

**ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ
ПАКЕТНОГО ТРАФИКА В NGN**

**ОЦІНКА ХАРАКТЕРИСТИК ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ
ПАКЕТНОГО ТРАФІКА В NGN**

**EVALUATION OF QUALITY OF SERVICE CHARACTERISTICS
OF PACKET TRAFFIC IN THE NGN**

Аннотация. Для территориально-распределенной сети NGN предлагается использование нового подхода нахождения характеристик качества путем разделения этой сети на подсети. При этом, используя тензорное моделирование сети, получены оценки задержки передачи пакетов и длин пакетных очередей для каждого объекта сети и всей сети в целом.

Анотація. Для територіально-розподіленої мережі NGN пропонується використання нового підходу знаходження характеристик якості шляхом поділу цієї мережі на підмережі. При цьому, використовуючи тензорне моделювання мережі, одержані оцінки затримки передачі пакетів і довжин пакетних черг для кожного об'єкта мережі й усієї мережі в цілому.

Annotation. For geographically-distributed NGN network is proposed the new approach of finding the characteristics of quality, by dividing the network into subnetworks. In this case, using a tensor network modelling the delay of packets and length of packet queues for each network element and for whole network was estimated.

Современные телекоммуникационные сети сегодня развиваются в направлении внедрения сетей следующего поколения *NGN (Next Generation Network)*, основой которых является использование пакетных технологий для передачи различных видов трафика по единой сетевой инфраструктуре с обеспечением параметров качества обслуживания *QoS (Quality of Service)*. Основной характеристикой территориально-распределенной архитектуры *NGN* являются мультисервисность, многопротокольность и инвариантность к технологиям коммутации [1...3].

Сложившаяся в настоящее время тенденция перехода к сетям нового поколения *NGN* определила широкий круг проблем, связанных с оценкой качества обслуживания трафика и определением необходимого объема сетевых ресурсов, необходимого для его поддержания. Это обусловлено не только наличием значительного количества технологий и протоколов, но и значительной сложностью топологической структуры сети. Поэтому на этапе проектирования и внедрения сетей *NGN* основное внимание уделяют решению задачи обеспечения совместного использования сетевых ресурсов и требуемой пропускной способности с гарантированным качеством обслуживания *QoS*. Решение этой задачи состоит в обеспечении необходимых параметров качества обслуживания пакетного трафика, таких как пропускная способность, минимальные значения задержек и потерь пакетов при максимальной и сбалансированной загрузке ресурсов сети [1...3].

Как известно, задача оценки качества обслуживания трафика в телекоммуникационной сети требует построения математической модели, позволяющей описать соответствующий процесс с учетом всех функциональных и топологических особенностей рассматриваемой сети. Учитывая значительную структурную сложность рассматриваемой сети, эта задача, особенно применительно к *NGN*, становится трудно разрешимой, даже с применением известных методов. Исходя из вышеизложенного, становится очевидным необходимость поиска новых подходов к построению моделей функционирования сетей *NGN* и получения соответствующих качественных и количественных оценок.

Для определения характеристик качества обслуживания в сети большой размерности целесообразно использовать тензорные методы. Использование тензорных моделей позволяет выполнять одновременную оценку структурных характеристик и функциональных свойств рассматриваемой сетевой модели, прогнозировать состояние сети на определенном промежутке времени с учетом топологии, а также учитывать особенности используемых технологий и протоколов и прогнозировать состояние сети с учетом особенностей технологической реализации сетевого оборудования.

Ранее задача нахождения характеристик качества для различных телекоммуникационных сетей с помощью тензорных методов исследования была решена авторами в работах [4...7]. Однако, решение задачи оценки характеристик качества сети *NGN*, рассматриваемой как единой системы, в силу значительной структурной и технологической сложности с помощью предложенных ранее решений становится довольно затруднительным. Поэтому **целью данной статьи** является решение поставленной задачи с использованием тензорного метода, предложенного авторами в [4...5], используя новый подход рассмотрения территориально-распределенной сети *NGN* путем разделения сети на отдельные подсети и получения, соответствующих результатов оценок задержек пакетов и длин пакетных очередей, как для сети *NGN* в целом, так и для каждой рассматриваемой подсети в отдельности.

