

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

INFORMATION TECHNOLOGIES IN EDUCATIONAL ACTIVITIES

Научная статья
УДК 004.896
<https://doi.org/10.24143/2072-9502-2024-4-89-106>
EDN KETSRQ

Формирование виртуальной лаборатории для системного анализа телекоммуникационных сетей

*А. А. Сорокин^{1✉}, Н. С. Мальцева², Ф. В. Поздняков³,
Е. А. Джалмухамбетова⁴, А. Н. Цыгута⁵, А. С. Логинов⁶*

*^{1, 2, 6} Астраханский государственный технический университет,
Астрахань, Россия, alsorokin.astu@mail.ru ✉*

*^{1, 4, 5} Каспийский институт морского и речного транспорта имени генерал-адмирала Ф. М. Апраксина –
филиал ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта»,
Астрахань, Россия*

*³ Филиал АО «Газпром газораспределение» в Астраханской области,
Астрахань, Россия*

*⁵ Волжский государственный университет водного транспорта,
Нижний Новгород, Россия*

Аннотация. Предложена концептуальная структура лабораторного комплекса для исследования телекоммуникационных сетей. Структура состоит из семи уровней: теоретического, модельного, имитационного, гостевой операционной системы, виртуальной рабочей станции, корневой операционной системы, аппаратной рабочей станции. В рамках каждого уровня решается задача, позволяющая реализовать виртуальную лабораторию. Такая структура позволяет корректировать решения, используемые на каждом из уровней при отсутствии необходимости корректировок решений на других уровнях, при этом должно выполняться условие совместимости реализуемых решений. Для реализации виртуальной лаборатории, на основе предложенной структуры, выбраны следующие решения: программный пакет Network Simulator, визуализаторы Network Animator и SaVi, графопостроители TtaceGraph и X-Graph – для решения задачи имитационного уровня; задачи уровня гостевой операционной системы решаются при помощи Linux Debian; при помощи программного пакета VMware Workstation Player решаются задачи уровня виртуальной рабочей станции; задачи уровня корневой операционной системы и аппаратной рабочей станции решаются средствами программного обеспечения и оборудования учебного заведения и/или обучающегося; задача модельного уровня решается посредством совокупности файлов, описывающих проведение эксперимента; задача теоретического уровня – совокупностью положений и знаний, на основе которых проводится описание процессов в исследуемой телекоммуникационной сети. В рамках практической реализации виртуальной лаборатории создан видеокурс, поясняющий возможности использования программного обеспечения, показана способность комплекса моделировать функционирование телекоммуникационной системы в различных режимах работы.

Ключевые слова: лабораторный комплекс, телекоммуникационная сеть, моделирование, программное обеспечение, анализ информационного трафика, network simulator, TCL, сетевые протоколы, виртуализация

Для цитирования: *Сорокин А. А., Мальцева Н. С., Поздняков Ф. В., Джалмухамбетова Е. А., Цыгута А. Н., Логинов А. С.* Формирование виртуальной лаборатории для системного анализа телекоммуникационных сетей // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2024. № 4. С. 89–106. <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2024-4-89-106>. EDN KETSRQ.

Original article

Formation of a virtual laboratory for the telecommunication networks system analysis

*A. A. Sorokin^{1✉}, N. S. Maltseva², F. V. Pozdnyakov³,
E. A. Dzhalumukhambetova⁴, A. N. Tsyguta⁵, A. S. Loginov⁶*

*^{1, 2, 6}Astrakhan State Technical University,
Astrakhan, Russia, alsorokin.astu@mail.ru*

*^{1, 4, 5}Caspian Institute of Sea and River Transport named after Admiral F. M. Apraksin,
branch of the Volga State University of Water Transport,
Astrakhan, Russia*

*³Gazprom Gazoraspredelenie JSC, branch in Astrakhan region,
Astrakhan, Russia*

*⁵Volga State University of Water Transport,
Nizhniy Novgorod, Russia*

Abstract. A conceptual structure of a laboratory complex for studying telecommunication networks was proposed. The structure consists of seven levels: theoretical, model, simulation, guest operating system, virtual workstation, root operating system, hardware workstation. Within each level, a task is solved that allows implementing a virtual laboratory. Such a structure allows adjusting the solutions used at each level without the need to adjust the solutions at other levels, while the compatibility condition of the implemented solutions must be met. To implement a virtual laboratory, based on the proposed structure, the following solutions were selected: the Network Simulator software package, the Network Animator and SaVi visualizers, the TraceGraph and X-Graph plotters - to solve the simulation level problem, the guest operating system level problems are solved using Linux Debian, the VMware Workstation Player software package is used to solve virtual workstation level problems, the root operating system and hardware workstation level problems are solved by means of the software and equipment of the educational institution and/or the student, the model level problem is solved by means of a set of files describing the experiment, the theoretical level problem is solved by a set of provisions and knowledge, on the basis of which the processes in the studied telecommunication network are described. As part of the practical implementation of the virtual laboratory, a video course was created explaining the possibilities of using the software, the ability of the complex to simulate the functioning of a telecommunication system in various operating modes is shown.

Keywords: laboratory complex, telecommunication network, modeling, software, information traffic analysis, network simulator, TCL, network protocols, virtualization

For citation: Sorokin A. A., Maltseva N. S., Pozdnyakov F. V., Dzhalumukhambetova E. A., Tsyguta A. N., Loginov A. S. Formation of a virtual laboratory for the telecommunication networks system analysis. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, computer science and informatics.* 2024;4:89-106. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2024-4-89-106>. EDN KETSRQ.

Введение

Важность проведения различных системных исследований обуславливается необходимостью учета взаимного влияния различных факторов, которые оказывают воздействие на объекты анализа. Особенностью используемых телекоммуникационных сетей (ТКС) является то, что на процесс пакетной передачи информации влияют такие характеристики, как загрузка буферов в сетевых узлах, состояние

каналов передачи информации и другие факторы, которые могут вызвать ошибки, приводящие к потерям информационных пакетов. Поэтому при анализе разрабатываемой или модернизируемой ТКС необходимо проведение различных исследований, позволяющих всесторонне изучить ее функционирование и реакцию на возмущающие факторы.

Исследование функционирования отдельных элементов ТКС возможно при помощи различных

макетов и стендов. Натурное воспроизведение функционирования системы передачи информации, состоящей хотя бы из нескольких узлов и обслуживающей поступление заявок от нескольких сервисов (или клиентов), требует привлечения значительных материальных ресурсов и трудозатрат, поэтому для воспроизведения работы подобных объектов широко применяются средства имитационного моделирования.

Одним из известных средств моделирования сложных систем является программный пакет MATLAB Simulink. Моделирование ТКС в MATLAB Simulink обсуждается в [1, 2]. Существуют специализированные программные пакеты, ориентированные на моделирование и исследование закономерностей, происходящих в ТКС, одним из наиболее известных решений в этой области является OPNET [3]. Опыт применения OPNET, в частности, приводится в работах [4, 5]. Особенностью такого программного обеспечения (ПО), как MATLAB Simulink и OPNET, является наличие разветвленной службы поддержки. Распространение подобного ПО проводится на основе коммерческих лицензий. Как показывает опыт, применение коммерческого ПО ограничивается высокой стоимостью лицензии на использование и дополнительными ограничениями, которые могут накладывать владельцы лицензий по различным причинам. Альтернативой коммерческому ПО являются продукты с открытым исходным кодом [6] или решения, предусматривающие бесплатное использование, в том числе для научных исследований. Преимущество подобного ПО – возможность использования широким кругом лиц, что позволяет выполнять его установку не только на оборудовании научной организации, но и на личных устройствах участников исследования. Это упрощает организацию научно-исследовательского процесса, когда участники ограничены возможностью личного посещения организации, где выполняется исследование, например, когда взаимодействие участников исследовательского процесса происходит в удаленном формате. Интеграция свободно распространяемого ПО в практическое использование сопряжена с рядом трудностей, обусловленных тем, что часто на компьютерах участников исследования используются Windows-подобные операционные системы (ОС), тогда как программы реализуемых в рамках «бесплатных» лицензий часто ориентированы на ОС семейства GNU/Linux. Применительно к исследованиям в области ТКС существует необходимость использования ПО, которое позволяет анализировать процессы по обмену разнородным трафиком в различных системах передачи информации.

Цель работы – предложение принципов формирования виртуальной лаборатории для системного анализа ТКС.

Концептуальная структура виртуальной лаборатории для исследования и анализа телекоммуникационных сетей

Спецификой реализации виртуальной лаборатории (ВЛ) является то, что наиболее часто на компьютерах пользователей и учебных заведений используются Windows-подобные ОС, как правило, это Windows XP, 7, 10, 11. Ожидается и дальнейшее развитие этой линейки ОС. Под Windows-подобные ОС разработано значительное количество прикладного ПО, и это в значительной степени «привязывает» пользователя к данному типу ОС и затрудняет переход на ОС других видов, в том числе Unix-подобные, поэтому при внедрении ПО, ориентированного на ОС семейства GNU/Linux, возникает задача их совместного использования с Windows-подобными ОС.

