

УДК 621.391

И.В. Стрелковская, И.Н. Соловская, Ю.В. Гуцал

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА СЕТИ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ MVNO ТЕХНОЛОГИИ LTE С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕНЗОРНОГО АНАЛИЗА

The paper under scrutiny proposes the sequence of actions for characterizing the quality parameters of the mobile network LTE/MVNO for convenient configuration of network connections of objects. To determine the quality parameters of the network LTE/MVNO tensor decomposition of the network architecture we employ the method for obtaining the optimal configuration of the network connections of objects for preset values of packet delay using the criterion of the maximum capacity. To consider more complex network topology and architecture using tensor decomposition we propose to divide it into subnets for further research and obtaining findings for each subnet in isolation and the network as a whole. We determine the parameters of the quality of the network LTE/MVNO such as bandwidth, packet queue length in the path, the contours of the network nodes for each subnet and the network as a whole. The resulting tensor method can be used for a variety of networking tasks taking into account the complexity of the architecture and topology with specificity of functioning of the protocols used.

### Вступление

Развитие современных сетей мобильной связи сопровождается непрерывной сменой технологий, что позволяет операторам постоянно совершенствовать сети и значительно повышать показатели доходности. Развитие сетей мобильной связи, согласно 3GPP (3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project), в дальнейшем связывают с развитием технологии LTE (Long Term Evolution) (Rel. 8-10), что значительно увеличит пропускную способность сети и позволит усовершенствовать архитектуру сети. Внедрение новой технологии требует от оператора значительных материальных расходов, поэтому при этом целесообразно учитывать не только различные риски, связанные с дальнейшей популярностью технологии, но и ее доходность. Поэтому операторы считают более целесообразным использование принципов совместной деятельности для построения и эксплуатации сетей нового поколения путем создания виртуальной мобильной сети MVNO (Mobile Virtual Network Operator). Архитектура сети LTE/MVNO базируется на принципах совместного использования существующих инфраструктур PLMN (Public Land Mobile Network) разных операторов путем создания общей для нескольких операторов виртуальной сети MVNO, которая использует существующую инфраструктуру операторов и доступный частотный диапазон. Особенностью реализации сети LTE/MVNO является построение новой сети радиодоступа E-UTRAN (Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network), которая будет совместно использоваться несколькими операторами [1, 2].

Внедрение сети LTE/MVNO требует детального анализа принципов построения существую-

щих сетей мобильной связи, использования современных методов обслуживания пакетного трафика и процедур использования радиочастотного спектра [2]. Сложность этой задачи состоит в том, что ее решение требует учета не только структурных особенностей построения существующих и внедряемых сетей, но и технологических особенностей их построения при условии, что количество сетей, которые рассматриваются, может быть значительным. Поэтому достаточно важно решение проблемы выбора оптимальной топологии и принципов соединения сетевых объектов LTE/MVNO с учетом выбора направлений передачи трафика с обеспечением необходимых параметров качества обслуживания QoS (Quality of Service). Все это позволяет говорить об актуальности разработки методов определения параметров качества сети LTE/MVNO, которые позволят на этапе проектирования и дальнейшей ее эксплуатации находить значения пропускных способностей, длительностей задержек пакетов и длин пакетной очереди различных сетевых объектов.

### Постановка задачи

Целью данной работы является определение параметров качества объектов сети мобильной связи LTE/MVNO, таких как пропускные способности, длины пакетной очереди в трактах, узлах и контурах сети при условии заданных значений длительностей задержек пакетов и длины исходной пакетной очереди в трактах сети.

Для решения поставленной задачи целесообразно использовать тензорный метод исследования, который позволяет одновременно исследовать как структурные, так и функциональные свойства, в рамках одной модели получить

значения требуемых параметров качества для сети сложной топологии и размерности [3–5].

### Тензорная модель сети LTE/MVNO

Разработка тензорной модели сети LTE/MVNO для исследования структурных характеристик предполагает выполнение геометризации сети, введение понятий пространства структуры, проведения и обоснования выбора системы координат и задания правил координатного преобразования. Для исследования функциональных характеристик необходимо задать инвариантное функциональное уравнение поведения сети и определить характер исследуемых величин – ковариантных и контравариантных.