Рассмотрим архитектуру сети *NGN*, которая базируется на опорной магистральной сети *IP/MPLS (MultiProtocol Label Switching)* и подключенных к ней территориально-распределенных сетей абонентского доступа, объединенных в подсети *SN (SubNetwork)*. Функционирование опорной сети *CN (Core Network)* на базе технологии *MPLS* обеспечивают маршрутизаторы *LSR (Label Switch Router)*, выполняющие быструю коммутацию пакетов по меткам. В опорной сети выполняется сбалансированное использование ресурсов сети с поддержкой *QoS* за счет выбора оптимального маршрута, использования процедур резервирования и распределения загрузки сети, балансировки трафика и механизмов предотвращения перегрузок. Считаем, что выделенные подсети сетей доступа *SN* организованы на базе коммутаторов доступа *AS (Access Switch)*, обеспечивающих подключение к сети шлюзов доступа *AG (Access Gateway)*, доступ которых к опорной сети выполняется с помощью маршрутизаторов *BRAS (Broadband Remote Access Server)* [2].

Пусть задана исходная архитектура сети *NGN*, представленная в виде графа на рис. 1, которая состоит из опорной сети *CN* и *k* территориально-распределенных подсетей доступа *SN* ($k = 2$). Обозначим сетевые узлы рассматриваемой сети *NGN* через $A-i/j-p$, где *A* – тип сетевого узла (*LSR, AS, BRAS*); *i* – порядковый номер; *j* – номер подсети; *p* – номер сетевого узла в данной подсети. Аналогичная нумерация применяется и для трактов передачи. Рассматриваемая сеть состоит из *m* узлов ($m = 13$), моделируемых сетевыми узлами, связанными между собой *n* ветвями – трактами ($n = 16$).

Определим основные характеристики качества обслуживания пакетного трафика сети *NGN*: значения минимального времени задержки пакетов, длины пакетной очереди для каждого сетевого узла и трактов соединений в опорной сети *CN*, а также аналогичные значения для каждого из сетевых узлов подсетей *SN* и связывающих их трактов.