Одним из вариантов решения этой задачи является одновременная установка двух и более типов ОС на одной рабочей станции (РС). Подобный вариант решения задачи связан с рядом следующих ограничений:

- установка нескольких ОС на одной РС требует углубленных знаний в области администрирования персонального компьютера, что не всегда возможно в условиях, когда исследователь работает самостоятельно за пределами научной организации;
- для установки нескольких ОС требуется предварительное резервирование под них определенных частей дискового пространства, тогда как в рамках решаемой задачи целесообразно интегрировать Unix-подобную ОС на компьютер, на котором уже установлена ОС Windows. Дополнительно в условиях научного заведения часто необходимо масштабировать программный комплекс на несколько компьютеров, располагающихся в том числе и в разных лабораториях, в результате установка нескольких ОС на большом количестве компьютеров требует дополнительных трудовых затрат как в процессе его внедрения, так и при последующем администрировании в процессе эксплуатации.

Альтернативой одновременной установки нескольких ОС на компьютер является виртуализация на нем нескольких РС. Подобная задача решается при помощи специального ПО, называемого гипервизором. Примером такого ПО являются VirtualBox, VMware Workstation Player, Microsoft Hyper-V, KVM и их аналоги. Гипервизор позволяет распределять вычислительные ресурсы РС или сервера между несколькими ОС, обеспечивать изоляцию на логическом уровне и возможность использования выделенных ресурсов в монопольном режиме. После установки гипервизора у пользователя компьютера появляется возможность зарезервировать часть его вычислительных ресурсов под дополнительную ОС. Эта ОС функционирует на виртуальной машине

(VM, от англ. Virtual machine), которая запускается средствами гипервизора и находится «внутри» физической РС. Установка ОС на виртуальную машину в целом аналогична установке на физическую РС. В результате установки на физической РС создается файл-образ виртуального жесткого диска, в котором хранятся все файлы и программы, установленные на виртуальную машину. Применительно к объекту исследования в состав файла-образа включаются следующие элементы:

- 1) Unix-подобная ОС;
- 2) программа-симулятор ТКС;
- 3) средства обработки и визуализации результатов экспериментов, выполненных в симуляторе;

4) ПО в виде офисных пакетов, средств просмотра графических и видеоизображений, архиваторы, эмуляторы командной строки и т. д.

Составные элементы 1–4 образуют ВЛ. После создания файла-образа его можно копировать на другие РС и запускать при помощи средств виртуализации. Подобное распространение файла-образа позволяет выполнять масштабирование ВЛ в рамках научной организации, а также на компьютеры исследователей.

Для систематизации восприятия совокупности элементов 1–4 составлена концептуальная схема структуры ВЛ (рис. 1).

Номер уровня	Наименование уровня	Краткое описание задач, решаемых в рамках уровня
Уровень 7	Теоретический	Теоретические методы, используемые для описания структуры сетей, процессов формирования и обслуживания телекоммуникационного трафика, протоколов, ошибок и т. д.
Уровень 6	Модельный	Имитационные модели, воспроизводящие функционирование исследуемой ТКС, реализованные в виде совокупности теоретических методов.
Уровень 5	Имитационный	Совокупность специализированного ПО, предназначенного для запуска имитационных моделей, формирования и интерпретации результатов эксперимента в виде численных значений и графических закономерностей.
Уровень 4	Гостевой ОС	Операционная система с комплектом ПО общего назначения, на которой производится установка специализированного ПО для моделирования функционирования ТКС
Уровень 3	Виртуальной РС	Программное обеспечение, предназначенное для выделения части аппаратных ресурсов для запуска гостевой ОС с комплектом ПО общего назначения, специализированного ПО для исследования ТКС, а также обеспечения взаимодействия заданной виртуальной РС с другими РС, подключенными к сети научной организации
Уровень 2	Корневой ОС	Операционная система, устанавливаемая на РС для обеспечения ее работоспособности и работоспособности прикладного и системного ПО, необходимого для функционирования ВЛ
Уровень 1	Аппаратной РС	Совокупность технических средств, предназначенных для обеспечения функционирования ВЛ

Рис. 1. Структура виртуальной лаборатории для системного анализа телекоммуникационных сетей

Fig. 1. The structure of a virtual laboratory for the system analysis of telecommunication networks

По аналогии с семиуровневой моделью взаимодействия открытых систем (OSI 7, Open System Interconnection) схема представлена в виде последовательности уровней. Подобное описание позволяет сгруппировать задачи, с которыми сталкивается разработчик или инсталлятор ВЛ при его интеграции в информационную систему научной организации. При необходимости возможна корректировка решений, используемых на заданном уровне при отсутствии необходимости корректи-

ровок решений на других уровнях (при условии сохранения совместимости).

Основная задача «теоретического уровня» – сформировать множество положений, которые описывают состояние системы связи, здесь используются различные формальные методы: например, для описания топологии сети – теория графов, для описания процесса управления заполнением буфера сетевого узла – теория массового обслуживания и т. д.

В рамках модельного уровня решается задача интерпретации задачи из вида, понятного исследователю и описанного на формальном языке теоретических методов, к виду, который сможет интерпретировать среда моделирования. Подобная задача решается при помощи описания задач эксперимента средствами языков программирования (C++, Python, TCL и т. д.) (подобное, например, реализовано в программных пакетах Network Simulator второго или третьего поколений – NS-2 или NS-3 [7–9]) либо при помощи формирования модели средствами среды моделирования в виде определенного файла, как, например, эта задача решается в программах ONEPLAN RPLS [10] или Cisco Packet Tracer [11, 12].

На имитационном уровне решается задача выбора среды моделирования, которая позволит воспроизвести работу необходимых процессов в рамках исследуемой системы. Кроме того, на этом уровне решается задача интерпретации результатов проведенного исследования в виде графических закономерностей и численных значений оцениваемых параметров.

На уровне гостевой ОС реализуется выбор ПО, который позволит запустить среду моделирования независимо от процессов, происходящих на физической РС. Это необходимо для упрощения масштабирования лабораторного комплекса на различные РС. Кроме этого, запуск среды моделирования «внутри» гостевой ОС решает вопросы повышения надежности лабораторной установки в целом, т. к. совершенные ошибки при функционировании среды моделирования в целом не затронут ОС, которая управляет РС, т. к. в результате возникновения ошибок в рамках функционирования среды моделирования потребуется перезапуск (или перенастройка) образа гостевой ОС. Кроме того, в рамках гостевой ОС может устанавливаться дополнительное ПО, которое «поможет» интерпретировать результаты эксперимента.

В рамках уровня виртуальной РС решаются задачи выделения части ресурсов физической РС для функционирования гостевой ОС. Также на этом уровне может решаться задача обеспечения взаимодействия гостевой ОС с различными сетевыми устройствами, с которыми может взаимодействовать физическая РС. Для реализации задач уровня виртуальной РС используется такое ПО, как VMware Workstation, VirtualBox и их аналоги.

Задача уровня корневой ОС – обеспечение работоспособности системы виртуализации и выполнение вспомогательных процессов, связанных с функционированием лабораторного комплекса, а также взаимодействия РС с информационно-коммуникационными ресурсами, которые необходимы для организации и поддержания процесса освоения компетенций в рамках заданной дисциплины.

На уровне аппаратной РС решаются задачи формирования набора комплектующих, которые

обеспечат функционирование лабораторного комплекса с учетом требования по производительности и его стоимости.

Схема взаимодействия ВЛ с пользователем показана на рис. 2.



Рис. 2. Схема взаимодействия учебно-лабораторного комплекса с пользователем

Fig. 2. The scheme of interaction of the educational and laboratory complex with the user

Особенностью схемы является акцентирование внимания на том, что при реализации комплекса, кроме его функциональных возможностей, связанных с использованием средств проведения эксперимента, должно быть уделено внимание накопленной базе знаний (БЗ) по особенностям его использования. Специфика такой БЗ заключается в том, что комплексом предусматривается возможность ее использования не только для научных целей, но и в процессе подготовки специалистов в области эксплуатации и проектирования ТКС. Следовательно, БЗ должна предусматривать возможность наглядной демонстрации особенностей использования комплекса для решения необходимого набора задач. В состав БЗ должны включаться описание методов постановки и проведения экспериментов, демонстрация приемов использования комплекса для решения задач в рамках его функциональных возможностей. С учетом [13, 14] в подобную БЗ целесообразно включать информацию в текстовом формате (электронном или печатном виде) и в качестве видеоматериалов, размещенных в том числе и на веб-платформах.

Практическая реализация виртуальной лаборатории для исследования и анализа телекоммуникационных сетей на основе программного пакета Network Simulator

В рамках проводимых исследований ВЛ реализована на основе программного комплекса Network Simulator (NS-2) с комплектом ПО, в состав которого вошли средство графической визуализации про-

цессов функционирования ТКС Network Animator; средства количественной визуализации результатов эксперимента и средство построения графических закономерностей TraceGraph и X-Graph; средство визуализации работы системы космической связи SaVi. Программное обеспечение установлено на ОС Linux Debian, которая потом была сохранена в виде образа. Для запуска образа используется средство виртуализации ОС VMware Workstation Player.

Целесообразность выбора Network Simulator (NS-2) обоснована следующими факторами:

- условия распространения позволяют использовать его как в рамках образовательного процесса учебного заведения, так и студентами на собственных компьютерах;
- ПО для обработки и демонстрации результатов экспериментов распространяется на основе лицензий, которые допускают бесплатное использование;
- «гостевая» ОС, на которой производится сборка ВЛ, также распространяется на основе подобной лицензии;
- система виртуализации VMware Workstation Player допускает некоммерческое бесплатное использование;

– ОС Windows, которая установлена на РС, является широко распространенной;

– при необходимости средства виртуализации и ОС РС могут быть заменены, что потребует создания нового образа «гостевой» ОС, на практике это не является сложной задачей для специалиста в области информационных технологий, работающего в учебном заведении;

– встроенная в дистрибутив NS-2 БЗ примеров включает в себя различные виды ТКС;

– на момент проведения исследований для Network Simulator (NS-2) представлено достаточное количество материала на русском языке в текстовом [15–20] и видеоформате. Видеокурс «NS2 Tutorial (Network Simulator) Step by Step» подготовлен в рамках проводимых исследований, доступен на платформе YouTube по ссылке: https://www.youtube.com/playlist?list=PL7CmqnO_Qydh254K8hqQrkHv5I9ZgfvAC и при необходимости может быть перенесен на другие платформы.

