

УДК: 519.876.5; 654.024

DOI: 10.53816/23061456_2022_5–6_26

**ОБОСНОВАНИЕ АДЕКВАТНОСТИ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ФРАГМЕНТА
ПРОГРАММНО-КОНФИГУРИРУЕМОЙ ИНФОКОММУНИКАЦИОННОЙ
СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

**ADEQUACY SUBSTANTIATION OF THE SIMULATION MODEL
OF A SOFTWARE-DEFINED DATA TRANSMISSION NETWORK FRAGMENT
FOR MILITARY PURPOSES**

Д.С. Яговитов

D.S. Yagovitov

ВАС им. С.М. Буденного

Статья посвящена обоснованию адекватности применения предлагаемой имитационной модели фрагмента программно-конфигурируемой инфокоммуникационной сети передачи данных военного назначения (ПКИКС ПД ВН) посредством проведения экспериментов над её составной моделью — моделью программно-конфигурируемого коммутатора — и последующим сравнением характера экспериментальной зависимости её наблюдаемых параметров от контролируемых, и в явном виде сформулированной теоретически этой же зависимости, а также определения логической непротиворечивости полученных результатов.

В роли среды имитационного моделирования использовался симулятор дискретных событий OMNeT++, последующая численная обработка результатов экспериментов над моделью и сравнение с известной теоретической зависимостью осуществлялось с использованием высокоуровневого языка программирования Python, функционирующего в клиент-серверной интерактивной среде разработки Jupyter Notebook.

Ключевые слова: аналитическое моделирование, имитационное моделирование, программно-конфигурируемая сеть, программно-конфигурируемая инфокоммуникационная сеть передачи данных военного назначения, симулятор дискретных событий OMNeT++, Jupyter Notebook.

The article is devoted to application adequacy substantiation of the proposed simulation model of a fragment of a data transmission software-defined infocommunication network for military-purpose (DT SDIN MP) by conducting experiments on its composite model — a model of a software-defined switch — and the comparison of the nature of the experimental dependence its observed parameters from the controlled and the same dependence, explicitly formulated theoretically, as well as the definition of the logical consistency of the results obtained.

The discrete event simulator OMNeT++ was used as a simulation environment, the subsequent numerical processing of the results of experiments on the model and comparison with the known theoretical dependence was carried out using the high-level Python programming language operating in the Jupyter Notebook client-server interactive development environment.

Keywords: analytical modeling, simulation modeling, software-defined network, software-defined infocommunication network for military purposes, discrete event simulator OMNeT++, Jupyter Notebook.

Наблюдаемое в последние десятилетия прогрессирующее усложнение компонентной базы электронно-вычислительных машин (ЭВМ) и, как следствие этого, увеличение вычислительных мощностей создают исследователям-инженерам дополнительные стимулы для реализации в интересах антитеррористической безопасности страны и поддержания обороны государства различных рода и свойств моделей исследуемых ими объектов. Так, под «моделированием» можно определить замещение одного объекта (прототипа) другим (моделью прототипа) с целью получения информации о важнейших свойствах объекта-оригинала (прототипа) с помощью объекта-модели [1, 12]. При этом, если представлять исследуемый объект в виде макрообъекта, реализующего некоторую совокупность своих гиперпараметров в n -мерном пространстве, в процессе моделирования стремятся к достаточно точному обобщению моделью только исследуемой стороны функционирования объекта (т.е. одной из плоскостей макрообъекта), избегая тем самым абсолютного — в данном контексте «излишнего» — подобия между объектами оригинала и модели.

По причине того, что зачастую воссоздать реальную копию объекта-оригинала по технико-экономическим, материально-физическим или другим рационально обоснованным принципам не предоставляется возможным, исследователи различных областей науки прибегают к мысленному моделированию, в случае же точных наук к его составляющей — математическому.

Под математическим моделированием понимают процесс установления соответствия данному реальному объекту некоторой конструкции (математического объекта), называемой математической моделью, и ее исследование, позволяющее получать характеристики реального объекта и информацию о нем [1]. Математическое же моделирование для исследования процессов функционирования реальных систем можно разделить на аналитическое и имитационное.