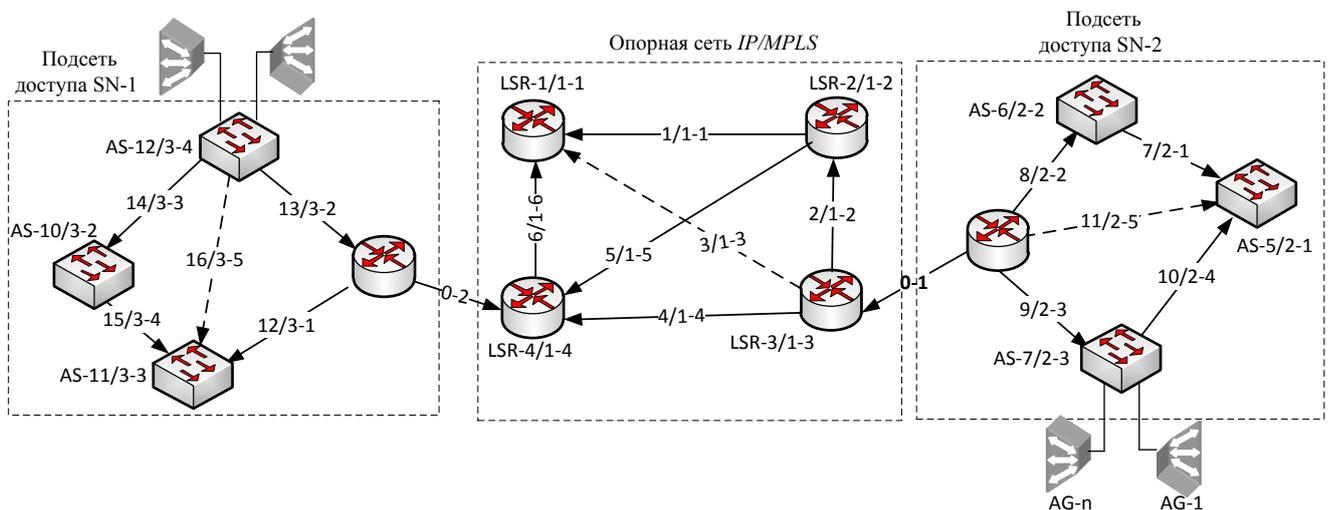


Рисунок 1 – Граф рассматриваемой сети *NGN*

Тензорное моделирование сети *NGN* предполагает ее описание в метрическом пространстве [8]. Аналогично подходу, рассмотренному в работах [4...7], для определения необходимых характеристик качества обслуживания, воспользуемся формулой Литгла [9]:

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

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

По аналогии с тензорным подходом, предложенным Г. Кроном и развитым в работах [4...10], структура сети NGN представляется одномерной сетью, состоящей из n ветвей, которая, в свою очередь, определяет дискретное n -мерное пространство. При этом ветви сети v_i , $i = \overline{1, n}$ моделируют тракты сети NGN , а узлы N_j , $j = \overline{1, m}$ – сетевые узлы сети.

Во введенном n -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 сети, а 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]. Зададим характер рассматриваемых величин, примем h^i и τ_i – как ковариантные тензоры длины пакетной очереди и задержек передачи пакетов соответственно, а тензор l^i – контравариантный тензор интенсивности трафика.

Тогда уравнение (1) можно представить в векторно-матричном виде в системах координат ветвей и узловых пар для рассматриваемой сети NGN :

$$H_{v_NGN} = L_{v_NGN} \cdot T_{v_NGN}, \quad (2)$$

где ковариантный вектор H_{v_NGN} определяет длину пакетной очереди в СК ветвей сети; T_{v_NGN} – ковариантный вектор задержек передачи пакетов в СК ветвей сети, а L_{v_NGN} – диагональная матрица интенсивностей трафика в СК ветвей сети.

$$H_{n_NGN} = L_{n_NGN} \cdot T_{n_NGN}, \quad (3)$$

где L_{n_NGN} – дважды контравариантный тензор интенсивностей трафика в СК узловых пар сети; H_{n_NGN} – ковариантный тензор длин пакетных очередей в СК узловых пар сети; T_{n_NGN} – ковариантный тензор времени задержки передачи пакетов в СК узловых пар сети.

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

$$H_{n_NGN} = B_{n_NGN} \cdot H_{v_NGN}^+, \quad (4)$$

$$L_{n_NGN} = B_{n_NGN} \cdot L_{v_NGN} \cdot B_{n_NGN}^t, \quad (5)$$

$$T_{v_NGN} = B_{n_NGN}^t \cdot T_{n_NGN}, \quad (6)$$

где B_{n_NGN} – матрица базисных разрезов сети; t – знак транспонирования матрицы.

Рассмотрим отдельно опорную сеть CN (*Core Network*) и подсети SN (*SubNetwork*) с целью получения соответствующих качественных и количественных решений характеристик сети NGN . Получаем независимые подсети – опорную сеть CN и территориально-распределенные подсети SN . Тогда, для каждой из полученных подсетей возможно применить узловой тензорный метод расчета задержек передачи пакетов и длины пакетной очереди в ветвях в узлах сети [4...8]. Считаем известными интенсивности трафика в трактах сети NGN $L_{v_NGN}^n$ и матрицу базисных разрезов $B_{n_SN}^{i,j}$, составленную согласно топологии рассматриваемой сети (см. рис. 1).