Внешний вид панели запуска комплекса показан на рис. 3, а, внешний вид «рабочего стола» гостевой ОС приведен на рис. 3, б.

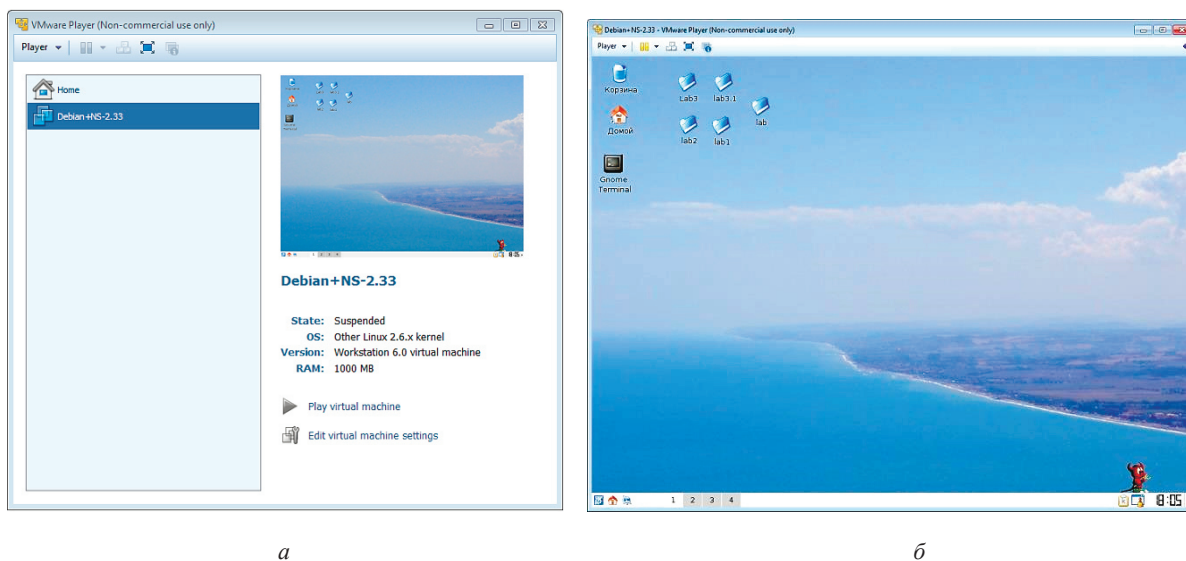


Рис. 3. Внешний вид системы виртуализации (а) и гостевой операционной системы лабораторного комплекса (б)

Fig. 3. The appearance of the virtualization system (a) and the guest operating system of the laboratory complex (b)

Взаимодействие пользователя с ВЛ выполняется преимущественно через интерфейс командной строки. Исследуемая модель представляет собой файл-скрипт, в котором при помощи набора команд описываются модели узлов сети, каналов связи, трафиковых приложений, ошибок, которые могут возникать в процессе работы сети, протоколов

прикладного, транспортного, сетевого и канально-го уровней модели стека протоколов TCP/IP. Внешний вид интерфейса командной строки, папки, где хранится файл-скрипт с описанием моделируемой сети, и фрагмент самого файла-скрипта показаны на рис. 4, а.

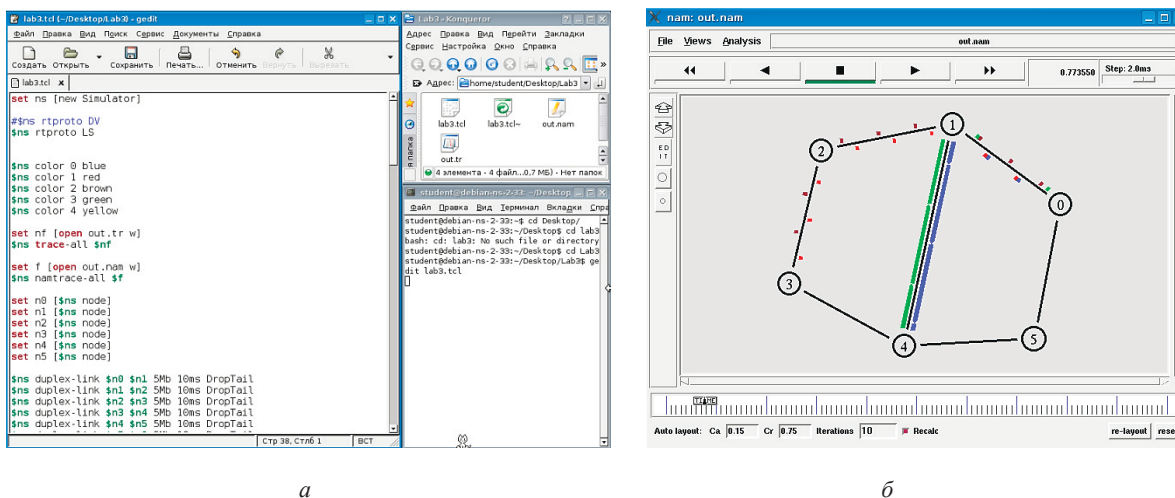


Рис. 4. Внешний вид интерфейса учебно-лабораторного комплекса для взаимодействия с пользователем:
 а – фрагмент файла-скрипта; б – пример визуализации исследуемой сети

Fig. 4. The appearance of the interface of the educational and laboratory complex for user interaction:
 а – a fragment of a script file; б – an example of visualization of the network under study

Файл-скрипт написан на языке TCL (Tool Command Language – командный язык инструментов) и имеет формат <file_name.tcl>. Запуск файла выполняется при помощи команды <nsfile_name.tcl>. В папке, где хранится файл-скрипт после проведения эксперимента, формируются два файла: формата <file_name.nam> и <file_name.tr>. Файл <file_name.nam> используется для визуализации процессов, которые происходят в исследуемой сети. Визуализация выполняется при помощи программы Network Animator,

пример визуализации исследуемой сети показан на рис. 4, б. По результатам визуализации возможно проведение качественной оценки способности объекта анализа передавать заданные объемы трафика. Файл формата <file_name.tr> используется для дальнейшей обработки и получения количественных результатов эксперимента. Внутри файла <file_name.tr> фиксируются события, происходящие в сети. Фрагмент данного файла с расшифровкой событий приведен в табл. 1.

Таблица 1

Table 1

Обозначение полей в файле с количественными результатами эксперимента

Designation of fields in the file with quantitative experimental results

Событие	Время, с	От узла	К узлу	Тип пакета	Размер пакета, байт	Флаги	Идентификатор потока	Адрес источника в формате «№ узла . № порта»	Адрес получателя в формате «№ узла . № порта»	Порядковый номер	Идентификатор пакета
-	0,01033	1	0	rtProtoLS	20	-----	0	1 . 1	0 . 6	-1	4
r	0,440218	2	3	rtProtoLS	100	-----	0	2 . 1	3 . 4	-1	103
+	0,5	0	1	cbr	210	-----	1	0 . 0	3 . 0	0	108
d	0,83375	4	1	cbr	210	-----	3	4 . 1	0 . 3	89	467

В поле «Событие» могут записываться следующие символы: «r» – пакет принят, «+» – пакет

поставлен в очередь, «-» – пакет снят с очереди, «d» – пакет отброшен. В поле «Время» указывается

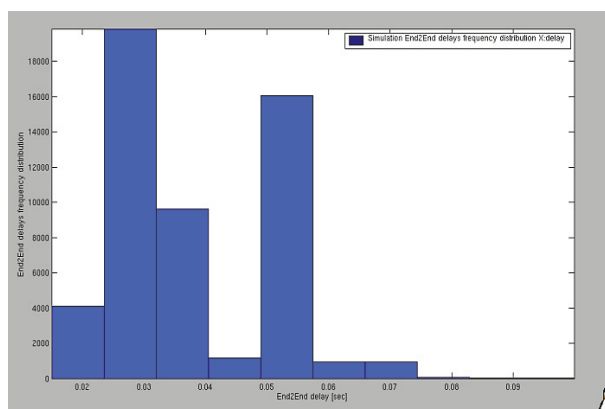
Sorokin A. A., Maliseva N. S., Rozdnyakov F. V., Dzhalmukhambetova E. A., Tsyguta A. N., Logvinov A. S. Formation of a virtual laboratory for the telecommunication networks system analysis

Сорокин А. А., Мальцева Н. С., Поздняков Ф. В., Джамлхамбетова Е. А., Цыгута А. Н., Логинов А. С. Формирование виртуальной лаборатории для системного анализа телекоммуникационных сетей

