

УДК 621.391

DOI: [10.26102/2310-6018/2021.32.1.024](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2021.32.1.024)

Модель распределения трафика в многоуровневой инфокоммуникационной сети специального назначения

А.В. Морозов, Д.Ю. Пономарев

*Федеральное государственное автономное учреждение
«Военный инновационный технополис «ЭРА», Анапа, Российская Федерация*

Резюме. Инфокоммуникационные сети обеспечивают формирование базовой структуры для организации процессов анализа, обработки и передачи информации. Основные принципы построения и технологии инфокоммуникационных сетей не зависят от вида назначения сети, т. е. могут использоваться как для гражданских, так и для военных целей. В любом случае анализ распределения трафика в таких сетях позволяет оценивать качество обслуживания информационных потоков с целью обеспечения таких свойств инфокоммуникационных сетей специального назначения, как своевременность доставки информации, оперативность, устойчивость и непрерывность связи. Применение различных видов моделирования к задаче анализа распределения трафика предоставляет широкие возможности по оценке проектов инфокоммуникационных сетей на этапе их разработки, что повышает уровень их практической реализуемости. В данной работе используется тензорный анализ сетей для построения модели распределения трафика в инфокоммуникационной сети специального назначения. В качестве исследуемого объекта рассматривается многоуровневая инфокоммуникационная сеть, в которой выделяются следующие уровни: уровень сбора информации, уровень агрегации, уровень предварительной обработки, уровень информационных центров. Для оценки среднего времени для маршрутов передачи, организованных в сети, используются контурная и узловая тензорные модели. Совместное применение двух методов моделирования позволяет формализовать процесс оценки среднего времени задержки передачи информации для набора маршрутов, используемых для передачи информации. В результате моделирования инфокоммуникационной сети специального назначения были определены маршруты с максимальным значением средней задержки и сделан вывод о необходимости оптимизации распределения трафика с целью снижения времени задержки.

Ключевые слова: распределение трафика, инфокоммуникационные сети, сеть специального назначения, тензорный анализ сетей, среднее время задержки

Для цитирования: Морозов А.В., Пономарев Д.Ю. Модель распределения трафика в многоуровневой инфокоммуникационной сети специального назначения. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2021;9(1). Доступно по: <https://moitvivi.ru/ru/journal/pdf?id=899> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.32.1.024

The traffic distribution model of the multilevel infocommunication of special-purpose network

A.V. Morozov, D. Ponomarev

*Federal state autonomous institution
«Military Innovativ Technopolis «ERA», Anapa, Russian Federation*

Abstract: Infocommunication networks provide the base structure for the analysis, processing, and transmission of information. The main principles of networking and infocommunication network technologies are independent of the type of destination. Therefore, infocommunication networks can be used for dual-use (civil and military purposes). In any case, traffic distribution analysis of infocommunication networks allows estimating quality of service of information streams for providing such properties of special-use infocommunication networks as timeliness of information delivery,

promptness, sustainability, and continuity of communication. The application of different types of modeling to traffic distribution analysis provides ample opportunities for estimation of infocommunication networks projects under development that increases the practical feasibility level of these projects. In this work, the tensor analysis of networks is used for modeling traffic distribution in special-use infocommunication networks. The investigated object is the multilevel infocommunication network with several levels: gathering information level, the aggregation level, the level of preliminary processing, the level of information centers. The mesh and node tensor models are used for the estimation of the mean delay of network routes. The joint application of two methods of tensor modeling allows formalizing the process of valuation mean delay for a set of network routes. As a result, routes with maximal mean delay were determined for infocommunication network of special-purpose, and a conclusion was made about the necessity of traffic distribution optimization to reduce time delay.

Keywords: traffic distribution, infocommunication networks, tensor analysis of networks, special-purpose network, mean delay time

For citation: Morozov A.V., Ponomarev D. The traffic distribution model of the multilevel infocommunication network of special-use. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2021;9(1). Available from: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=899> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.32.1.024 (In Russ).

Введение

Современные инфокоммуникационные сети представляют собой комплекс взаимодействующих систем, необходимых для передачи и обработки информационных потоков с заданным качеством обслуживания. Одним из критериев качества обслуживания является среднее время задержки [1-4], которое определяет своевременность доставки информации, что в свою очередь влияет на такие свойства сетей специального назначения, как: оперативность, устойчивость и непрерывность связи [1,2]. Предпочтительно производить оценку среднего времени задержки для отдельных маршрутов передачи информации с целью выбора наилучшего по минимальному уровню задержек [2,3].

Системы сетей специального назначения могут быть использованы для решения различных задач по переносу информации от систем сбора информации (например, от радиолокационных станций, систем мониторинга, станций разведки, спутниковых систем дистанционного зондирования и т.д.) в информационные центры для дальнейшей обработки и анализа [1-5].

Для доставки информации в направлении от систем сбора в информационные центры обработки и анализа используются различные маршруты и каналы передачи, составляющие коммуникационное пространство инфокоммуникационной сети и формируемые различным телекоммуникационным оборудованием. При этом сети связи специального назначения могут использовать для доставки информации и сети связи общего пользования [1], в связи с чем количество маршрутов передачи может возрасти.