Рассмотрим произвольную структуру фрагмента сети LTE/MVNO в виде ориентированного взвешенного графа  $G(N, V)$ , множество вершин которого  $N = \{N_j, j = 1, n\}$  составляют сетевые объекты, а множество дуг  $V = \{v_i, i = \overline{1, m}\}$  – тракты сети, которые соединяют сетевые объекты и обеспечивают передачу пакетного трафика. По аналогии с тензорным подходом, предложенным Г. Кроном и развитым в работах [3, 5–8], структура сети описывается дискретным  $m$ -мерным пространством. Для определения параметров качества сети LTE/MVNO используем контурный метод тензорного рассмотрения сети [3, 6–7], поэтому в качестве систем координат (СК) введем две координатные системы: ветвей сети и независимых контуров. Для рассматриваемого графа произвольно зададим замкнутые контуры и направления передачи пакетного трафика.

В качестве инвариантного уравнения, которое будет характеризовать функциональные свойства сетевых объектов, используем формулу Литтла [4]:

$$h^i = \tau^i \cdot I_i, \quad i = \overline{1, m}, \quad (1)$$

где  $h^i$  – длина пакетной очереди;  $\tau^i$  – средняя задержка пакетов в  $i$ -м тракте передачи пакетов;  $I_i$  – пропускная способность в  $i$ -м тракте;  $m$  – общее количество трактов.

Определим характер исследуемых величин, заданных уравнением (1), полагая, что  $h^i$  – одновалентный ковариантный тензор, который характеризует длину пакетной очереди,  $\tau^i$  – дважды контравариантный тензор задержек передачи пакетов, а  $I_i$  – одновалентный ковариантный тензор пропускных способностей трафика.

Рассмотрим фрагмент сети LTE/MVNO, состоящий из сетевых объектов, которые соединены трактами передачи, выполняющих обслуживание пакетного трафика. С учетом того, что потоки пакетного трафика характеризуются пропускной способностью и буферизируются в пакетные очереди, выполним оценку таких сетевых параметров качества обслуживания, как пропускные способности, длины пакетной очереди в сетевых объектах и соединяющих их трактах, а также заданных контурах сети, при условии заданных значений длительностей задержек пакетов и длины исходной пакетной очереди в трактах сети.

Для решения поставленной задачи считаем заданными значения:

- длины исходной пакетной очереди каждого тракта, соединяющего объекты сети, заданные в виде координат вектора  $H_v^+ = (h_1^{v+}, h_2^{v+}, \dots, h_p^{v+})$ ;

- длительности задержки пакетов в трактах сети, которые обеспечивают передачу пакетного трафика между сетевыми объектами, представ-

ленные в виде матрицы  $T_v = \begin{pmatrix} \tau_1 & 0 & 0 \\ 0 & O & 0 \\ 0 & 0 & \tau_p \end{pmatrix}$ .

Необходимо определить значения таких параметров качества функционирования сети LTE/MVNO:

- длительности задержек пакетов в заданных контурах сети  $T_r$ ;

- пропускные способности трактов  $L_v$  и контуров сети  $L_r$ ;

- длины пакетных очередей в контурах  $H_r$  и трактах сети  $H_v$ .

Исходя из постулата первого обобщения Г. Крона [3], форма записи уравнения (1), характеризующего поведение отдельных элементов сети, должна соответствовать уравнению поведения сети в целом, что обуславливает замену системы скалярных уравнений (1) векторно-матричным уравнением:

$$H = T \cdot L. \quad (2)$$

Тогда заданное инвариантное уравнение (2) в системе координат ветвей имеет вид [5–10]

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

где  $H_v = (h_1^v, h_2^v, \dots, h_p^v)^t$  – ковариантный вектор длины пакетной очереди в СК ветвей сети;  $T_v$  – контравариантный тензор задержек передачи

пакетов в СК ветвей сети;  $L_v = (l_1^v, l_2^v, \dots, l_p^v)$  – ковариантный вектор пропускной способности в ветвях сети.