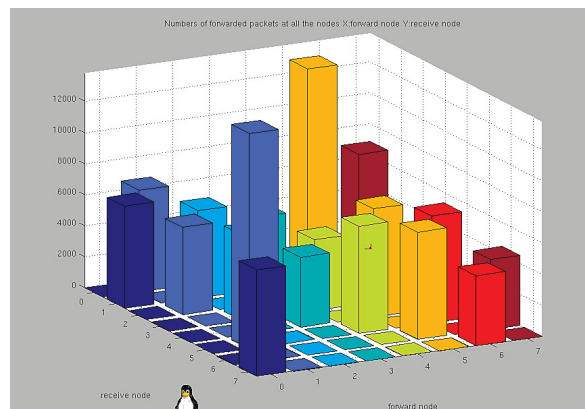
в секундах время наступления зафиксированного события от момента начала эксперимента. В поле «От узла» указывается номер узла, который отправил пакет в канал связи. В поле «К узлу» указывается номер узла, которому пересылается пакет. В поле «Тип пакета» указывается тип приложения (сервиса), которое передается при помощи данного пакета (rtProtoLS означает, что это пакет протокола динамической маршрутизации, cbrg означает, что пакет относится к приложению, которое использует постоянную скорость передачи пакетов трафика). При необходимости во время интерпретации трассировочного файла для улучшения восприятия результатов эксперимента возможно разделение столбца «Тип пакета» на две составляющих – в одной информация о пакетах-приложениях (например, cbrg), в другой – сведения о пакетах служебного (протокольного) трафика (например, прокола динамической маршрутизации, rtProtoLS). Следует отметить, что если в сети не используется протокол динамической маршрутизации, то запускается статическая маршрутизация, в рамках которой определяется кратчайший маршрут между заданной парой узлов. В поле «Размер пакета» указывается размер пакета в байтах. В поле «Флаги» указывается информация о перегрузках. Поле «Идентификатор потока» указывает на номер класса, к которому принадлежит данный поток. В поле «Адрес источника» указываются номер узла и номер порта, с которого отправлялся пакет, в поле «Адрес получателя» – номер узла и номер порта, на который отправлялся пакет. Поле «Порядковый

номер» отображает номер пакета на транспортном уровне, и последнее поле указывает на индивидуальные идентификаторы пакетов. Более подробно с различными вариантами значения полей можно ознакомиться в справочной литературе, например в [21]. В зависимости от типа сети трассировочный файл может содержать дополнительные поля, например в случае моделирования систем космической связи в нем может находиться информация по координатам расположения сетевых узлов.

Для обработки трассировочных файлов используются программы-графопостроители, например TraceGraph или X-Graph. Возможности TraceGraph позволяют обработать файл, в котором записаны все сетевые события применительно к обычной сети. Для обработки информации о состоянии системы космической связи потребуется удаление полей, которые содержат информацию по координатам расположения узлов. В результате обработки трассировочного файла в TraceGraph формируются обобщенные данные по результатам эксперимента, а также графические закономерности в виде двух- и трехмерных графиков и гистограмм. В число обобщенных данных входят такие характеристики, как задержки передачи информационных пакетов, количество сгенерированных, ретранслированных и отброшенных пакетов, время начала и окончания эксперимента и т. д. При помощи модуля построения гистограмм можно построить 8 закономерностей (на рис. 5, а показан пример распределения задержек пакетов в сети).



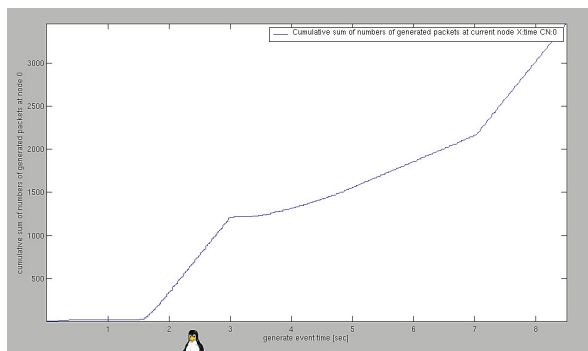
а



б

Рис. 5. Примеры отображаемых закономерностей программой TraceGraph:
а – пример распределения задержек пакетов в сети; б – пример распределения ретранслированных пакетов на различных узлах сети

Fig. 5. Examples of the patterns displayed by the TraceGraph program:
а – an example of the distribution of packet delays in the network; б – an example of the distribution of retransmitted packets at various network nodes



6

Рис. 5 (окончание). Примеры отображаемых закономерностей программой TraceGraph:
в – пример изменения количества ретранслированных пакетов в выбранном узле сети

Fig. 5 (ending). Examples of the patterns displayed by the TraceGraph program:
в – an example of changing the number of retransmitted packets at a selected network node

При помощи модуля построения трехмерных графиков можно построить 12 закономерностей, характеризующих распределение сгенерированных, ретранслированных, принятых и потерянных пакетов и байт на различных узлах сети (на рис. 5, *б* показан пример распределения ретранслированных пакетов на различных узлах сети). При помощи модуля построения двумерных графиков можно построить более 100 закономерностей, характеризующих изменение параметров, касающихся передачи и обработки пакетов различными узлами сети (на рис. 5, *в* показан пример изменения количества ретранслированных пакетов в выбранном узле сети).

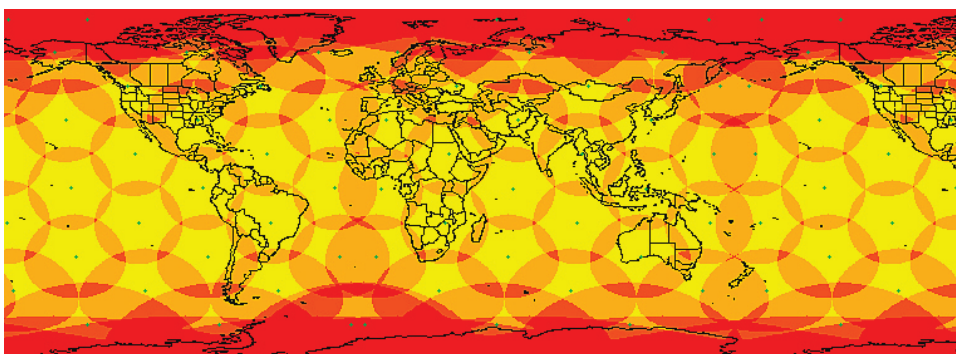
Моделирование систем космической связи в рамках лабораторного комплекса возможно следующим образом: программа Network Simulator (NS-2) включает в себя:

- модели сетевых узлов;

- модели каналов связи;

– дополнительные модели, которые позволяют воспроизводить работу системы космической связи [21].

По результатам моделирования формируется файл трассировки, который можно подвергать дальнейшей обработке для формирования графических закономерностей изменения значений интересующих параметров. Для визуализации работы исследуемой группировки спутников в рамках лабораторного комплекса предусматривается отдельная программа SaVi [22–24], т. к. функционалом программы Network Animator воспроизведение движения группировки спутников не предусматривается. Пример двумерной развертки покрытия системой спутниковой связи Iridium, построенной программой SaVi, показан на рис. 6, *а*, а ее трехмерная модель на рис. 6, *б*.

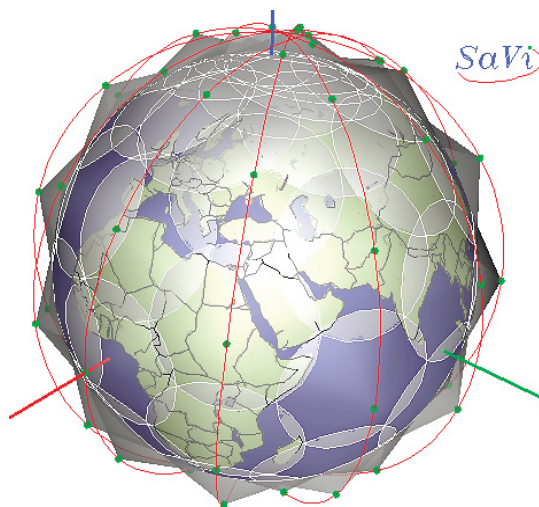


a

Рис. 6. Пример графической модели спутниковой связи Iridium, построенной программой SaVi:
а – пример двумерной развертки покрытия системой спутниковой связи Iridium, построенной программой SaVi

Fig. 6. An example of a graphical model of Iridium satellite communications built by the SaVi program:
a – an example of a two-dimensional scan of coverage by the Iridium satellite communications system built by the SaVi program

Сорокин А. А., Малышева Н. С., Поздняков Ф. В., Джаммухамбетова Е. А., Цыгута А. Н., Логинов А. С. Формирование виртуальной лаборатории для системного анализа телекоммуникационных сетей



б

Рис. 6 (окончание). Пример графической модели спутниковой связи Iridium, построенной программой SaVi:
 б – трехмерная модель системы спутниковой связи Iridium

Fig. 6 (ending). An example of a graphical model of Iridium satellite communications built by the SaVi program:
 б – three-dimensional model of the Iridium satellite communication system

Программа SaVi предусматривает визуализацию 25 встроенных моделей системы спутниковой связи, глобального позиционирования и мониторинга за природными катастрофами. Программой SaVi предусматривается возможность корректи-

ровки параметров моделируемых группировок спутников.