Для одновременного решения задачи расчета качественных характеристик сети NGN во всех подсетях зададим интенсивности трафика в ветвях в виде квадратной матрицы $L_{v_NGN}^n$ n -го порядка:

$$L_{v_NGN}^n = \begin{bmatrix} L_{v_SN}^{1,j_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{v_SN}^{2,j_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & L_{v_SN}^{k,j_k} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_{v_CN}^{j_{CN}} \end{bmatrix},$$

где $L_{v_SN}^{i,j_i}$ – диагональная матрица j_i -го 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 опорной сети SN ; $L_{v_CN}^{j_{CN}}$ – диагональная матрица интенсивностей трафика в ветвях подсети CN ; k – количество подсетей.

Для использования узлового тензорного метода рассмотрения сети на графе исходной структуры каждой территориально-распределенной подсети SN и опорной сети CN вводим мнимые ветви, показанные на рис. 1 пунктирными линиями. Согласно структурной модели сети NGN , которая включает в себя опорную и все территориально-распределенные подсети, и заданных направлений передачи формируем базисную матрицу разрезов сети B_{η_NGN} :

$$B_{\eta_NGN} = \begin{bmatrix} B_{\eta_SN}^{1,j_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B_{\eta_SN}^{2,j_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & B_{\eta_SN}^{k,j_k} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & B_{\eta_CN}^{j_{CN}} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где $B_{\eta_SN}^{i,j_i}$ – матрица базисных разрезов k подсетей; $i = \overline{1, k}$, $k \leq n-1$; $B_{\eta_CN}^{j_{CN}}$ – матрица базисных разрезов опорной сети CN ; k – количество изолированных подсетей.

Для определения интенсивностей трафика в сетевых узлах заданного тензором интенсивностей в СК узловых пар L_{η_NGN} воспользуемся формулой (5). Нетрудно определить, что L_{η_NGN} будет иметь вид квадратной матрицы m -го порядка.

Для определения длины пакетной очереди H_{η_NGN} в сетевых узлах NGN используем выражение (4):

$$\begin{bmatrix} H_{\eta_SN}^{1,j_1} \\ H_{\eta_SN}^{2,j_2} \\ \vdots \\ H_{\eta_SN}^{k,j_k} \\ H_{\eta_CN}^{j_{CN}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{\eta_SN}^{1,j_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B_{\eta_SN}^{2,j_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & B_{\eta_SN}^{k,j_k} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & B_{\eta_CN}^{j_{CN}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{v_SN}^{+,1} \\ H_{v_SN}^{+,2} \\ \vdots \\ H_{v_SN}^{+,k} \\ H_{v_CN}^+ \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где $H_{\eta_SN}^{i,j_i}$ и $H_{\eta_CN}^{j_{CN}}$ – тензоры длин пакетных очередей сетевых узлов подсетей и опорной сети CN соответственно; $B_{\eta_SN}^{i,j_i}$ и $B_{\eta_CN}^{j_{CN}}$ – матрицы базисных разрезов подсетей и опорной сети CN соответственно; $H_{v_SN}^{+,i}$ и $H_{v_CN}^+$ – тензоры исходящей пакетной очереди сетевых узлов подсети и опорной сети CN соответственно; $i = \overline{1, k}$, $k \leq n-1$; k – количество подсетей.

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

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

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

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

где $L_{v_SN}^{i,j_i}$ и $L_{v_CN}^{j_{CN}}$ – диагональные матрицы интенсивностей трафика в ветвях подсетей и опорной сети CN соответственно; $T_{\eta_SN}^{i,j_i} = (\tau_{\eta_SN}^1 \quad \tau_{\eta_SN}^2 \quad \dots \quad \tau_{\eta_SN}^j)^t$ и $T_{\eta_CN}^{j_{CN}} = (\tau_{\eta_CN}^1 \quad \tau_{\eta_CN}^2 \quad \dots \quad \tau_{\eta_CN}^j)^t$ – векторы задержек передачи пакетов в сетевых узлах подсетей и опорной сети CN соответственно; $i = \overline{1, k}$; k – количество подсетей.

Определим тензор задержек передачи пакетов в ветвях территориально-распределенных подсетей и опорной сети CN T_{v_NGN} согласно формулы (6), вид которой аналогичен (9').