В таком случае, инфокоммуникационная сеть может быть представлена в виде множества связанных между собой систем обработки и передачи информации, находящихся на разных уровнях взаимодействия. Это позволяет определить многоуровневую инфокоммуникационную сеть специального назначения, как сеть специального назначения с разделением функций сбора, передачи, обработки и анализа информации по разным уровням взаимодействия систем.

Для моделирования сетей связи специального назначения могут быть использованы различные подходы, но, в любом случае, при формировании моделей инфокоммуникационных сетей необходимо учитывать, как их структуру (топологию), так и процессы поступления и обслуживания информационных потоков [1-5].

Целью работы является разработка модели многоуровневой инфокоммуникационной сети специального назначения, позволяющей оценить среднее время задержки для маршрутов передачи информации, сформированных в данной сети. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: определить уровни взаимодействия и маршруты передачи информации в исследуемой сети; сформировать инвариантную модель исследуемой сети, получить численные результаты по расчету средней задержки для сформированных маршрутов. Решение поставленных задач позволит выявить маршруты с максимальной задержкой и путем перераспределения трафика обеспечить повышение качества обслуживания информационных потоков в исследуемой сети.

Объект исследования

Обобщенный вид структуры многоуровневой инфокоммуникационной сети специального назначения представлен на Рисунке 1.

Информационные потоки формируются системами сбора информации 8-12 и направляются на следующий уровень, уровень агрегации (системы 5-7), где производится объединение потоков с целью уменьшения количества маршрутов передачи и снижения сложности оборудования каналообразования. С целью повышения надежности доставки информации в сети на уровне агрегации введены линии связи между системами 5 и 6 и системами 6 и 7. На верхних уровнях сети элементы одного уровня связаны дополнительными линиями.

Далее информационные потоки поступают в центры предварительной обработки 3,4 для подготовки передачи информации в центры верхнего уровня. На этапе предварительной подготовки также может обеспечиваться фильтрация поступающей информации с целью снижения нагрузки на информационные центры 1,2. В информационных центрах производится анализ и окончательная обработка поступившей информации. Маршрут передачи информации определяется используемой технологией, видом маршрутизации, параметрами систем и др., например, одним из маршрутов является путь 8-5-3-1 и при этом могут использоваться (в зависимости от состояния сети) и альтернативные пути: 8-5-6-4-2-1 или 8-6-7-4-3-2-1. Естественно, что характеристики процесса передачи информации будут зависеть от выбранного пути.

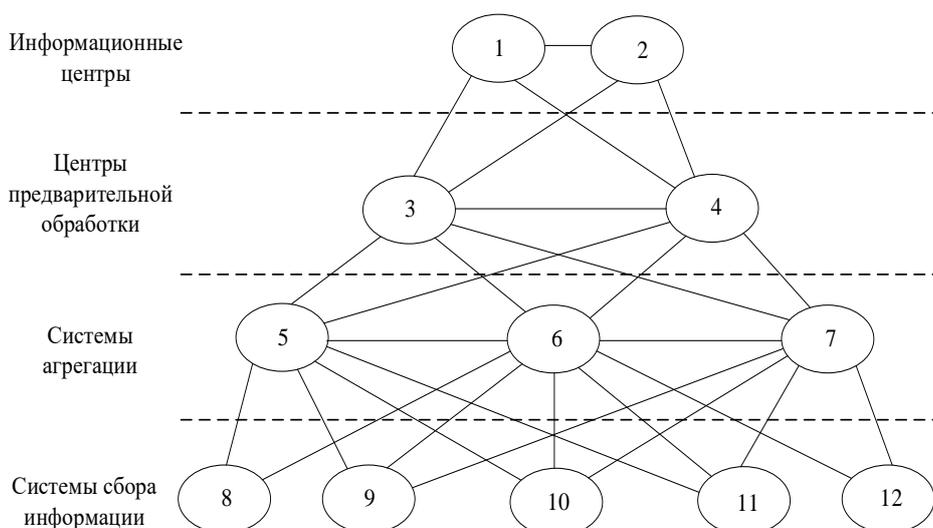


Рисунок 1 – Общая структура многоуровневой инфокоммуникационной сети
 Figure 1 – Common structure of multilevel infocommunications network

Представленная структура сети обладает множеством связей. При наличии мобильных систем в сети число связей может динамически изменяться, что приводит к изменениям маршрутов передачи информации. В таком случае может быть не гарантирована доставка информации, либо доставка информации может быть произведена с большой задержкой, что в некоторых случаях приводит к катастрофическим последствиям (например, при передаче радиолокационной информации в диспетчерские центры или при доставке информации об оперативной обстановке) [1-4]. Таким образом, одной из задач анализа таких сетей является задача моделирования распределения трафика в инфокоммуникационной сети с целью поддержки процедур управления распределением трафика. В дальнейшем такая модель может быть использована для разработки оптимизационных моделей по снижению времени доставки или вероятности потери информации.