С учетом [21] схемы сетевого узла и канала связи, используемого в NS-2, показаны на рис. 7, а, б соответственно

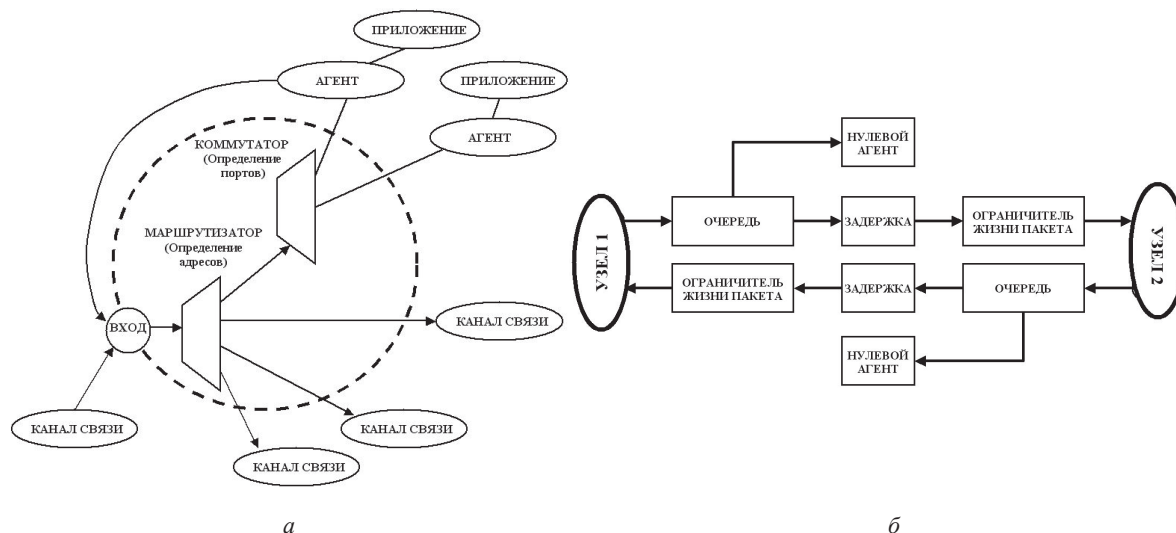


Рис. 7. Структурная схема узла и канала связи в программном пакете NS-2:
 а – схема сетевого узла; б – схема канала связи

Fig. 7. Block diagram of the node and communication channel in the NS-2 software package:
 а – network node diagram; б – communication channel diagram

В общем случае при описании модели узла необходимо задать его название, указать, что он

относится к классу сетевых узлов, определить, что он будет выступать в роли источника или получа-

теля трафика. Один узел может выполнять несколько ролей одновременно, т. е. для одних случаев выступать как источник трафика, а в других как получатель трафика. После этого к узлу осуществляется привязка сетевого агента, который определит, какой протокол транспортного уровня будет использоваться в рамках создаваемого соединения. При моделировании специфичных сетей может потребоваться указание подтипа узла, например, что узел является элементом сети спутниковой связи.

Наиболее часто используются агенты UDP (User Datagram Protocol) на основе протокола

транспортного уровня без предварительной установки соединения, который не гарантирует доставку пакета и TCP (Transmission Control Protocol) – протокол с предварительной установкой соединения, гарантирующий доставку данных. После этого к агенту «привязывается» приложение, например FTP (File Transfer Protocol) протокол передачи файлов или CBR (Constant Bit Rate) – трафик с постоянной скоростью, существуют и другие модели сетевых сервисов.

Фрагмент описания модели узлов источника и получателя трафика приведен в табл. 2.

Таблица 2

Table 2

Фрагмент исходного кода модели для описания сетевых узлов

A fragment of the source code of the model for describing network nodes

Команда на языке TCL	Пояснение команды
set Client1 [\$Sns node]	Задание узла-модели клиента сервиса
set Server1 [\$Sns node]	Задание узла-модели сервера
set udp0 [new Agent/UDP]	Задание модели UDP агента
\$Sns attach-agent \$Server1 \$udp0	Подключение агента udp0 к узлу Server1
set cbr0 [new Application/Traffic/CBR]	Задание модели приложения CBR
\$cbr0 set packetSize_ 512	Задание размера пакетов, байт
\$cbr0 set interval_ 0.001	Задание интервала следования пакетов, с
\$cbr0 attach-agent \$udp0	Объединение приложения с транспортным уровнем
set null0 [new Agent/Null]	Задание модели агента Null0 для приема трафика
\$Sns attach-agent \$Client1 \$null0	Соединение агента Null0 с узлом-клиентом «Client1»
\$Sns connect \$udp0 \$null0	Соединение агента udp0 с агентом null0

Фрагмент, описывающий модели каналов связи между узлами, приведен в табл. 3.

Таблица 3

Table 3

Фрагмент исходного кода для описания каналов связи между узлами

A fragment of the source code for describing communication channels between nodes

Команда на языке TCL	Пояснение команды
\$Sns duplex-link \$Client1 \$Server1 50Mb 50ms DropTail	Создание дуплексного канала связи между узлом Client1 и Server1 пропускной способностью 50 Мбит/с, задержкой 50 мс, правилом обслуживания очереди DropTail
\$Sns duplex-link-op \$Client1 \$Server1 orient right-down	Задание ориентации канала между узлами Client1 и Server1 (канала располагается справа вниз)
\$Sns rtmodel-at 2.0 down \$Client1 \$Server1	Задание времени обрыва канала между узлами Client1 и Server1 (время обрыва – 2-я секунда от начала эксперимента)
\$Sns rtmodel-at 4.0 up \$Client1 \$Server1	Задание времени восстановления канала между узлами Client1 и Server1 (время восстановления – 4-я секунда от начала эксперимента)
\$Sns queue-limit \$Client1 \$Server1 30	Задание размера буфера для создания очереди пакетов в канале между узлами Client1 и Server1 (в рамках примера размер буфера составляет 30 пакетов)
\$Sns duplex-link-op \$Client1 \$Server1 queuePos 0.5	Задание отображения процесса накопления очереди пакета в буфере, где 0.5 – угол наклона в рад. (0.5·π) – 90 град.

Средствами NS-2 возможно реализовать модели ошибок, которые могут возникать в процессе пере-

дачи трафика. Фрагмент исходного кода модели с описанием ошибок приведен в табл. 4.

Таблица 4

Table 4

Фрагмент исходного кода модели, который описывает ошибки при передаче трафика

A fragment of the source code for describing communication channels between nodes

Команда на языке TCL	Пояснение команды
set eR1 [expr rand()/\$d]	Задание значения переменной eR1, которая используется для определения частоты возникновения ошибок, где d – константа, влияющая на величину вероятности
set em3 [new ErrorModel]	Присвоение переменной em3 свойств встроенной модели ошибок ErrorModel, которая имеется в NS-2
\$em3 set rate_ \$eR3	Задание частоты возникновения определенной ошибки
\$ns link-lossmodel \$em3 \$Router2 \$Client1	Указание места возникновения ошибки em3 в канале между парой узлов

Подробнее информация об использовании возможностей ПО, входящего в состав ВЛ, представлена в работах [15–20].

Формирование комплексной модели для исследования телекоммуникационных сетей

Как показал анализ [16–20], при исследовании заданной сети передачи данных необходимо учитывать вероятностную составляющую, которая оказывает влияние на различные элементы и процессы, происходящие в ТКС. В результате влияния вероятностной составляющей параметры исследуемой системы непрерывно изменяются, поэтому при изучении ее характеристик необходимо проводить многократные измерения (или воспроизведения эксперимента) для сбора статистических данных. После этого собранные результаты подвергаются обработке различными методами, в частности для построения прогностических моделей. Таким образом, для получения навыков по обработке статистических данных, характеризующих состояние ТКС, необходимо, чтобы модель предусматривала возможность воспроизведения влияния вероятностных факторов на параметры исследуемой ТКС.

В рамках программного пакета NS-2 подобное предлагается достигать:

- использованием функции «rand()», способной формировать случайное число с плавающей точкой в диапазоне от 0 до 1;
- использованием функции «expr», необходимой для формирования математических выражений;
- построением математических выражений, поз-

воляющих задавать случайные величины в определенном диапазоне.

С использованием описанных функций и выражений в модели задаются следующие характеристики сети:

- частота следования пакетов;
- размер пакетов;
- вероятность возникновения ошибок в канале связи;
- момент времени, когда канал связи теряет работоспособность;
- момент времени, когда канал связи восстанавливает работоспособность;
- пропускная способность канала связи;
- временная задержка пакета в канале связи;
- вероятность возникновения ошибки передачи информационного пакета между заданной парой узлов.

При необходимости можно задать влияние случайной составляющей и на другие параметры сети, которые, согласно принципам построения моделей сетей в NS-2, описываются при помощи постоянных величин.

Для демонстрации работоспособности предложений в части формирования модели, которая будет воспроизводить процесс передачи информационных пакетов по исследуемой сети и способна при повторных запусках формировать разнообразные выходные значения, с учетом особенностей влияния вероятностных составляющих на объект моделирования, составлена модель сети. Структура моделируемой сети показана на рис. 8, а.