Для расчета вектора длины пакетной очереди H_{v_NGN} в трактах сети NGN воспользуемся формулой (2):

$$\begin{bmatrix} H_{v_SN}^{1,j_1} \\ H_{v_SN}^{2,j_2} \\ \vdots \\ H_{v_SN}^{k,j_k} \\ H_{v_CN}^{j_{CN}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{v_SN}^{1,j_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{v_SN}^{2,j_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & L_{v_SN}^{k,j_k} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_{v_CN}^{j_{CN}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{v_SN}^{1,j_1} \\ T_{v_SN}^{2,j_2} \\ \vdots \\ T_{v_SN}^{k,j_k} \\ T_{v_CN}^{j_{CN}} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где $H_{v_SN}^{i,j_i}$ и $H_{v_CN}^{j_{CN}}$ – векторы длин очередей пакетов в ветвях подсетей и опорной сети CN соответственно; $L_{v_SN}^{i,j_i}$ и $L_{v_CN}^{j_{CN}}$ – диагональные матрицы интенсивностей трафика в трактах подсетей и опорной подсети CN соответственно; $T_{v_SN}^{i,j_i}$ и $T_{v_CN}^{j_{CN}}$ – векторы задержек передачи пакетов в ветвях подсетей и опорной сети CN соответственно; $i = \overline{1, k}$; k – количество подсетей.

Таким образом, мы определили значения минимального времени задержки пакетов и длины пакетной очереди в опорной сети CN и в каждой подсети SN , однако для обеспечения заданных параметров качества обслуживания на сети NGN необходимо определить характеристики соединений между опорной сетью CN и распределенными SN , с учетом полученных характеристик подсетей доступа. Для их расчета рассмотрим модель сети, в которой все территориально-распределенные подсети SN представлены в качестве узлов сети, подключенных к опорной сети CN , также представленной в виде узла, а соединения между ними являются ветвями модели сети.

Построим матрицу базисных разрезов сети B_{η_link} , согласно рис. 1, объектами которой являются матрицы связности всех рассматриваемых подсетей:

$$B_{\eta_link} = \begin{bmatrix} B_{\eta_link}^{1,j_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B_{\eta_link}^{2,j_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & B_{\eta_link}^{k,j_k} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

где $B_{\eta_link}^{i,j_i}$ – матрица базисных разрезов рассматриваемой подсети NGN ; $i = \overline{1, k}$, k – количество подсетей.

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

$$\tau_{\eta_link}^i = \sum_{j=1}^p \tau_{\eta_NGN}^{i,j}, \quad (12)$$

где $\tau_{\eta_link}^i$ – задержки передачи пакетов в i -й сети; $\tau_{\eta_NGN}^{i,j}$ – задержки передачи пакетов в j -м ($j = \overline{1, p}$) узле i -й подсети ($i = \overline{1, k+1}$, k – количество подсетей); p – количество узлов в i -й сети.

Определим аналогично выражению (6) задержки передачи пакетов в соединениях T_{v_link} как:

$$T_{v_link} = B_{\eta_link}^t \cdot T_{\eta_link}, \quad (13)$$

для рассматриваемой модели сети

$$\begin{bmatrix} \tau_{v_link}^1 \\ \tau_{v_link}^2 \\ \vdots \\ \tau_{v_link}^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{\eta_link}^{1,j_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B_{\eta_link}^{2,j_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & B_{\eta_link}^{k,j_k} \end{bmatrix}^t \begin{bmatrix} \tau_{\eta_link}^1 \\ \tau_{\eta_link}^2 \\ \vdots \\ \tau_{\eta_link}^{k+1} \end{bmatrix},$$

где $\tau_{\eta_link}^i$ – задержка пакетов в i -й подсети; $\tau_{v_link}^i$ – задержка пакетов в соединении i -й подсети; $i = \overline{1, k}$, k – количество подсетей.