В качестве основного математического аппарата разрабатываемой модели предлагается использовать тензорный анализ сетей [6, 7]. Такой подход позволит учесть, как процессы, связанные с обслуживанием потоков информации, так и пути передачи информации, т.е. топологию сети.

Инвариантные модели

Для построения исходной сети тензорной модели рассматриваемой сети каждую систему представляем в виде набора входных и выходных интерфейсов и системы обработки. Например, система 9 (Рисунок 1) при одном канале сбора информации (один источник информации) может быть представлена в виде модели, структура которой изображена на Рисунке 2. При наличии нескольких источников информации соответственно увеличивается и число входных интерфейсов [6, 7].

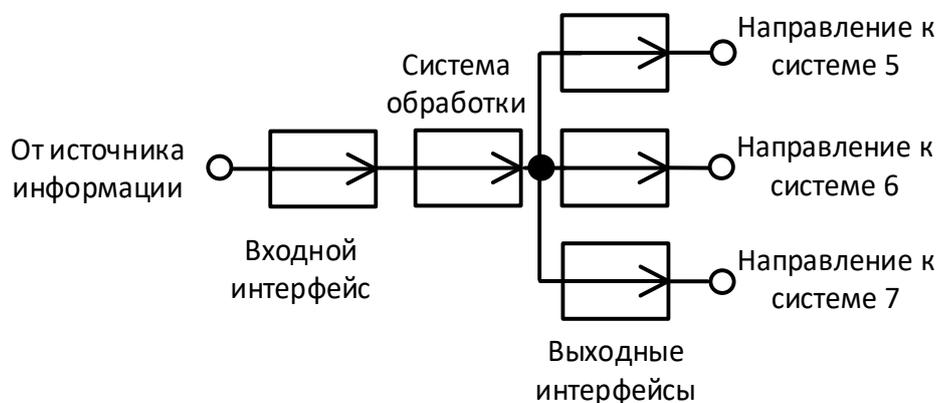


Рисунок 2 – Модель системы 9
 Figure 2 – Model of system 9

Модели интерфейсов позволяют разделить входящие и исходящие информационные потоки и оценить вероятностно-временные характеристики процессов приема/передачи информации. Для оценки характеристик внутренних процессов используется отдельная система, представленная на Рисунке 2, как система обработки. Все системы модели являются системами массового обслуживания с заданной дисциплиной обслуживания. Для используемой методологии выбор дисциплины обслуживания не является принципиальным.

Объединив отдельные модели систем, получим структуру модели сети, фрагмент которой представлен на Рисунке 3. В тензорной методологии такое представление получило название исходной сети [6, 7].

На рисунке показаны модели систем 8, 5, 3 и 2. Каждая модель, как было указано выше, входные интерфейсы (например, для модели системы 3 это интерфейсы связи с системами 4-7), выходные интерфейсы (для той же системы это интерфейсы связи с системами 2 и 4), модель внутренней системы обработки. Между системами на Рисунке 3 находятся модели межсистемных каналов связи (как проводных, так и беспроводных).

В дальнейшем структура исходной сети приводится к контурному или узловому виду путем использования примитивной сети, которая является декомпозицией исходной сети [6, 7]. В первом случае возможно учесть маршруты передачи информации путем ввода контурных интенсивностей, во втором обеспечить решение задачи распределения трафика при использовании узловых загрузок.