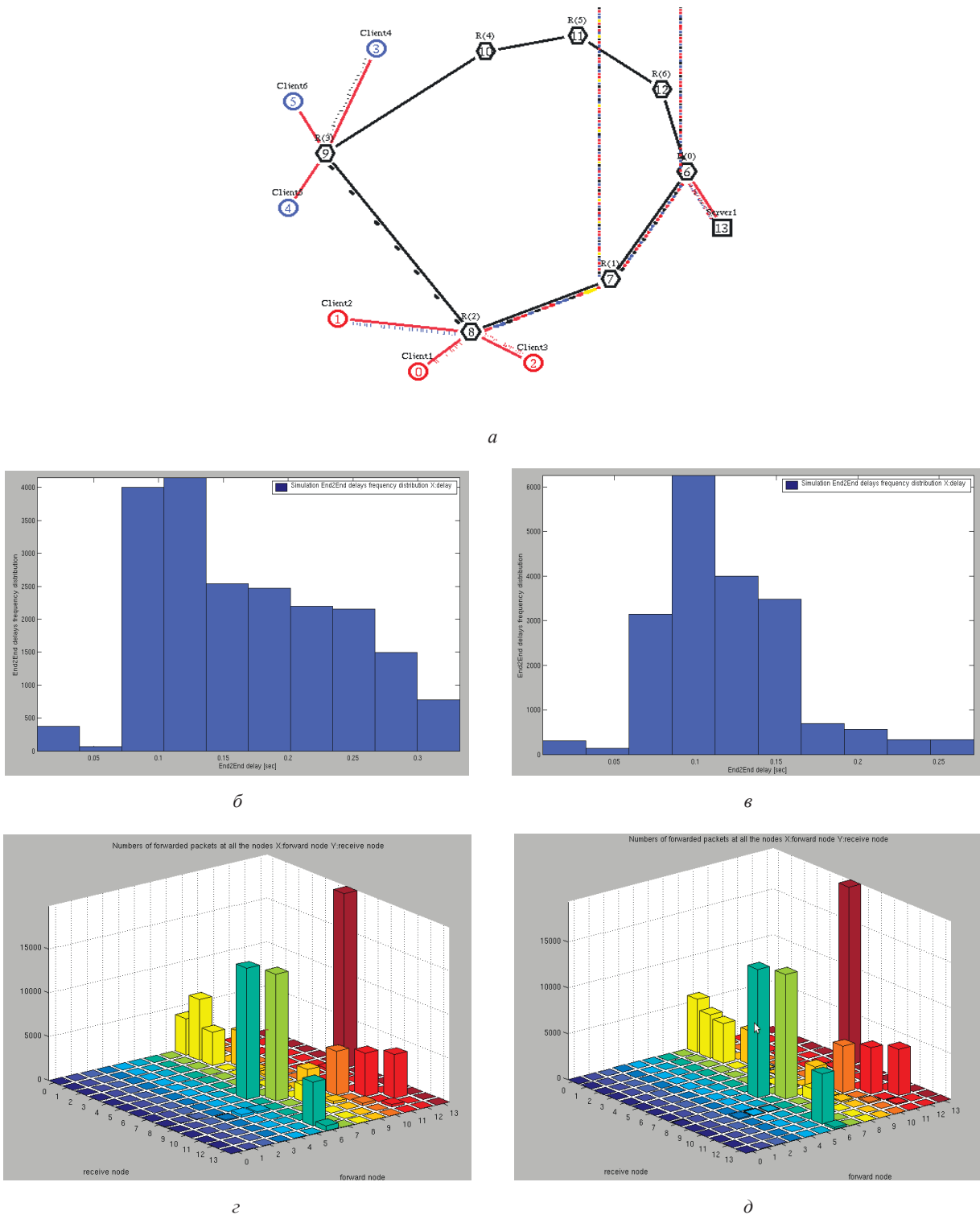


Рис. 8. Исследование обобщенной модели для анализа свойств телекоммуникационных сетей:
 a – модель топологии исследуемой сети; б, в – распределение величины задержек в исследуемой сети;
 г, д – количество пакетов, отбрасываемых узлами в исследуемой сети

Fig. 8. The study of a generalized model for analyzing the properties of telecommunication networks:
 a – topology model of studying network; б, в – the distribution of the magnitude of delays in the network under study;
 г, д – the number of packets dropped by nodes in the network under study

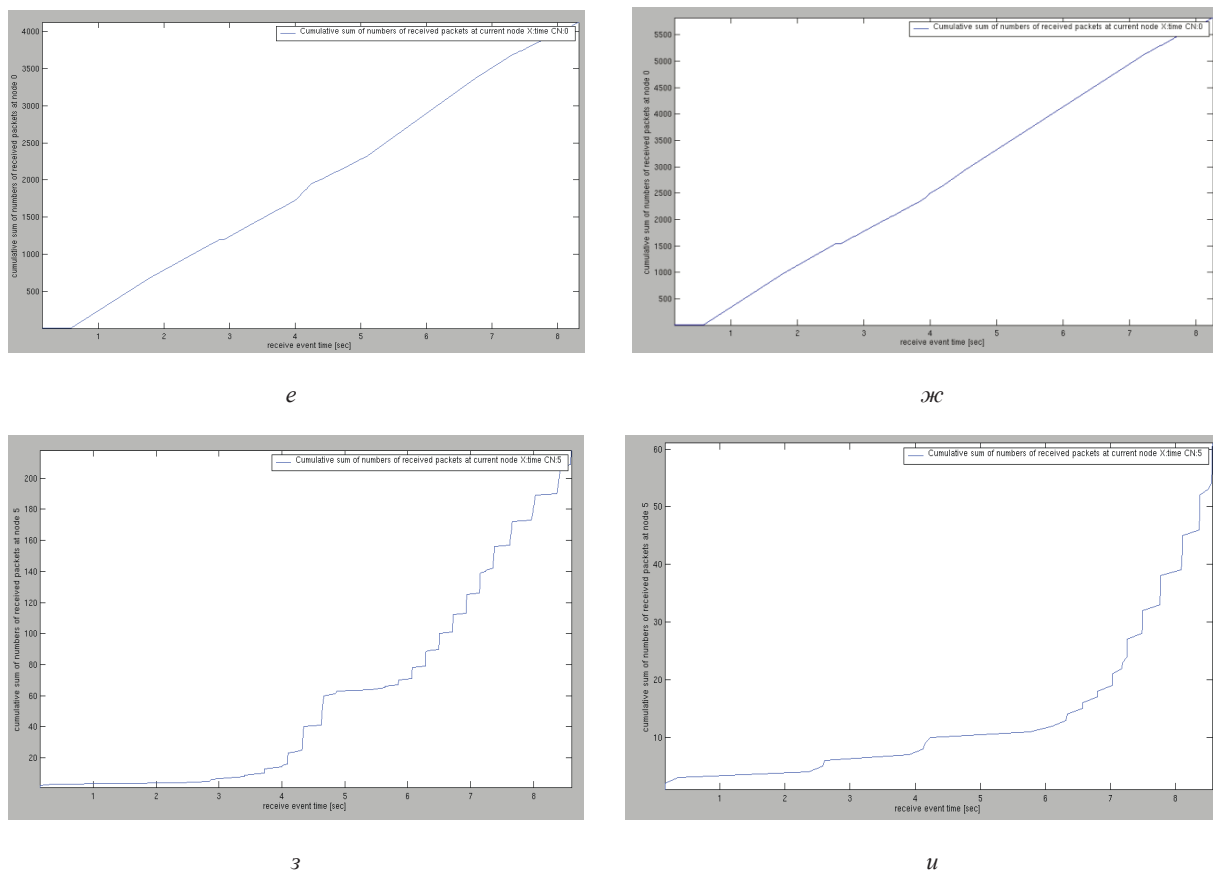


Рис. 8 (окончание). Исследование обобщенной модели для анализа свойств телекоммуникационных сетей:
 $e, ж$ – количество пакетов, принятых узлом номер 0;
 $з, и$ – количество пакетов, принятых узлом номер 5

Fig. 8 (ending). The study of a generalized model for analyzing the properties of telecommunication networks:
 $e, ж$ – the number of packets received by node number 0;
 $з, и$ – the number of packets received by node number 5

Модель состоит:

- из двух групп узлов-клиентов: группа 1 – узлы под номерами 0–2, группа 2 – узлы под номерами 3–5;
- группы узлов-маршрутизаторов, объединенных в двунаправленное кольцо (узлы под номерами 6–12);
- узла-сервера (узел номер 13).

Между узлами из группы 1, а также узлом 4 и сервером осуществляется передача трафика с постоянной скоростью с использованием протокола UDP на транспортном уровне, параллельно между узлами из группы 2 и сервером осуществляется обмен файлами с использованием протокола TCP на транспортном уровне. Каналы связи между маршрутизаторами могут выходить из строя, в результате протоколу маршрутизации необходимо перестраивать направление передачи пакетов в сети с учетом

наличия работоспособных каналов. В маршрутизаторах в случайные моменты времени могут происходить ошибки, приводящие к отбрасыванию некоторых транслируемых пакетов. В маршрутизаторах созданы буферы для накопления пакетов и предотвращения их потерь в моменты времени, когда канал связи не обладает необходимой пропускной способностью. В случае переполнения буфера пакеты начинают отбрасываться. Для повышения наглядности на узлах 6 и 7 размер буферов увеличен до 1 000 пакетов. Вероятностная составляющая в рамках сети оказывает влияние на все характеристики модели, перечисленные выше. Демонстрация возможности формирования разнообразных значений, с учетом особенностей вероятностных характеристик параметров сети, в рамках двух запусков созданной модели показана на рис. 8, б–и и в табл. 5.