Аналогично тензорное уравнение (2) в системе координат контуров сети имеет вид [3, 5–7]

$$H_r = T_r \cdot L_r, \quad (4)$$

где  $H_r = (h_1^r, h_2^r, \dots, h_p^r)^t$  – вектор длины пакетной очереди в контурах сети;  $L_r = (l_1^r, l_2^r, \dots, l_p^r)$  – вектор пропускной способности трафика передачи пакетов СК контуров;  $T_r$  – дважды контравариантный тензор задержек передачи пакетов в СК контуров сети  $p$ -го порядка.

Тогда, согласно [3, 5–7], преобразования между СК контуров и СК ветвей тензора длины пакетной очереди  $H_r$  определяются как

$$H_r = B_v^t \cdot H_v^+, \quad (5)$$

где  $B_v^t$  – транспонированная базисная матрица преобразования, которая составлена согласно графу исследуемой сети.

Дважды контравариантный тензор временных задержек передачи пакетов в СК контуров сети определяется по формуле

$$T_r = B_v^t \cdot T_v \cdot B_v. \quad (6)$$

Используя полученные значения  $H_r$  и  $T_r$  определим тензор  $L_r$  в СК контуров сети согласно (4):

$$L_r = [T_r]^{-1} H_r, \quad (7)$$

где  $[T_r]^{-1}$  – обратная матрица к матрице задержек передачи пакетов в СК контуров сети  $T_r$ ;  $H_r$  – вектор длины очереди пакетов в СК контуров сети.

Проекция ковариантных тензоров  $L_v$  в системе координат ветвей сети [3, 5–7] определяются как

$$L_v = L_r \cdot B_v. \quad (8)$$

Тогда согласно (3) и зная  $L_v$  и  $T_v$ , можем определить необходимые значения  $H_v$ , что позволит получить решение поставленной задачи.

### Тензорная декомпозиция сети LTE/MVNO

Учитывая, что сеть LTE/MVNO имеет сложную топологию и архитектуру построения,

целесообразно для решения поставленной задачи предложить разделение ее на отдельные подсети, при условии, что тензорный метод исследования позволяет получить результаты для отдельных элементарных составляющих и перенести их на всю сеть. При разделении сети LTE/MVNO на подсети будем рассматривать каждую подсеть отдельно, определяя для нее требуемые значения параметров качества с учетом значений в граничных контурах и ветвях, которые возникли на пересечениях подсетей при разделении сети на подсети [8].

Разделим исходный фрагмент заданной сети, показанный на рис. 1, на три отдельные подсети. При этом введем в рассмотрение понятие граничных ветвей  $vgr$ , которые возникли на пересечении подсетей при разделении сети на подсети и граничных контуров, в которые входят граничные ветви. Тогда граничными контурами будут контуры  $r_1, r_3, r_4, r_6, r_7, r_8, r_{11}, r_{12}, r_{13}$ , а граничными ветвями  $vgr_1, vgr_2, vgr_3, vgr_4, vgr_5$ . В первую подсеть вошли граничные контуры  $r_3, r_4$ , во вторую –  $r_6, r_7, r_8$ , а в третью –  $r_{11}, r_{12}, r_{13}$  соответственно. Граничные ветви  $vgr_1, vgr_2$  вошли в первую и вторую подсети,  $vgr_3$  – в первую и третью подсети,  $vgr_4, vgr_5$  – во вторую и третью подсети.

На рассматриваемом фрагменте сети LTE/MVNO (см. рис. 1), представленном в виде графа, показано разделение исходной сети на три подсети (элементы первой подсети выделены на графе пунктирными линиями, второй – мелкопунктирными, а третьей – штрихпунктирными линиями). Граничные ветви  $vgr$ , которые находятся на пересечении подсетей, показаны жирными линиями. Для каждой из ветви  $v$  и  $vgr$  рассматриваемого графа показаны заданные и искомые значения параметров качества: заданные значения  $h_v^+$  – длины исходной пакетной очереди и  $\tau_v$  – значения задержек передаваемых пакетов, а также искомые значения  $l_v$  – пропускных способностей трактов передачи. Аналогично, для рассматриваемых замкнутых контуров передачи пакетного трафика показаны искомые значения  $h_r$  – длин пакетных очередей,  $\tau_r$  – задержек пакетов и  $l_r$  – пропускных способностей контуров.