При аналитическом моделировании процессы функционирования исследуемой системы в частности или всей системы в целом описываются в виде функциональных соотношений (функций) или логических условий (предикатов при аналитическом моделировании программными средствами ЭВМ). При этом аналитическая модель может быть исследована:

– аналитическими методами, когда для исследуемых характеристик стремятся получить явные зависимости в общем виде (формулы, законы);

– численными методами, когда в процессе моделирования получают искомые числовые результаты при конкретных исходных данных и заданной точности, не решая уравнений в общем виде;

– качественно, когда, не имея решения в явном виде, находят некоторые его свойства [1].

При имитационном же моделировании процессы функционирования системы описывают в виде алгоритмов, воспроизводящих во времени элементарные явления, составляющие процесс, с сохранением их логической структуры и последовательности протекания [1]. Указанный способ позволяет на основе исходных данных получить сведения о состоянии процессов, протекающих в исследуемой системе, в определенные моменты времени с целью оценки её характеристик. Примечательным является то, что в ходе имитационного исследования системы на её вход(-ы) подаются реальные входные воздействия или их модели, а реакции на её выходе(-ах) могут программно или математически обрабатываться.

Говоря о программно-конфигурируемых сетях передачи данных военного назначения как о подсистеме системы связи, специалисты в области прикладных исследований компьютерных сетей связи общего и специального назначения отмечают обоснованную пользу от внедрения подхода централизованного управления телекоммуникационной инфраструктурой сети с параллельной виртуализацией сетевых функций (Network Function Virtualization, NFV) [2–4]. Обобщенно, ПККИКС ПД ВН — это составная часть сети связи специального назначения (СС СН), построенная с применением принципа программного конфигурирования и предназначенная для передачи по линиям связи данных, потребителями которых являются средства вычислительной техники. Целью же функционирования ПККИКС ПД ВН является предоставление потребителям — должностным лицам узлов связи пунктов управления (ДЛ УС ПУ) — услуг по передаче от одного потребителя другому служебной информации с требуемым, зачастую повышенным относительно сетей связи общего пользования, качеством. Ввиду того, что в настоящее время ПККИКС ПД ВН как объект системы связи развернута только в опытно-экспериментальных

районах, уполномоченных на проведение специальных исследований в области связи государственных научно-исследовательских организаций и предприятий военно-промышленного комплекса, занимающихся разработкой программно-конфигурируемых узлов коммутации (коммутаторов ПКИКС ПД ВН) и серверов их управления (контроллеров ПКИКС ПД ВН [5]), с целью экспериментально-прикладных исследований процессов, возникающих во время функционирования таких сетей, предлагается применять систему математического моделирования исследуемого объекта ПКИКС ПД ВН. Кроме того, на основе сравнения результатов аналитических рассуждений и итерационных запусков имитационной модели предоставляется возможным сделать выводы об адекватности последней.

Разработанная на предыдущих этапах исследований аналитическая модель ПКИКС ПД ВН с управляемым распределением трафика (потоков данных в сети по маршрутам) и её пропускной способности (канального ресурса для образования путей переноса потоков данных) в виде динамически программно управляемой системы с многоуровневой сетевой архитектурой представлена в [6]. Полученные ранее результаты научных исследований в области моделирования процессов функционирования инфокоммуникационных, а равно и мультисервисных сетей связи ведомственного назначения [7, 8], подтвердили обоснованность теоремы Джексона о представлении пакетной сети передачи данных в качестве совокупности систем массового обслуживания: «пакетная сеть — это есть совокупность независимых систем массового обслуживания (СМО) с экспоненциальным распределением интервалов времени между очередными пакетами на входе и экспоненциальным распределением времени их обслуживания» (СМО типа $M/M/1/\infty$ по классификации Кендалла-Башарина). Поэтому рационально сделать вывод о том, что функционирование ПКИКС ПД ВН, являющейся по характеру распространяемых в ней данных пакетной сетью, подчиняется законам и, как следствие, формулам теории СМО. Соответственно, очевидно ожидать схожий характер исследуемых зависимостей, полученных в результате экспериментов на имитационной модели ПКИКС ПД ВН, с устоявшимися в научном сообществе теоретическими положениями вышеупомянутой математической теории.

В роли среды имитационного моделирования использован свободно распространяемый для некоммерческого использования программный продукт OMNeT++ (Objective Modular Network Testbed in C++) — расширяемая, модульная, компонентно-ориентированная C++ библиотека симуляций и фреймворк для дискретно-событийного моделирования, предназначенные преимущественно для построения симуляторов сетей [9]. Из определения следует, что OMNeT++ реализует программную библиотеку и фреймворк, написанные на кроссплатформенном языке C++, причем указанная реализация обладает возможностью к расширению с помощью модулей-фреймворков, как показано на рис. 1. Под дискретно-событийным моделированием же понимается процесс функционирования модели, при котором каждый момент времени её жизненного цикла — времени моделирования — описывается созданием/передачей/терминацией того или иного сообщения, пакета или сигнала, т.е. моделируемого события.

