставки пакетов составляет 0.1825 с.

ВЫВОДЫ

1. *Продемонстрирована практическая реализация тензорного метода управления трафиком в сети MPLS-TE/FRR, показана возможность совместного математического моделирования структурных свойств и функциональных характеристик с помощью специального способа задания системы координат и свойства инвариантности тензора, где инвариантом является значение трафика в каждый конкретный момент времени.*

2. *Применение тензорных моделей при решении задач маршрутизации в сети MPLS-TE/FRR позволило обеспечить получение в аналитическом виде результатов эффективного использования сетевых ресурсов с помощью организации TE-tunnel быстрой перемаршрутизации FRR при гарантированном минимальном времени доставки пакетов.*

3. *Показано, что в рамках сети MPLS-TE/FRR могут быть выполнены оптимизационные процедуры по наиболее рациональному использованию ресурсов.*

4. *Решена задача управления трафиком в сетях MPLS-TE/FRR, позволяющая выполнить выбор туннеля TE-tunnel обходного направления быстрой перемаршрутизации FRR с обеспечением параметров качества обслуживания QoS.*

5. *Рассмотренная методика решения сетевых задач дает возможность применять тензорные методы для решения различных сетевых задач, например, решения задач сетевого управления трафиком.*

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. П.П. Воробієнко, Л.А. Нікітюк, П.І. Резніченко Телекомунікаційні та інформаційні мережі: Підручник для вищих навчальних закладів –К: САММІТ-КНИГА, 2010. – 640 с.
2. Оліфер В.Г. Оліфер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Учебник для вузов 3-е изд. – СПб: Питер, 2008 – 958 стр: ил.
3. Рогинский В.Н., Харкевич А.Д. Теория сетей связи: Учебник для вузов связи. – М.: Радио и связь, 1981. – 192 с.
4. Крон Г. Исследование сложных систем по частям – Диакоптика. – М.: Наука, 1972. – 542 с.
5. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. Пер. с англ./ Пер. И.И. Грушко. – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.
6. Петров А.Е. Тензорная методология в теории систем / А.Е. Петров. – М.: Радио и связь, 1985. – 152 с.
7. Математичні основи теорії телекомунікаційних систем / [Поповський В.В., Сабурова С.О., Олійник В.Ф. та інш.]; за загальною редакцією В.В. Поповського. – Харків: Тов. «Компанія СМІТ», 2006. – 564 с.
8. Григорьева Т. И. Тензорная модель телекоммуникационной сети // Раці УНДІРТ, 2002. – № 2 (30). – С. 74 – 75.
9. Поповский В.В. Тензорный анализ в задачах системного исследования телекоммуникационных систем / В.В.Поповский, А.В. Лемешко // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2002. – Вып. 125. – С. 156-164.
10. Лемешко А.В. Адаптация тензорных решений задачи многопутевой маршрутизации к дейтаграммным сетям / А.В. Лемешко, Т.И. Григорьева // Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2003. – № 1. – С. 72-76.
11. Стрелковская И.В. Применение теории моделей и тензорного анализа при моделировании телекоммуникационных систем / И.В. Стрелковская, Т.И. Григорьева // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2007. – Вып. 148. – С. 102-106.
12. Стрелковская И.В. Использование тензорного метода при расчетах узловой сети пакетной коммутации / И.В. Стрелковская, И.Н. Соловская // III Міжнародний науково-технічний симпозіум «Нові технології в телекомунікаціях», 2-5 лютого, 2010 р. – ДУІКТ-Карпати, Вишків, 2010. – С. 159-161.