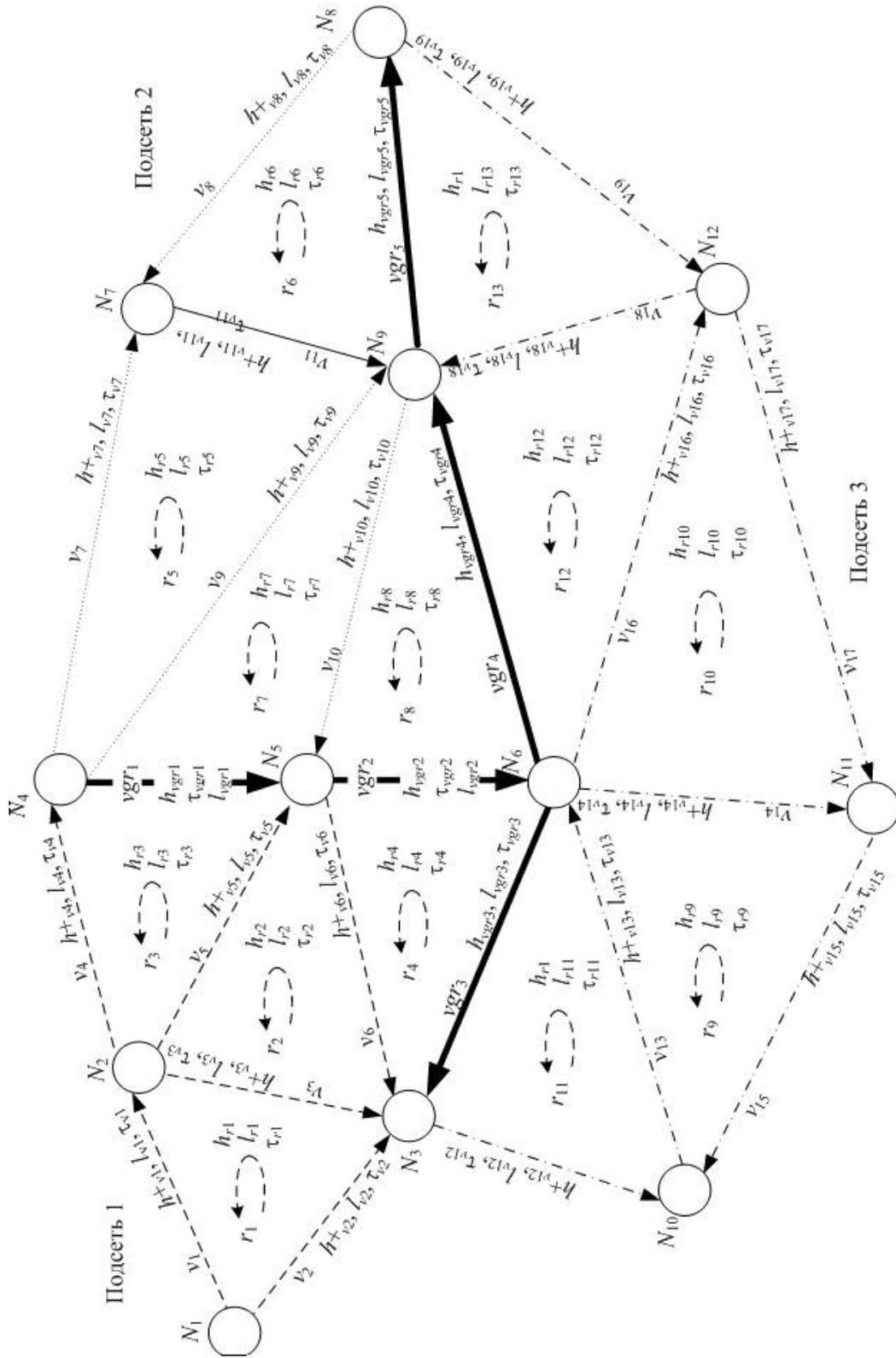


Рис. 1. Исходный фрагмент сети LTE/MVNO

Для расчета параметров качества каждой подсети, которые рассматриваем отдельно, необходимо составить топологическую матрицу  $A_i^{(j)}$ , которая описывает отношения между контурами и ветвями сети, граничными контурами и ветвями рассматриваемого графа. Матрица  $A_i^{(j)}$  определяет состояние каждой подсети, где  $i = 1, 2, 3$  – состояния, характеризующие отношения между элементами сети;  $j$  – номер подсети. Обозначим каждое состояние: 1 – характеризует отношения между контурами и граничными контурами; 2 – между граничными контурами и граничными ветвями; 3 – между граничными ветвями подсети и всеми граничными ветвями. Для определения значений характеристик качества в граничных контурах и ветвях рассмотрим структуру сети, на которой удалим все контуры, которые не являются граничными [8].