Длина пакетной очереди в соединениях в системе координат ветвей сети H_{v_link} определяется согласно формулы (2):

$$H_{v_link} = L_{v_link} \cdot T_{v_link}, \quad (14)$$

т.е. для рассматриваемой модели сети

$$\begin{bmatrix} h_{v_link}^1 \\ h_{v_link}^2 \\ \vdots \\ h_{v_link}^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{v_link}^1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & l_{v_link}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & l_{v_link}^{k+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_{v_link}^1 \\ \tau_{v_link}^2 \\ \vdots \\ \tau_{v_link}^{k+1} \end{bmatrix},$$

где $l_{v_link}^i$ – интенсивность трафика в трактах взаимодействия между CN/SN ; $h_{v_link}^i$ – длина пакетной очереди в трактах соединений i -й подсети доступа SN ; $i = \overline{1, k}$, k – количество подсетей.

Таким образом, с помощью предложенного метода для сети NGN большой размерности и сложной топологии, возможно определить характеристики качества обслуживания, такие как длины пакетных очередей H_{v_NGN} и задержки передачи пакетов T_{v_NGN} в трактах и сетевых узлах NGN , а затем рассмотрев предложенную модель сети получить оценки характеристик качества, такие как задержки передачи пакетов T_{v_link} и значения длин пакетной очереди H_{v_link} на участках взаимодействия между опорной сетью CN и территориально-распределенными подсетями доступа SN .

В заключение можно сделать следующие выводы:

1. Предложен новый подход разделения сети NGN на подсети и исследование каждой подсети отдельно. При этом рассмотрение отдельно опорной сети SN и территориально-распределенных подсетей SN позволило упростить процесс нахождения характеристик качества сети NGN , а также обеспечить заданные параметры качества обслуживания соединений CN/SN .

2. Использование тензорного моделирования для сетей NGN позволило одновременно исследовать сложные структурные свойства и определить функциональные характеристики сети.

Литература

1. Воробієнко П.П. Телекомунікаційні та інформаційні мережі: підруч. [для вищ. навч. закл.] / П.П. Воробієнко, Л.А. Нікітук, П.І. Резніченко. – К.: СММІТ-КНИГА, 2010. – 640 с.
2. Сети следующего поколения NGN / [Росляков А.В., Ваняшин С.В., Самсонов М.Ю. и др.]; под ред. А.В. Рослякова. – М.: Эко-Трендз, 2008. – 424 с.
3. Бакланов И.Г. NGN : принципы построения и организации / Бакланов И.Г.; под ред. Ю.Н. Чернышова. – М.: Эко-Трендз, 2008. – 400 с.

4. *Стрелковская И.В.* Использование тензорного метода при расчете ТКС, представленной узловой сетью / *И.В. Стрелковская, И.Н. Соловская* // Электронное научное специализированное издание - журнал «Проблемы телекоммуникаций». – 2010. – № 1 (1). <http://pt.journal.kh.ua>.
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. *Стрелковская И.В.* Тензорный метод оценки максимальной пакетной очереди узловой сети // *И.В. Стрелковская, И.Н. Соловская* // Радиотехника.: Всеукраинский межвед.научно-технический сборник. – 2010. – Вып. 163 . – С. 7-12.
7. *Стрелковская И.В.* Тензорный метод решения задач управления трафиком с поддержкой сетевых параметров качества обслуживания // *И.В. Стрелковская, И.Н. Соловская* // Восточно-европейский журнал передовых технологий – 2011. – Вып. 5(53). – С. 37.
8. *Крон Г.* Тензорный анализ сетей / *Крон Г.*; под ред. *Л.Т. Кузина, П.Г. Кузнецова*; пер. с англ. – М.: Сов. Радио, 1978. – 720 с.
9. *Клейнрок Л.* Теория массового обслуживания / *Л. Клейнрок*; [И.И. Грушко; пер. с англ.]. – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.
10. Математичні основи теорії телекомунікаційних систем / [Поповський В.В., Сабурова С.О., Олійник В.Ф. та ін.]; за заг. ред. *В.В. Поповського*. – Харків: Тов. «Компанія СМІТ», 2006. – 564 с.