Каждый отдельно взятый фреймворк или их совокупность предоставляет архитектору симуляции сети возможность реализовать специфическую функциональность проектируемой имитационной модели: моделирование пакетных сетей передачи данных, программно-конфигурируемых сетей, беспроводных сетей 5G, Wi-Fi, LTE, имитация компьютерных TCP/IP атак на сеть, управление беспилотными летательными

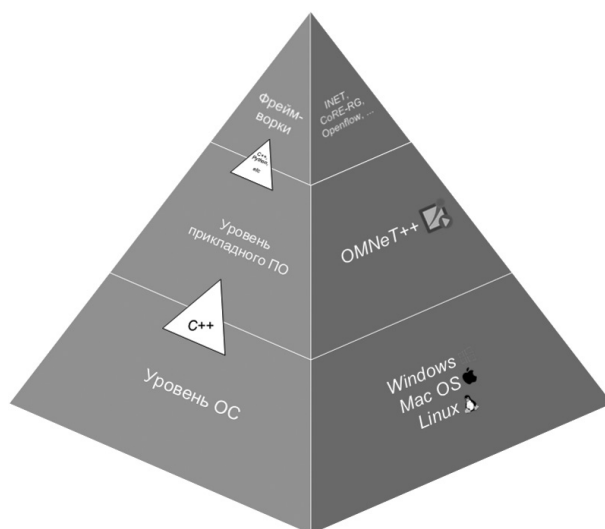


Рис. 1. Иерархия уровней прикладного моделирования с использованием OMNeT++

объектами, симуляция городского трафика и др. (с исчерпывающей библиотекой доступных для использования фреймворков можно ознакомиться на [9]). Опыт работы в указанной среде моделирования позволил сформулировать ряд преимуществ OMNeT++ по сравнению с другими средами имитационного моделирования:

- свободное распространение;
- кроссплатформенность;
- высокая степень детализации моделируемых процессов благодаря широкому выбору уже реализованных фреймворков;
- возможность варьирования скорости течения симуляционного времени относительно астрономического;
- низкий порог вхождения для создания простых симуляций сетей без учета внесения дополнительных изменений в логику работы их устройств;
- высокая степень наглядности результатов моделирования благодаря графическому отображению модели в масштабах реального и симуляционного времени;
- открытое и функционирующее международное сообщество разработчиков-исследователей.

Имитационная модель фрагмента ПККИС ПД ВН условного оперативного объединения (ОО), функционирующая в среде моделирования OMNeT++ (далее — модель), представлена на

рис. 2. В ней программно-управляемые коммутаторы узлов связи пунктов управления (УС ПУ) соединены между собой в плоскости передачи данных в виде топологии типа «звезда» с центром в командном пункте, а в плоскости управления — с центром в пункте управления УС ПУ (ПУ УС ПУ), а именно с контроллером программно-конфигурируемой сети (ПКС). Ввиду ограничений подсистемы графического отображения OMNeT++ каналы плоскостей передачи данных и управления сети наложены друг на друга.

В основу имитационных моделей программно-конфигурируемого коммутатора и контроллера ПКС приняты программные разработки научно-технического сообщества сетевых инженеров CoRE [10], занимающихся прикладными и перспективными исследованиями устройств и каналов Ethernet-сетей. Графические изображения указанных моделей представлены на рис. 3: слева и справа соответственно, исходный код размещен в открытом доступе [11] авторами, однако с целью воссоздания поведения модели программно-конфигурируемого коммутатора в виде СМО типа $M/M/1/\infty$ в её исходный код был внесён ряд концептуальных изменений. Предлагаемая имитационная модель, графическое изображение которой представлено на рис. 2, представляет её абонентам — ДЛ УС ПУ — услугу видео-конференц-связи (ВКС): на одном из уз-