Найдем матрицы  $A_i^{(j)}$ , определяющие состояние каждой подсети:

$$A^{(1)} = A_1^{(1)} \cdot A_2^{(1)} \cdot A_3^{(1)}, \quad (9)$$

$$A^{(2)} = A_1^{(2)} \cdot A_2^{(2)} \cdot A_3^{(2)}, \quad (10)$$

$$A^{(3)} = A_1^{(3)} \cdot A_2^{(3)} \cdot A_3^{(3)}, \quad (11)$$

где матрицы  $A^{(1)}$ ,  $A^{(2)}$ ,  $A^{(3)}$  характеризуют отношение между контурами каждой подсети соответственно и всеми граничными ветвями сети.

Полученная матрица  $A$ , согласно (9), (10), (11), будет иметь следующий вид:

$$A = \begin{pmatrix} A^{(1)} \\ A^{(2)} \\ A^{(3)} \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Тензоры задержек в СК контуров для каждой подсети  $T_{r1}$ ,  $T_{r2}$ ,  $T_{r3}$  определяются согласно (6) при заданных значениях задержек пакетов в трактах  $T_{vsk}$ :

$$T_{r_k} = B_{v_k}^t \cdot T_{v_{sk}} \cdot B_{v_k}, \quad (13)$$

где  $k$  – количество подсетей, равное  $k = 3$ ;  $B_{v_k}$  – базисная матрица преобразования каждой подсети;  $T_{v_{sk}}$  – дважды контравариантный тензор задержек пакетов в ветвях сети для каждой из подсетей.

Значение вектора пакетной очереди в СК контуров для каждой подсети  $H_{r1}$ ,  $H_{r2}$ ,  $H_{r3}$ ,

согласно (5), может быть найдено при заданных значениях векторов длины пакетной очереди в ветвях для каждой подсети:

$$H_{r_k} = B_{v_k}^t \cdot H_{v_k}^+, \quad (14)$$

где  $H_{v_k}^+$  – вектор длины исходной пакетной очереди в ветвях каждой подсети.

Векторы интенсивностей трафика каждой подсети  $L_{r1}$ ,  $L_{r2}$ ,  $L_{r3}$  в СК контуров определим согласно (7), (13) (14):

$$L_{r1} = [T_{r1}]^{-1} \cdot H_{r1}. \quad (15)$$

Тензоры задержек в СК ветвей для граничных ветвей каждой подсети  $T_{v1}$ ,  $T_{v2}$ ,  $T_{v3}$  определяются с помощью матриц  $A^{(1)}$ ,  $A^{(2)}$ ,  $A^{(3)}$  при добавлении исходных временных задержек граничных ветвей:

$$T_{v_k} = A^{(i)t} \cdot T_{r_k} \cdot A^{(i)} + T_{v_{grk}}, \quad (16)$$

где  $T_{v_{grk}}$  – тензоры исходных временных задержек граничных ветвей для каждой подсети.

Для упрощения расчетов будем считать, что исходные значения задержек в граничных ветвях имеют нулевые значения. Тензор задержек пакетов в СК ветвей можно определить по формуле

$$T_v = T_{v1} + T_{v2} + T_{v3}. \quad (17)$$

Значения пропускной способности трафика  $L_{v1}$ ,  $L_{v2}$ ,  $L_{v3}$  в СК ветвей для граничных ветвей для каждой подсети определяется как ковариантный вектор согласно (8), матриц  $A^{(1)}$ ,  $A^{(2)}$ ,  $A^{(3)}$  (9), (10), (11) и интенсивностей трафика  $L_{r1}$ ,  $L_{r2}$ ,  $L_{r3}$  в СК контуров, полученных в (15):