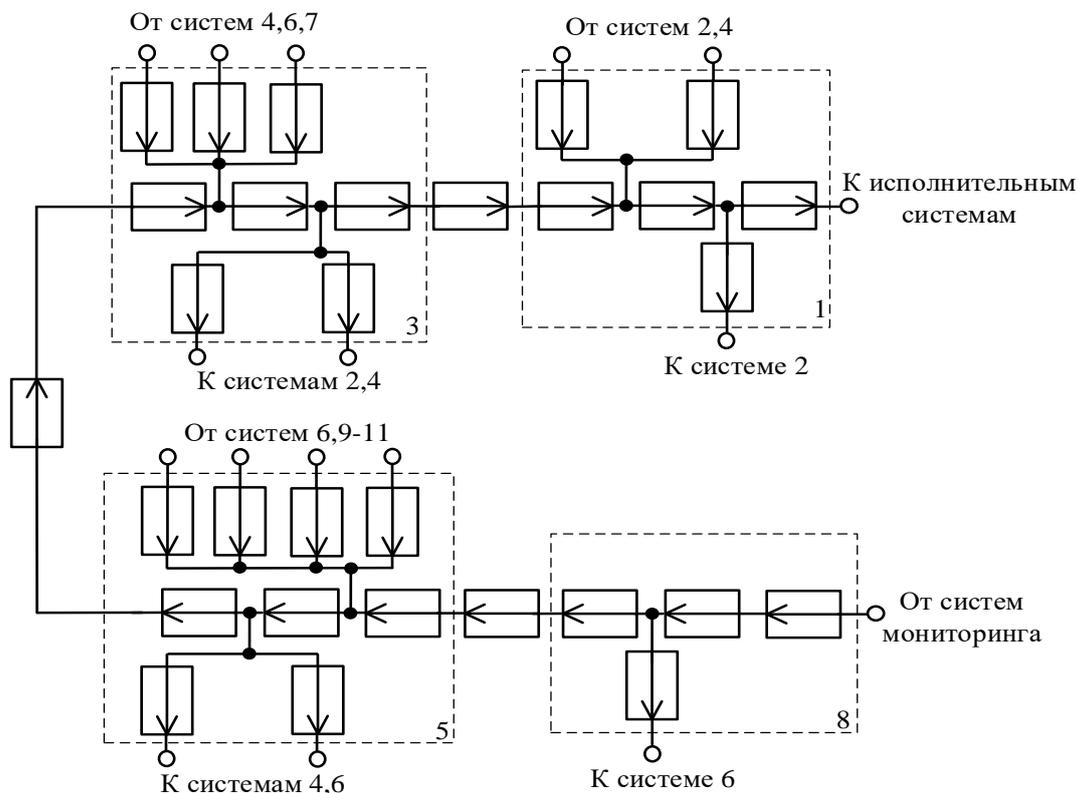


Рисунок 3 – Фрагмент исходной сети тензорной модели исследуемой сети
 Figure 3 – Fragment of the initial network of the tensor model of the investigated network

В контурном методе независимыми величинами являются потоковые характеристики, такие как интенсивности поступления сообщений (среднее число сообщений в единицу времени) в систему λ . В узловом методе независимыми являются системные характеристики, к которым относится загрузка систем: ρ . Потоковые характеристики связаны с системными через параметры систем: среднюю длительность обслуживания \bar{t} и интенсивность обслуживания μ . Тогда для контурного метода инвариантом является выражение для загрузки: $\rho = \lambda \bar{t}$, а для узлового его преобразование: $\lambda = \mu \rho$ [7].

Алгоритм применения инвариантного моделирования к задаче исследования инфокоммуникационных сетей подробно рассмотрен в [6, 7].

Для формирования контурной модели необходимо обеспечить замыкание несвязанных узлов. Для того чтобы контур был однозначно связан с маршрутом

передачи, вводится мнимая система между системой-источником и системой-получателем и определяются системы модели, через которые проходит передача информации. Это продемонстрировано на Рисунке 4 для ранее представленного фрагмента сети (Рисунок 3). Маршрут передачи определяется следующей последовательностью систем (не участвующие в формировании маршрута системы на рисунке не показаны): 8-5-3-1. Мнимая система, необходимая для формирования замкнутого пути показана пунктиром. Эта система используется для введения топологической информации в модель исследуемой сети, но при расчете временных характеристик маршрута передачи ее наличие в модели не учитывается.

В контурном методе контурные интенсивности являются базисом пространства модели и позволяют определить маршруты передачи информации в модели сети. Пример контурной интенсивности λ_a представлен на Рисунке 4. Уравнение поведения контурной модели сети записывается, как [6, 7]:

$$(C_{\beta'}^{\beta})_t t_{\beta\beta} C_{\beta}^{\beta} \lambda^{\beta'} = (C_{\beta'}^{\beta})_t \rho_{\beta}, \quad (1)$$

где $\lambda^{\beta'}$ – вектор контурных интенсивностей;

ρ_{β} – вектор нагрузок примитивной сети;

$C_{\beta'}^{\beta}$ – тензор преобразования интенсивностей поступления позволяет осуществить от примитивной сети к контурной, который в общем случае определяет связи между элементами модели, а в частности задает маршруты передачи информации (индекс t при $(C_{\beta'}^{\beta})_t$ обозначает транспонированный тензор перехода);

$t_{\beta\beta}$ – тензор средних длительностей обслуживания отдельных систем примитивной контурной сети.

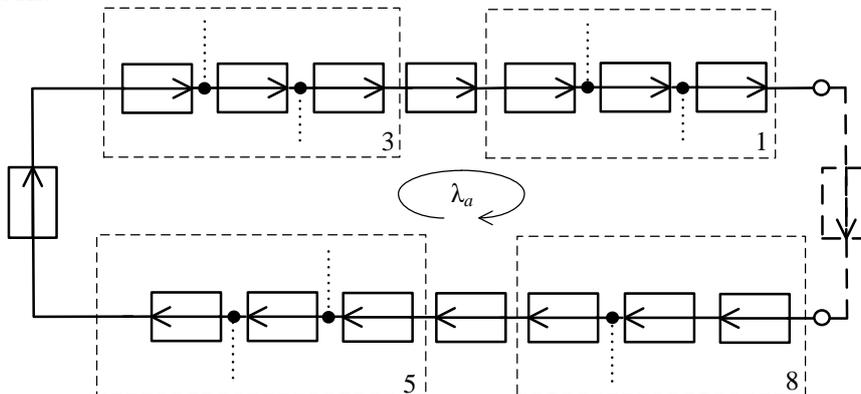


Рисунок 4 – Фрагмент контурной модели исследуемой сети
 Figure 4 – Fragment of the mesh model of the investigated network

Уравнение (1) решается относительно контурных интенсивностей с целью получения распределения трафика в сети через $\lambda^{\beta} = C_{\beta'}^{\beta} \lambda^{\beta'}$, что в дальнейшем позволяет найти загрузки систем исходной сети ρ^{α} и определить вероятностно-временные характеристики как отдельных систем, так и всей сети в целом.