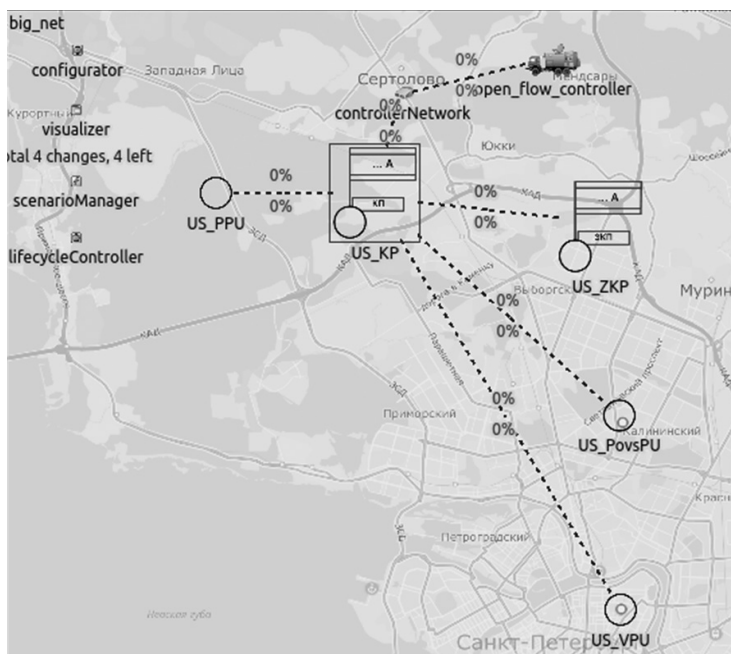


Рис. 2. Имитационная модель фрагмента ПККИС ПД ВН условного ОО

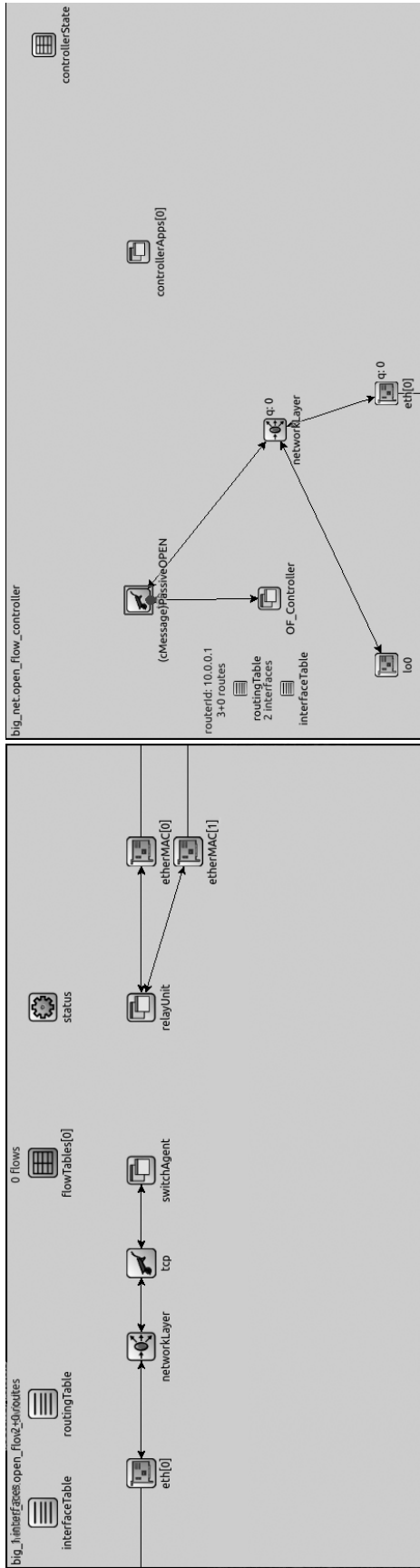


Рис. 3. Имитационные модели ПКС коммутатора (слева) и контроллера (справа)