$$L_{v_k} = -A^{(i)t} \cdot L_{r_k}. \quad (18)$$

Тензор пропускной способности граничных ветвей в СК ветвей определяется как

$$L_v = L_{v1} + L_{v2} + L_{v3}. \quad (19)$$

Длина пакетной очереди в СК ветвей для сети определяется согласно формуле (3), а длина пакетной очереди в СК контуров сети – используя матрицу  $A$ , полученную в (12):

$$H_r = A \cdot H_v. \quad (20)$$

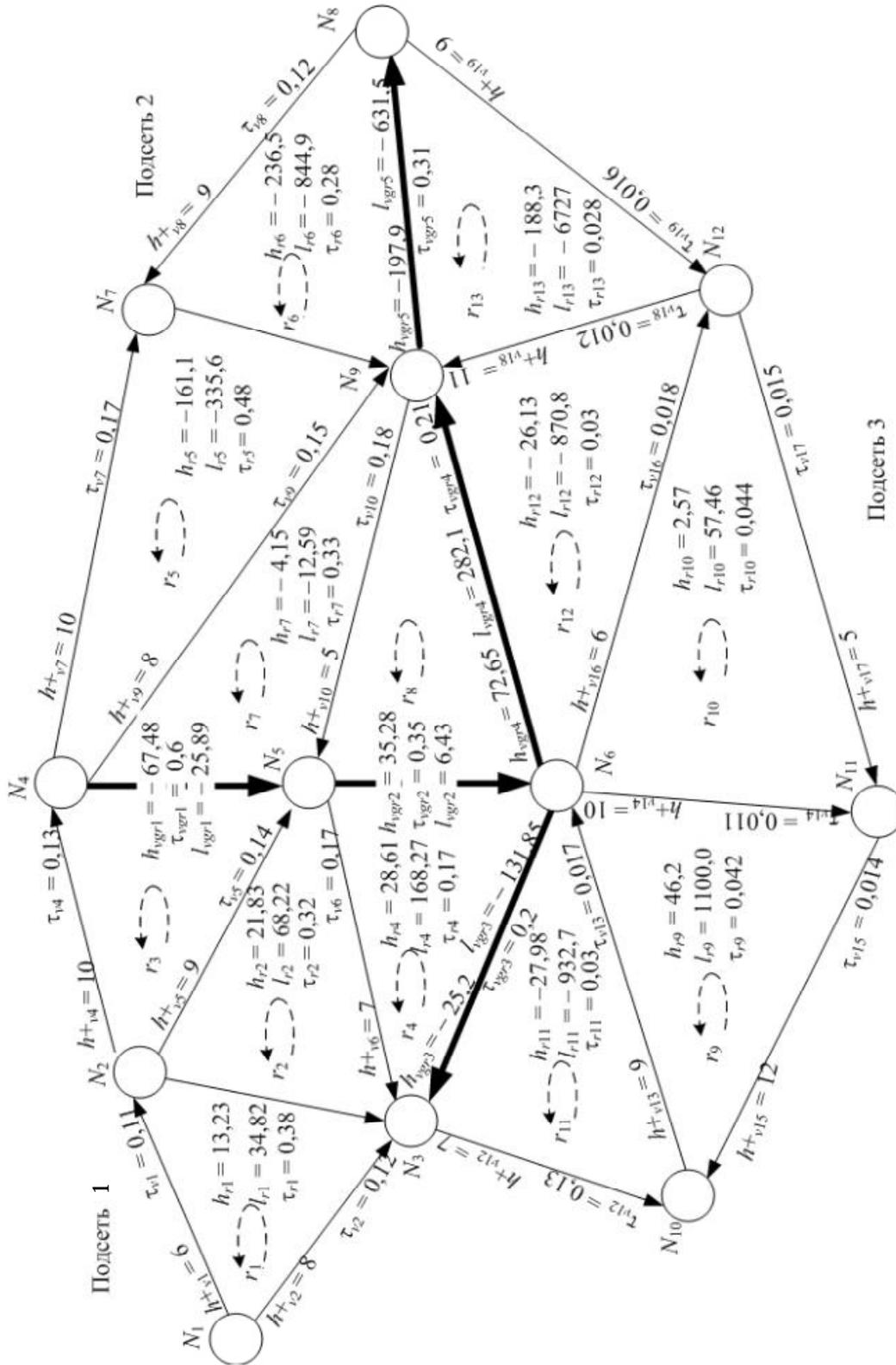


Рис. 2. Результаты расчетов характеристик качества сети LTE/MVNO

Прирост пропускной способности  $\Delta L_{T1}$ ,  $\Delta L_{T2}$ ,  $\Delta L_{T3}$  в связи с соединением подсетей находим с помощью формулы

$$\Delta L_{T_k} = [T_{T_k}]^{-1} H_r. \quad (21)$$

Тогда возможно определить пропускные способности  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  исходной сети согласно (15) и (21):

$$L_k = L_{T_k} + \Delta L_{T_k}. \quad (22)$$

Приведенный пример определения характеристик качества для сети и ее подсетей позволяет по критерию максимального значения задержек пакетов и заданных значений длины пакетной очереди получить значения характеристик качества, таких как значения пропускных способностей трафика, длины пакетной очереди для исходной сети, выделенных подсетей и граничных элементов сети. Результаты расчета характеристик качества сети LTE/MVNO согласно заданным исходным данным, показаны на рис. 2.

## Выводы

Для исследования сети сложной топологии и архитектуры LTE/MVNO предложено использование элементов тензорного анализа, который позволяет анализировать исходную сеть, разделяя ее на подсети, и получать показатели качества (пропускные способности, длины пакетной очереди в трактах, сетевых уз-

лах и контурах сети) как для каждой подсети в отдельности, так и для всей сети в целом.

Применение тензорного метода при исследовании показателей качества сети сложной топологии и архитектуры LTE/MVNO позволяет, в отличие от иных существующих методов, одновременно исследовать как функциональные, так и структурные характеристики сети, рассматривая их в разных системах координат.