Для узловой модели сети уравнение поведения имеет следующий вид [6, 7]:

$$\left(A_{\beta}^{\beta'}\right)_t \mu^{\beta\beta} A_{\beta}^{\beta'} \rho_{\beta'} = A_{\beta}^{\beta'} \lambda^{\beta} \quad (2)$$

где $\rho_{\beta'}$ – вектор узловых загрузок;

λ^{β} – вектор интенсивностей поступления в системы узловой примитивной сети;

$A_{\beta}^{\beta'}$ – тензор преобразования необходимый для перехода от примитивной сети к узловой (в отличие от $C_{\beta'}^{\beta}$ данный тензор в общем случае связан с заданием маршрутов передачи информации, но при невырожденности тензора $C_{\beta'}^{\beta}$ между данными тензорами можно

определить соответствие $\left[\left(C_{\beta'}^{\beta}\right)_t\right]^{-1} = A_{\beta}^{\beta'}$ [8]);

$\mu^{\beta\beta}$ – тензор интенсивностей обслуживания отдельных систем примитивной узловой сети. Узлом считается соединение двух и более систем или точка входа/выхода трафика.

Решение уравнения (2) относительно вектора $\rho_{\beta'}$ позволяет найти вектор загрузок исходной сети, как: $\rho_{\alpha} = A_{\beta}^{\beta'} \rho_{\beta'}$. Распределение трафика определяется выражением $\lambda_i = \mu_i \rho_i$, где: i – номер системы ($i = 1 \dots n$, n – количество систем в исходной сети), μ_i – интенсивность обслуживания системы i , ρ_i – загрузка системы i (определяется значениями соответствующих элементов вектора ρ_{α}). Также, вектор загрузок исходной сети используется для нахождения вероятностно-временные характеристик систем. Для заданной дисциплины обслуживания определяются значения элементов вектора средней задержки $\mathbf{T} = (T_1 \ T_2 \ \dots \ T_n)$, которые используются для нахождения вектора средней задержки на отдельных маршрутах передачи: $\mathbf{R} = \mathbf{T}^T \mathbf{C}$. Совместное использование результатов контурного и узлового методов позволяет оценить задержки на маршрутах передачи информации исследуемой сети и при необходимости произвести перераспределение трафика λ_i с целью повышения качества обслуживания путем снижения времени задержки в требуемых направлениях [6, 7].

Численные результаты

Для получения численных результатов было использовано специализированное программное обеспечение [9, 10]. Нумерация систем модели производилась в соответствии с данным программным обеспечением. Фрагмент модели исследуемой сети в программной среде представлен на Рисунке 5.

Исходная сеть модели содержит 112 систем распределения информации, из них моделями интерфейсов являются шестьдесят четыре системы, двенадцать систем обеспечивают моделирование процессов обработки, тридцать одна система моделируют каналы связи и пять систем это модели источников трафика.

Для формирования контурной модели сети дополнительно введены десять мнимых систем (номера: 113-122), связывающих все источники трафика (пять систем под номерами 1, 34, 40, 46, 48) со всеми получателями (две системы: 29, 101). Таким образом выполняется условие равенства отправленного и полученного трафика:

$$\sum \lambda_{\text{источники}} = \sum \lambda_{\text{получатели}} \quad (3)$$

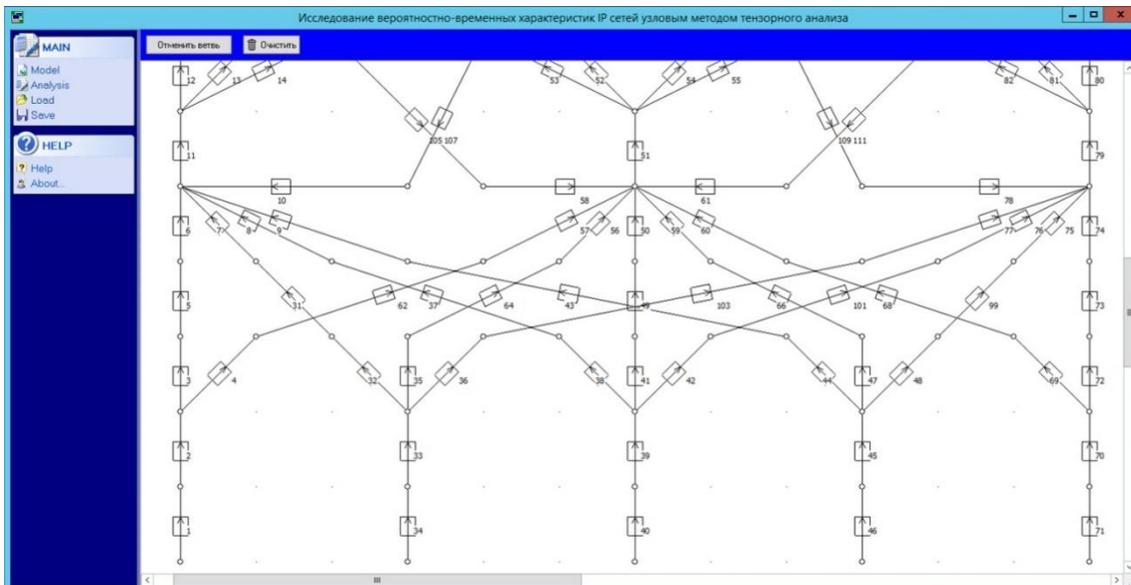


Рисунок 5 – Фрагмент узловой модели исследуемой сети в программной среде
 Figure 5 – Fragment of the node model of the investigated network from the special software

Маршруты передачи информации определяют контурные интенсивности данной модели. В представленной работе определено 17 маршрутов, однако их число зависит от состояния сети и при необходимости может быть либо увеличено, либо сокращено. Для данного количества маршрутов тензор преобразования $C_{\beta'}^{\beta}$ имеет размерность 122 строки (определяется числом систем модели) на 17 столбцов (определяется числом маршрутов) и его элементы показывают участие той или иной системы модели в формировании контура (количество контуров равно числу маршрутов), соответствующего маршруту передачи в исследуемой сети. В связи с большой размерностью в работе представлен только фрагмент данного тензора:

$$C_{\beta'}^{\beta} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots \end{pmatrix}.$$

Например, маршрут 1 в исследуемой сети, проходящий через системы 8-5-3-1, соответствует первому столбцу тензора $C_{\beta'}^{\beta}$ (системы модели: 1, 2, 3, 5, 6, 11, 12, 15, 16, ... 29, ... 113). Мнимая система 113 обеспечивает формирование замкнутого контура. Маршрут 16, проложенный через системы 11-7-6-5-3-1 исследуемой сети, соответствует столбцу 16 данного тензора (системы модели: 10, 11, 12, 15, 16, 20, ... 29, ... 116).

Полученный тензор $C_{\beta'}^{\beta}$ используется для определения элементов уравнения (1). При заданных значениях вектора загрузок примитивной сети ρ_{β} и тензора средних длительностей обслуживания $t_{\beta\beta'}$ можно определить интенсивность трафика для каждого маршрута передачи информации в исследуемой сети. Для получения численных результатов средняя длительность обслуживания определена равной 0,05 мс для большинства систем модели и 0,01 мс для наиболее загруженных участков. Выбор значений загрузок обусловлен распределением трафика в исследуемой сети: для большинства систем – 0,5, для отдельных систем – 0,8 и 0,9. Изменение значений загрузок позволяет производить перераспределение трафика в зависимости от действующей обстановки и требуемых показателей качества.

В результате расчета получен вектор распределения трафика по маршрутам сети (представлен частично, для данного случая интенсивности поступления измеряются в

$$\lambda^{\beta'} = \begin{pmatrix} 0,138 \\ 6,535 \\ 1,197 \\ 12,838 \\ \vdots \\ 6,01 \\ 5,414 \end{pmatrix}.$$

сообщениях в секунду, сообщ/с): Данный результат демонстрирует, что

при передаче информации все маршруты задействованы (все контурные интенсивности положительные). Далее, необходимо определить интенсивности поступления для каждой системы $\lambda^{\beta} = C_{\beta'}^{\beta} \lambda^{\beta'}$ (полученные значения должны соответствовать условию (3)), что позволяет найти загрузки отдельных систем ($\rho = \lambda \bar{t}$), и при заданных дисциплинах обслуживания обеспечивает нахождение среднего времени задержки ($\bar{T} = f(\rho)$) как для отдельных маршрутов передачи информации, так и для всей сети в целом. Для данного случая находим только интенсивности поступления для каждой системы, которые будем использовать в узловой модели исследуемой сети.

В отличие от контурной узловая модель исследуемой сети не содержит замкнутых путей и мнимые системы используются для сохранения потоков при размыкании таких путей в исходной сети. Узловая модель содержит 132 системы, из них 20 – мнимые. В узловой модели тензор преобразования $A_{\beta}^{\beta'}$ содержит информацию о соединениях между всеми системами, поэтому он имеет размерность 132x132 (в связи с большой размерностью полностью не приводится):

$$A_{\beta}^{\beta'} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

В каждом столбце тензора $A_{\beta}^{\beta'}$ содержится информация о связи систем друг с другом с учетом направления потока передачи информации. Например, в третьем столбце показано, что в данный узел поступает поток из второй системы, который передается в третью и четвертую системы; а шестой столбец демонстрирует, что в этот узел поток информации поступает от систем 6-10, а уходит через систему 11. В соответствии с (2) вектор интенсивностей поступления определяется, как:

$$\lambda^{\beta} = \begin{pmatrix} \lambda_1 - \lambda_2 \\ \lambda_2 - \lambda_3 - \lambda_4 \\ \lambda_3 - \lambda_5 \\ \lambda_4 - \lambda_{62} \\ \lambda_5 - \lambda_6 \\ \lambda_6 + \lambda_7 + \lambda_8 + \lambda_9 + \lambda_{10} - \lambda_{11} \\ \vdots \end{pmatrix}.$$