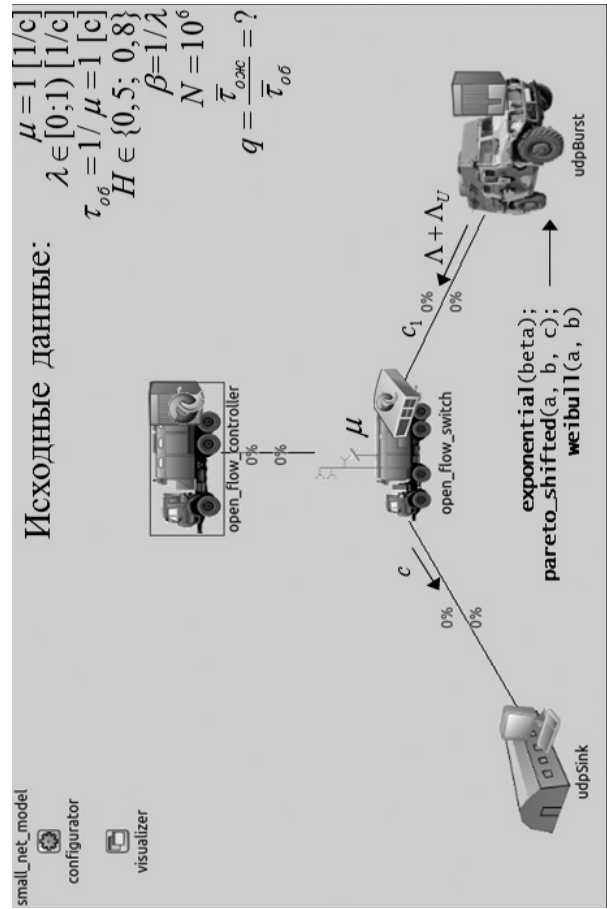


Рис. 4. Имитационная модель программно-конфигурируемого коммутатора ПКИКС ПД ВН

лов связи функционирует сервер ВКС, к которому подключаются абоненты с других УС.

Настройки модели позволяют задать время подключения абонентов к серверу, закон распределения времени ожидания между отправлением пакетов от сервера клиентам, размер пакетов, на которые инкапсулируется видеофайл ВКС, размер самого видеофайла ВКС, канальные скорость, величины задержки и количество битовых ошибок в каналах между УС ПУ и многие другие. Кроме того, с использованием конфигурационного файла модели имеется возможность настройки её сетевых параметров: время и адрес подключения Openflow-приложения коммутаторов к контроллеру ПКС, время задержки обслуживания Openflow-подключений на коммутаторах и контроллерах, выбор алгоритма, реализованного приложением контроллера ПКС и другие [13–15].

По результатам функционирования модели с целью последующей вычислительной обработки и нахождения зависимостей имеется возможность сбора различного рода статистики, например реальной пропускной способности каналов связи и задержек между УС ПУ, задержки «из конца в конец» между терминальными устройствами ДЛ УС ПУ — клиентами и сервером ВКС, размеры очередей и буферов Openflow-приложения коммутаторов и контроллера ПКС, времени ожидания обслуживания подключений коммутаторов к контроллеру и другие.

Кроме того, при реализации модели сымитировано воздействие противника на УС ПУ посредством настройки конфигурационного файла: в заданное симуляционное время в одном из каналов связи на определенный временной интервал увеличивается величина канальной задержки, в другое происходит «обрыв» канала связи между двумя узлами в плоскости передачи данных, в третье происходит временное выключение одного из коммутаторов ПКС — симуляция процесса выхода оборудования из строя.

С целью экспериментальной оценки адекватности разработанных аналитических и имитационных моделей объекта исследования основное коммутационное устройство ПККИС ПД ВН — программно-управляемый коммутатор — было представлено в виде СМО с различной дисциплиной обслуживания кадров Ethernet (подчиняющейся либо Пуассоновскому закону

распределения времени ожидания обслуживания заявок, либо детерминированному) и различным законом распределения времени между поступающими на один из его портов кадров (подчиняющимся либо закону распределения Парето, либо Вейбулла с различными коэффициентами самоподобия, либо Пуассоновскому). Графическое отображение указанной частной модели сети в среде имитационного моделирования OMNet++ представлено на рис. 4.

Предложенная модель является фрагментом модели ПККИС ПД ВН, представленной на рис. 2, и является программно-конфигурируемым коммутатором `open_flow_switch`, управляемым посредством протокола Openflow контроллером ПККИС ВН `open_flow_controller` и соединяющим источник `udpBurst` и приемник `udpSink` UDP-дейтаграмм, характер появления которых на входе соответствует потоку заявок с интенсивностью λ . Интенсивность обслуживания заявок коммутатором $\mu = 1$, объем выборки (количество кадров Ethernet) $N = 10^6$, показатель Хёрста H для самоподобного трафика принимает значения 0,5 и 0,8, а известные аналитические зависимости относительного времени ожидания обслуживания q от нагрузки ρ и H для различных СМО представлены в таблице.