Таблица 5

Table 5

Результаты повторных запусков исследуемой модели телекоммуникационной сети

The results of repeated launches of the studied model of the telecommunication network

Параметр	Эксперимент 1	Эксперимент 2
Количество сгенерированных пакетов, шт.	20 941	20 069
Количество отброшенных пакетов, шт.	399	469
Минимальная задержка пакета из конца в конец, мс	≈ 0,0062	≈ 0,006
Максимальная задержка пакета из конца в конец, мс	≈ 0,332	≈ 0,271
Средняя задержка пакета из конца в конец, мс	≈ 0,167	≈ 0,117

В табл. 5 представлены результаты двух экспериментов (количество сгенерированных пакетов, количество отброшенных пакетов, величина задержек пакетов из конца в конец). При необходимости могут быть получены и другие характеристики исследуемой сети. Анализ результатов эксперимента, показанных на рис. 8 и в табл. 5, подтверждает:

- предложенная модель является работоспособной;
- в процессе функционирования модели воспроизводилась работа протоколов транспортного и сетевого уровня, функционирование приложений, управления накоплением пакетов в очередях на выходе узлов сети;
- воспроизведены отказы и восстановление каналов связи;
- воспроизведены ошибки, которые приводят к отбрасыванию пакетов на узлах сети в процессе передачи информационного трафика.

При необходимости возможна корректировка модели в части изменения количества узлов и каналов связи, выбора вида топологии, трафиковых приложений, а также количества параметров, на значение которых влияет вероятностная составляющая.

Заключение

В ходе выполнения исследований предложены принципы формирования виртуальной лаборатории для системного анализа телекоммуникационных сетей. Виртуальная лаборатория основана на применении ПО, предназначенного для моделирования различных телекоммуникационных сетей; средств визуализации и интерпретации результатов моделирования в виде графических закономерностей; операционной системы, предназначенной для обеспечения функционирования сетевого эмулятора и средств визуализации результатов; системы виртуализации, для обеспечения возможности запуска комплекса на компьютерах, работающих под управлением различных операционных систем; дополнительного ПО, позволяющего обрабатывать, интерпретировать и визуализировать результаты проведенных экспериментов. Особенностью

ПО является возможность его свободного или бесплатного использования.

В качестве системы моделирования телекоммуникационных сетей предлагается использовать программный пакет Network Simulator, для визуализации процесса функционирования систем связи – программу Network Animator, дополнительно для визуализации работы систем космической связи – программный пакет SaVi. Обработку результатов в общем случае предлагается реализовать при помощи программного пакета TraceGraph, в случае необходимости возможно использование программы X-Graph для построения специфических закономерностей. Данное ПО собрано в виде комплекса на основе ОС семейства GNU/Linux Debian. Для запуска комплекса на рабочих станциях, функционирующих на основе операционной системы Microsoft Windows, предусматривается средство виртуализации в виде VMware Workstation Player. В рамках выполняемых исследований выделены последовательности типовых команд для создания моделей сетевых узлов, трафиковых приложений, каналов связи, возникновения аварийных ситуаций на линиях связи и ошибок при передаче трафика, приводящих к потерям информационных пакетов. Предложена последовательность команд, позволяющих смоделировать воздействие случайных факторов на исследуемую систему связи.

Обобщение полученных результатов исследований проведено при помощи реализации комплексной модели телекоммуникационной сети. Моделью предусматривается генерация кольцевой топологии телекоммуникационной сети; агрегирование с этой топологией других сетевых элементов; воспроизведение работы сетевых приложений, предусматривающих передачу трафика с постоянной скоростью, а также передачу данных, требующих гарантированной доставки; моделирование ситуаций, нарушающих работоспособность сети; в процессе функционирования модели предусматривается учет вероятностных факторов, воздействующих на параметры моделируемой сети передачи данных, а также мониторинг состояния буфера

ров сетевых узлов. В результате оценки предложенной модели показана ее работоспособность в части воспроизведения работы сети в условиях возникновения отказов и влияния других вероятностных факторов на параметры моделируемых элементов и процессов. Проведена демонстрация графической интерпретации результатов проведенных экспериментов в виде двух- и трехмерных

закономерностей, а также гистограммы. Комплексные показатели, характеризующие состояние исследуемой сети, представлены в виде обобщающей таблицы.

Таким образом, результаты проведенных исследований открывают возможности дальнейшего развития программных комплексов для системного анализа телекоммуникационных сетей.

Список источников

1. Севрюкова Е. А., Волкова Е. А., Дорошенко В. А., Солодков А. В. Разработка макета распределенной сенсорной системы экологического мониторинга // Изв. высш. учеб. заведений России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24. № 3. С. 98–108.
2. Дорогов А. Ю., Яшин А. И. Программный комплекс моделирования пакетных радиосетей КВ-диапазона // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2020. Т. 12. № 6. С. 26–37.
3. OPNET projects. URL: <https://opnetprojects.com/> (дата обращения: 25.08.2024).
4. Nzobokela K., Tembo S., Habeenzu B. Enhancing Network Performance and Quality of Service (QoS) in a Wired Local Area Network (LAN) // International Journal of Networks and Communications. 2024. V. 13 (1). DOI: 10.5923/j.ijnc.20241301.01.
5. Ali A. H., Noman H. M., Abdulrazzaq A. A. Analysis & Estimation of QoS Parameters on LAN Fundamental technologies based on OPNET // International Journal of Computer Trends and Technology (IJCTT). 2017. V. 48 (2). P. 54–60.
6. What is open source software? URL: <https://www.ibm.com/topics/open-source> (дата обращения: 11.08.2024).
7. The Network Simulator - ns-2. URL: <https://www.isi.edu/websites/nsnam/ns/> (дата обращения: 17.08.2024).
8. Open source network simulator // NS-2 Project. URL: <https://www.ns2project.com/open-source-network-simulator/> (дата обращения: 12.08.2024).
9. Network Simulator NS 3. URL: <https://www.nsnam.org/> (дата обращения: 14.08.2024).
10. Онеплан RPLS // Инфотел. Интеллект. Опыт. Результат. URL: <https://www.rpls.ru/oneplan-rpls/> (дата обращения: 15.08.2024).
11. Никишин К. И. Исследование передачи трафика в программно-конфигурируемой сети с использованием Cisco Packet Tracer // Вестн. Воронеж. гос. техн. ун-та. 2022. Т. 18. № 5. С. 85–90.
12. Самохвалов А. В., Соловьев Д. С., Соловьева И. А., Скворцов А. А. Обеспечение избыточности для повышения надежности функционирования корпоративной компьютерной сети передачи информации // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2022. № 4 (60). С. 68–76.
13. Мусханова И. В., Бетильмерзаева М. М. Особенности применения видеоматериалов в обучении: анализ практик педагогической деятельности лауреатов и победителей конкурсов педагогического мастерства // Перспективы науки и образования. 2022. № 3 (57). С. 603–619.
14. Панфилов С. А., Некрасова Н. Р. Применение мультимедийных технологий в учебном процессе высшей школы // Интеграция образования. 2014. Т. 18. № 1 (74). С. 95–101.
15. Бочкарева В. В. Моделирование телекоммуникационных сетей. Сетевой симулятор NS2: практикум. М.: МИПЭА – Российский технологический университет, 2021. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). URL: <https://reader.lanbook.com/book/176500#65> (дата обращения: 16.08.2024).
16. Живодерников А. Ю., Яговитов Д. С., Трофимов А. Ю., Ашлапов М. В. Оценка показателей качества обслуживания мультисервисной сети связи на основе имитационного моделирования // Изв. Тульс. гос. ун-та. Технические науки. 2021. № 5. С. 235–240.
17. Кокорева Е. В., Моренкова О. И., Белезкова А. С. Моделирование сети LTE/SAE в симуляторе NS2 // Перспективы развития информационных технологий. 2014. № 21. С. 59–67.
18. Поздняк И. С., Киреева Н. В. Исследование вероятностно временных характеристик трафика с помощью моделирования в NS2 // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2013. Т. 7. № 8. С. 85–87.
19. Кулябов Д. С., Геворкян М. Н., Мачука О. Х. Р., Диаррассуба К., Дали Д. Т. Г. Численное и имитационное моделирование дисциплин обслуживания очередей типа RED на маршрутизаторе // Вестн. Рос. ун-та дружбы народов. Сер.: Математика, информатика, физика. 2016. № 1. С. 19–31.
20. Велиева Т. Р. Параметрическое исследование системы с модулем активного управления трафиком // Вестн. Рос. ун-та дружбы народов. Сер.: Математика, информатика, физика. 2018. Т. 26. № 3. С. 272–284.
21. Fall K., Varadhan K. The ns Manual (formerly ns Notes and Documentation). URL: https://www.isi.edu/websites/nsnam/ns/doc/ns_doc.pdf (дата обращения: 10.08.2024).
22. SaVi – satellite constellation visualization. URL: <https://savi.sourceforge.io/> (дата обращения: 28.08.2024).
23. Wood L. SaVi: satellite constellation visualization // First Annual CCSR Research Symposium (CRS 2011), 2011. URL: https://www.researchgate.net/publication/233859848_SaVi_satellite_constellation_visualization (дата обращения: 26.08.2024).
24. Tang Z., Zhao J., Guo T., Li H., Wang Q., Chen H., Zhao B. Mini-Savi: Realistic Satellite Network Simulation Platform Based on Open-Source Tools // 2023 Fourth International Conference on Frontiers of Computers and Communication Engineering (FCCE), Xiamen, China, 2023. P. 27–30. URL: https://www.researchgate.net/publication/373789005_Mini-Savi_Realistic_Satellite_Network_Simulation_Platform_Based_on_Open-Source_Tools (дата обращения: 26.08.2024).