Системы, которые подключены к узлу, у которого это подключение единственное, определяют независимые интенсивности поступления. Для получения решения уравнения (2) необходимо задать эти интенсивности. Естественно, что также должны быть заданы и интенсивности обслуживания. Для получения численных результатов используем значения, найденные для контурной модели, поэтому интенсивности источников в узловой модели равны: $\lambda_{34} = 44,955$ сообщ/с; $\lambda_{40} = 16,819$ сообщ/с; $\lambda_{46} = 17,189$ сообщ/с; $\lambda_{71} = 13,37$ сообщ/с. Интенсивность λ_1 является зависимой переменной и поэтому определяется в результате расчета. Интенсивности трафика на выходе сети: $\lambda_{29} = 47,814$ сообщ/с; $\lambda_{97} = 57,803$ сообщ/с, что демонстрирует выполнение условия (3).

Решение уравнения (2) позволяет найти узловые загрузки $\rho_{\beta'}$. Откуда, определяются загрузки отдельных систем $\rho_{\alpha} = A_{\beta}^{\beta'} \rho_{\beta'}$ и распределение трафика в сети. Полученные значения (загрузок или интенсивностей поступления) используем для нахождения среднего времени задержки в каждой системе при заданной дисциплине обслуживания. Например, если использовать в качестве систем модели системы вида $M/M/1$, то средняя задержка для всей сети составит 11,1536 мс, а если использовать $M/D/1$, то средняя задержка для сети в целом будет равна 7,8568 мс. При этом среднее время задержки для маршрута передачи 8-6-4-3-1 (Рисунок 1) по результатам расчета составило 1,03 мс (для систем $M/M/1$) и 0,77 мс (для систем $M/D/1$).

Использование тензора преобразования контурной модели сети $C_{\beta'}^{\beta}$ позволяет найти среднее время задержки для всех маршрутов, организованных на сети, как: $\mathbf{R} = \mathbf{T}^T \mathbf{C}$. Например, для определенных выше исходных данных задержка по остальным организованным маршрутам представлена в Таблице 1 при использовании систем $M/M/1$. В скобках представлен результат для систем вида $M/D/1$.

Таблица 1 – Среднее время задержки для маршрутов исследуемой сети
 Table 1 – Mean delay of routes of the investigated network

Номер маршрута	1	2	3	4	5	6	7	8
Среднее время задержки, мс	1,357 (0,913)	0,986 (0,728)	0,895 (0,683)	1,261 (0,825)	1,307 (0,788)	1,653 (1,062)	1,525 (1,018)	1,691 (1,08)
Номер маршрута	9	10	11	12	13	14	15	16
Среднее время задержки, мс	1,356 (0,913)	0,899 (0,685)	0,557 (0,394)	2,101 (1,465)	1,742 (1,181)	1,734 (1,142)	1,395 (0,953)	2,351 (1,57)

Как видно из таблицы, среднее время задержки на каждом маршруте является достаточно малой величиной, что позволяет сделать вывод о хорошем уровне качества обслуживания информационных потоков в исследуемой сети. При этом можно отметить, что присутствуют два маршрута на которых задержка больше 2 мс (маршруты: 12 и 16). Для снижения времени задержки и равномерной загрузки на данных маршрутах необходимо произвести перераспределение трафика в сети с использованием различных методов оптимизации.

Заключение

Современные инфокоммуникационные сети обладают сложной структурой связи с возможностью организации большого числа маршрутов. Для обеспечения своевременной доставки информации в таких сетях требуется решить задачи по оценке и анализу качественных показателей, к которым относится и среднее время задержки. С целью определения данных показателей в работе используются методы инвариантного моделирования.

Под инвариантным моделированием в данной работе понимается формирование моделей инвариантных к преобразованиям структуры исследуемых сетей. Представленные в работе модели (контурная и узловая) позволяют учитывать маршруты передачи информации и обеспечивают возможность модификации маршрутов в модели сети без изменения алгоритма формирования модели.

Контурная модель в явном виде позволяет задать маршруты передачи информации при моделировании сети путем использования тензора преобразования $C_{\beta'}^{\beta}$. Результат моделирования обеспечивает получение решения в виде распределения трафика по отдельным маршрутам передачи информации, что позволяет оценить использование пропускной способности каждого маршрута.

При формировании узловой модели используется информация о связности систем модели сети, что позволяет ввести топологическую составляющую в тензорную модель через тензор преобразования $A_{\beta'}^{\beta}$. Применение узловой модели подразумевает использование в качестве исходных данных в практическом смысле более удобных, относительного контурного метода, элементов инвариантного уравнения: интенсивностей поступления и интенсивностей обслуживания. При этом для анализа временных задержек на маршрутах исследуемой сети можно использовать тензор преобразования контурной модели $C_{\beta'}^{\beta}$, как матрицу маршрутизации.