Предложенный тензорный метод позволяет выполнять расчеты параметров качества сети LTE/MVNO при условии заданных значений длин исходной пакетной очереди  $H_v^+$  и длительностей задержек пакетов  $T_v$  в трактах сети, разделяя исходную сеть на подсети, получить требуемые значения длительностей задержек ( $T_r$ ,  $T_v$ ), пропускные способности ( $L_r$ ,  $L_v$ ) и длины пакетных очередей ( $H_r$ ,  $H_v$ ) в контурах и ветвях каждой подсети (5–7, 13–16). С учетом полученных значений в граничных контурах и ветвях, которые возникли на пересечениях подсетей (17–19), возможно получить пропускные способности  $L_v$  и длины пакетных очередей  $H_v$  в трактах исходной сети (20–22).

Направлением дальнейшего исследования является развитие предложенной тензорной модели с целью получения вероятностных характеристик показателей качества, таких как, например, вероятность потерь пакетов, задержек пакетов, своевременной доставки пакетов и т.д.

1. Тихвинский В.О., Терентьев С.В., Юрчук А.Б. Сети мобильной связи LTE. Технологии и архитектура. – М.: Эко-Трендз, 2010. – 284 с.
2. 3GPP TS 23.002 3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project, Technical Specification Group Services and Systems Aspects; Network architecture (Release 8,9), 2010, 94 p.
3. Крон Г. Тензорный анализ сетей: Пер. с англ. – М.: Сов. радио, 1978. – 720 с.
4. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания / Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.
5. Петров А.Е. Тензорная методология в теории систем. – М.: Радио и связь, 1985. – 152 с.
6. Стрелковская И.В. Тензорная модель исследования сети массового обслуживания // Цифрові технології: 36. наук. пр. – Одеса, 2010. – Вип. 10. – С. 82–90.
7. Стрелковская И.В. Тензорный анализ качественных характеристик сети массового обслуживания // 36. наук. пр. ОНАЗ ім. О.С. Попова. – Одеса, 2010. – Вип. 2. – С. 20–25.
8. Сохор Ю.Н. Вычислительные модели и алгоритмы тензорного анализа сетей: Учеб. пособие. – Псков: ПГПИ, 2008. – С. 115.