References

1. Sevriukova E. A., Volkova E. A., Doroshenko V. A., Solodkov A. V. Razrabotka maketa raspredelennoi sensornoi sistemy ekologicheskogo monitoringa [Development of a layout for a distributed sensor environmental monitoring system]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii Rossii. Radioelektronika*, 2021, vol. 24, no. 3, pp. 98-108.
2. Dorogov A. Iu., Iashin A. I. Programmnyi kompleks modelirovaniia paketnykh radiosetei KV-diapazona [Software package for modeling KV-band packet radio networks]. *Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniakh Zemli*, 2020, vol. 12, no. 6, pp. 26-37.
3. *OPNET projects*. Available at: <https://opnetprojects.com/> (accessed: 25.08.2024).
4. Nzobokela K., Tembo S., Habeezu B. Enhancing Network Performance and Quality of Service (QoS) in a Wired Local Area Network (LAN). *International Journal of Networks and Communications*, 2024, vol. 13 (1). DOI: 10.5923/j.ijn.20241301.01.
5. Ali A. H., Noman H. M., Abdulrazzaq A. A. Analysis & Estimation of QoS Parameters on LAN Fundamental technologies based on OPNET. *International Journal of Computer Trends and Technology (IJCTT)*, 2017, vol. 48 (2), pp. 54-60.
6. *What is open source software?* Available at: <https://www.ibm.com/topics/open-source> (accessed: 11.08.2024).
7. *The Network Simulator - ns-2*. Available at: <https://www.isi.edu/websites/nsnam/ns/> (accessed: 17.08.2024).
8. *Open source network simulator. NS-2 Project*. Available at: <https://www.ns2project.com/open-source-network-simulator/> (accessed: 12.08.2024).
9. *Network Simulator NS 3*. Available at: <https://www.nsnam.org/> (accessed: 14.08.2024).
10. Oneplan RPLS [Oneplan RPLS]. *Infotel. Intellect. Opyt. Rezul'tat*. Available at: <https://www.rpls.ru/oneplan-rpls/> (accessed: 15.08.2024).
11. Nikishin K. I. Issledovanie peredachi trafika v programmo-konfiguriruemoi seti s ispol'zovaniem Cisco Packet Tracer [Investigation of traffic transmission in a software-configured network using Cisco Packet Tracer]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2022, vol. 18, no. 5, pp. 85-90.
12. Samokhvalov A. V., Solov'ev D. S., Solov'eva I. A., Skvortsov A. A. Obespechenie izbytochnosti dlia povysheniia nadezhnosti funktsionirovaniia korporativnoi komp'iuternoi seti peredachi informatsii [Providing redundancy to improve the reliability of the corporate computer network for information transmission]. *Prikladnyi zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii*, 2022, no. 4 (60), pp. 68-76.
13. Muskhanova I. V., Betil'merzaeva M. M. Osobennosti primeneniia videomaterialov v obuchenii: analiz praktik pedagogicheskoi deiatel'nosti laureatov i pobeditelei konkursov pedagogicheskogo masterstva [Features of the use of video materials in teaching: analysis of the practice of pedagogical activity of laureates and winners of pedagogical skill contests]. *Perspektivy nauki i obrazovaniia*, 2022, no. 3 (57), pp. 603-619.
14. Panfilov S. A., Nekrasova N. R. Primenenie multimediiinykh tekhnologii v uchebnom protsesse vysshei shkoly [The use of multimedia technologies in the educational process of higher education]. *Integratsiia obrazovaniia*, 2014, vol. 18, no. 1 (74), pp. 95-101.
15. Bochkareva V. V. *Modelirovanie telekommunikatsionnykh setei. Setevoi simulator NS2 Praktikum* [Modeling of telecommunication networks. NS2 Network Simulator: Workshop]. Moscow, MIREA – Rossiiskii tekhnologicheskii universitet, 2021. 1 elektron. opt. disk (CD-ROM). Available at: <https://reader.lanbook.com/book/176500#65> (accessed: 16.08.2024).
16. Zhivodernikov A. Iu., Iagovitov D. S., Trofimov A. Iu., Ashlapov M. V. Otsenka pokazatelei kachestva obsluzhivaniia mult'iservisnoi seti svyazi na osnove imitatsionnogo modelirovaniia [Assessment of service quality indicators of a multiservice communication network based on simulation modeling]. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2021, no. 5, pp. 235-240.
17. Kokoreva E. V., Morenkova O. I., Belezekova A. S. Modelirovanie seti LTE/SAE v simuliatore NS2 [LTE/SAE network simulation in NS2 Simulator]. *Perspektivy razvitiia informatsionnykh tekhnologii*, 2014, no. 21, pp. 59-67.
18. Pozdniak I. S., Kireeva N. V. Issledovanie veroiatnostno vremennykh kharakteristik trafika s pomoshch'iu modelirovaniia v NS2 [Investigation of probabilistic and temporal characteristics of traffic using modeling in NS2]. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport*, 2013, vol. 7, no. 8, pp. 85-87.
19. Kuliabov D. S., Gevorkian M. N., Machuka O. Kh. R., Diarrassuba K., Dali D. T. G. Chislennoe i imitatsionnoe modelirovanie distsiplin obsluzhivaniia ocheredei tipa RED na marshrutizatore [Numerical and simulation modeling of RED queue maintenance disciplines on a router]. *Vestnik Rossiiskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Matematika, informatika, fizika*, 2016, no. 1, pp. 19-31.
20. Velieva T. R. Parametricheskoe issledovanie sistemy s modulem aktivnogo upravleniia trafikom [Parametric study of a system with an active traffic management module]. *Vestnik Rossiiskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Matematika, informatika, fizika*, 2018, vol. 26, no. 3, pp. 272-284.
21. Fall K., Varadhan K. *The ns Manual (formerly ns Notes and Documentation)*. Available at: https://www.isi.edu/websites/nsnam/ns/doc/ns_doc.pdf (accessed: 10.08.2024).
22. *SaVi – satellite constellation visualization*. Available at: <https://savi.sourceforge.io/> (accessed: 28.09.2024).
23. Wood L. *SaVi: satellite constellation visualization*. First Annual CCSR Research Symposium (CRS 2011), 2011. Available at: https://www.researchgate.net/publication/233859848_SaVi_satellite_constellation_visualization (accessed: 26.08.2024).
24. Tang Z., Zhao J., Guo T., Li H., Wang Q., Chen H., Zhao B. Mini-Savi: Realistic Satellite Network Simulation Platform Based on Open-Source Tools. *2023 Fourth International Conference on Frontiers of Computers and Communication Engineering (FCCE), Xiamen, China, 2023*. Pp. 27-30. Available at: https://www.researchgate.net/publication/373789005_Mini-Savi_Realistic_Satellite_Network_Simulation_Platform_Based_on_Open-Source_Tools (accessed: 26.08.2024).

Статья поступила в редакцию 05.09.2024; одобрена после рецензирования 18.10.2024; принята к публикации 25.10.2024
The article was submitted 05.09.2024; approved after reviewing 18.10.2024; accepted for publication 25.10.2024

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Александрович Сорокин – кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры связи; Астраханский государственный технический университет; доцент кафедры математических и естественнонаучных дисциплин; Каспийский институт морского и речного транспорта имени генерал-адмирала Ф. М. Апраксина – филиал ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта»; alsorokin.astu@mail.ru

Наталья Сергеевна Мальцева – кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры связи; Астраханский государственный технический университет; maltsevans@mail.ru

Федор Валерьевич Поздняков – заместитель начальника отдела информационных технологий и связи; Филиал АО «Газпром газораспределение» в Астраханской области; fedor.astrakhan@yandex.ru

Елена Азатуллаевна Джалмухамбетова – кандидат физико-математических наук; доцент кафедры математических и естественнонаучных дисциплин; Каспийский институт морского и речного транспорта имени генерал-адмирала Ф. М. Апраксина – филиал ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта»; elena_jalm@mail.ru

Анна Николаевна Цыгута – старший преподаватель кафедры математических и естественнонаучных дисциплин; Каспийский институт морского и речного транспорта имени генерал-адмирала Ф. М. Апраксина – филиал ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта»; аспирант кафедры охраны окружающей среды и производственной безопасности; Волжский государственный университет водного транспорта; anna.tsyguta@mail.ru

Алексей Сергеевич Логинов – студент кафедры связи; Астраханский государственный технический университет; aleksej.loginov.03@bk.ru

Aleksandr A. Sorokin – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Telecommunications; Astrakhan State Technical University; Assistant Professor of the Department of Mathematical and Natural Science Disciplines; Caspian Institute of Sea and River Transport named after Admiral F. M. Apraksin, branch of the Volga State University of Water Transport; alsorokin.astu@mail.ru

Natalia S. Maltseva – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Telecommunications; Astrakhan State Technical University; maltsevans@mail.ru

Fedor V. Pozdnyakov – Deputy Head of the Department of Information Technology and Communications; Gazprom Gazoraspredelenie JSC, branch in Astrakhan region; fedor.astrakhan@yandex.ru

Elena A. Dzhalmuxhambetova – Candidate of Physico-Mathematical Sciences; Assistant Professor of the Department of Mathematical and Natural Sciences; Caspian Institute of Sea and River Transport named after General Adm. F. M. Apraksin Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Volga State University of Water Transport; elena_jalm@mail.ru

Anna N. Tsyguta – Senior Lecturer of the Department of Mathematical and Natural Sciences; Caspian Institute of Sea and River Transport named after General Adm. F. M. Apraksin Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Volga State University of Water Transport; Postgraduate Student of the Department of Environmental Protection and Industrial Safety; Volga State Academy of Water Transport; anna.tsyguta@mail.ru

Alexei S. Loginov – Student of the Department of Telecommunications; Astrakhan State Technical University; aleksej.loginov.03@bk.ru