Таким образом, комбинированное применение двух методов инвариантного моделирования позволяет определить один из показателей качества обслуживания для всех маршрутов исследуемой сети и, в дальнейшем, обеспечить управление распределением трафика с целью повышения качественных характеристик инфокоммуникационных сетей специального назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Макаренко С. И. Описательная модель сети связи специального назначения. *Системы управления, связи и безопасности*. 2017;2:113-164. DOI: 10.24411/2410-9916-2017-10205.
2. Пылинский М.В., Кривцов С.П., Захарченко А.С. Формирование иерархической системы показателей эффективности процесса функционирования сети связи специального назначения как многоуровневой и динамической системы при ведении боевых действий и проведении контртеррористических операций. *Вопросы оборонной техники. Серия 16: технические средства противодействия терроризму*. 2020;3-4(141-142):103-110.
3. Коношенко С.А., Кретов А.А., Дудукин А.С. Алгоритм адаптивной маршрутизации потоков заявок в мультисервисной сети связи. *Вопросы оборонной техники. Серия 16: технические средства противодействия терроризму*. 2020;1-2(139-140):68-71.
4. Легков К.Е. Математическая модель инфокоммуникационной системы специального назначения. *Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли*. 2016;8(2):6-14.
5. Пылинский М.В. Особенности моделирования сети связи специального назначения. *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2018;10:483-490.
6. Пономарев Д.Ю. Тензорная методология в информационных коммуникациях. *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2012;55(5):18-23.
7. Пономарев Д.Ю. Особенности применения тензорного анализа к моделированию телекоммуникационных сетей. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2018;6(2):46-63.
8. Петров А.Е. *Тензорный метод двойственных сетей*. 2007.
9. Пономарев Д.Ю. Исследование вероятностно-временных характеристик сетей массового обслуживания контурным методом тензорного анализа. *ФИПС (Роспатент): Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ*. 07.10.2010;2010616674.

10. Пономарев Д. Ю. Исследование вероятностно-временных характеристик IP сетей узловым методом тензорного анализа. *ФИПС (Роспатент): Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ*. 25.09.2009;2009615358.

REFERENCES

1. Makarenko S.I. Descriptive Model of Special Communication Network. *Systems of Control, Communication and Security*. 2017;2:113–164. DOI: 10.24411/2410-9916-2017-10205.
2. Pylinsky M.V., Krivtsov S.P., Zakharchenko A.S. Hierarchical system of performance indicators for the operation of a special purpose communication networks as a multi-level and dynamic system. *Scientific and Technical Journal. Counter-terrorism technical devices. Issue 16*. 2020;3-4(141-142):103-110.
3. Konoshenko S.A., Kretov A.A., Dudukin A.S. Adaptive routing of application flows in a multiservice communication network. *Scientific and Technical Journal. Counter-terrorism technical devices. Issue 16*. 2020; 1-2(139-140): 68-71.
4. Legkov K.E. A mathematical model of the infocommunication system of special purpose. *H&ES Research*. 2016;8(2):6-14.
5. Pylinskii M.V. The details of modeling of communication networks of special purpose. *Izvestiya TulGU. Technical sciences*. 2018;10:483–490.
6. Ponomarev D.Yu. Tenzornaya metodologiya v informatsionnykh kommunikatsiyakh. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie*. 2012;55(5):18-23.
7. Ponomarev D. Features of application of tensor analysis to telecommunication networks modelling. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2018;6(2):46-63.
8. Petrov A.E. *Tenzornyy metod dvoystvennykh setey*. 2007.
9. Ponomarev D. Issledovanie veroyatnostno-vremennykh kharakteristik setei massovogo obsluzhivaniya konturnym metodom tenzornogo analiza. *FIPS (Rospatent): Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EVM*. 07.10.2010;2010616674.
10. Ponomarev D. Issledovanie veroyatnostno-vremennykh kharakteristik IP setei uzlovym metodom tenzornogo analiza. *FIPS (Rospatent): Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EVM*. 25.09.2009;2009615358.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Морозов Андрей Владимирович, д-р техн. наук, профессор, заместитель начальника технополиса по научной и образовательной деятельности, ФГАУ «Военный инновационный технополис «ЭРА», Анапа, Российская Федерация.
e-mail: era_1@mil.ru

Andrei V. Morozov, Dr. Sci. (Tech.), professor, deputy head of technopolis for scientific and educational activities, Federal state autonomous institution «Military Innovativ Technopolis «ERA», Anapa, Russia

Пономарев Дмитрий Юрьевич, д-р техн. наук, доцент, старший научный сотрудник, научно-исследовательский отдел, ФГАУ «Военный инновационный технополис «ЭРА», Анапа, Российская Федерация.
e-mail: era_1@mil.ru
ORCID: [0000-0003-1639-5935](https://orcid.org/0000-0003-1639-5935)

Dmitriy Yu. Ponomarev, Dr. Sci. (Tech.), docent, senior researcher, research department, Federal state autonomous institution «Military Innovativ Technopolis «ERA», Anapa, Russia