Для автоматизированной обработки результатов экспериментов на модели программно-конфигурируемого коммутатора ПККИС ПД ВН и последующего их сравнения с теоретическими зависимостями использовался высокоуровневый язык программирования Python, функционирующий в клиент-серверной интегрированной среде разработки (Integrated Developer Environment, IDE) Jupyter Notebook. Указанный выбор обусловлен относительной простотой освоения указанного языка программирования, следствием чего стала его возросшая в последнее время популярность в академических кругах для решения научно-прикладных задач анализа и обработки данных, в том числе с использованием широкого набора библиотек математических, статистических, численных, оптимизационных классов и методов (функций), также с применением технологий машинного обучения. Функционирование клиент-серверной среды разработки Jupyter Notebook возможно организовать прямо на локальной (автономной) ЭВМ: к серверу, запущенному как программная служба на машине и от-

Аналитические зависимости q от ρ и H для различных СМО

| | | | |
|---|---|---|---------------------------------|
| fbm/D/1 | fbm/M/1 | M/D/1 | M/M/1 |
| $q(\rho, H) = \frac{\rho^{\frac{1}{2(1-H)}}}{2 \cdot (1-\rho)^{\frac{H}{1-H}}}$ | $q(\rho, H) = \frac{\rho^{\frac{1}{2(1-H)}}}{(1-\rho)^{\frac{H}{1-H}}}$ | $q(\rho) = \frac{\rho}{2 \cdot (1-\rho)}$ | $q(\rho) = \frac{\rho}{1-\rho}$ |

вечающему за обработку Python-кода, подключается WEB-браузер в роли клиента, на странице которого в интерактивном режиме позволяет возможным набирать код программы в ячейки и сразу же наблюдать результаты его работы. Пример реализации указанного клиент-серверного взаимодействия в Jupyter Notebook представлен на рис. 5.

Полученные по результатам экспериментов над имитационной моделью коммутатора зависимости относительного среднего времени ожидания обслуживания q потоковых блоков данных от нагрузки ρ при различных коэффициентах самоподобия H представлены на рис. 6: слева — для интенсивности входящего потока, подчиняющейся закону распределения Парето ($P/M/1$ и $P/D/1$) и Пуассона ($M/M/1$ и $M/D/1$), а справа —

закону распределения Вейбулла ($W/M/1$ и $W/D/1$) и Пуассона (для сравнения).

Наглядное сравнение результатов экспериментов над частной моделью функционирования программно-конфигурируемого коммутатора ПКККС ПД ВН в виде модели СМО с известными аналитическими зависимостями относительного времени ожидания обслуживания от нагрузки и коэффициента её самоподобия для различных СМО, представленными в таблице, приведены в форме графиков на рис. 7: слева для аналитических моделей нагрузки типа фрактального броуновского движения (fractional Brownian motion, fBm) и симуляции функционирования СМО типа $P/M/1$, $P/D/1$, $M/M/1$, $M/D/1$, справа — для аналитических моделей нагрузки типа фрактального броуновского движения и си-

5. Обработка результатов имитационного моделирования

5.1 Загрузка из .csv файла

```
[8]: omnetpp_data = pd.read_csv("omnetpp_output_N_10^6.csv")
omnetpp_data.head()
```

| | Unnamed: 0 | rho | q(rho), P/M/1, H=0.8 | q(rho), P/D/1, H=0.8 | q(rho), P/M/1, H=0.5 | q(rho), P/D/1, H=0.5 | q(rho), M/M/1, H=0.5 | q(rho), M/D/1, H=0.5 | q(rho), W/M/1, H=0.5 | q(rho), W/D/1, H=0.5 | q(rho), W/M/1, H=0.8 | q(rho), W/D/1, H=0.8 |
|---|------------|------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 0 | 0 | 0.05 | 0.000237 | 0.0 | 0.000000 | 0.0 | 0.052465 | 0.026395 | 0.049680 | 0.026116 | 0.557239 | 0.541146 |
| 1 | 1 | 0.06 | 0.001159 | 0.0 | 0.000000 | 0.0 | 0.063055 | 0.031906 | 0.059624 | 0.031814 | 0.614098 | 0.604773 |
| 2 | 2 | 0.07 | 0.003218 | 0.0 | 0.000000 | 0.0 | 0.075400 | 0.037782 | 0.070145 | 0.037427 | 0.669837 | 0.664883 |
| 3 | 3 | 0.08 | 0.006454 | 0.0 | 0.000078 | 0.0 | 0.086365 | 0.043246 | 0.080062 | 0.043586 | 0.722427 | 0.726047 |
| 4 | 4 | 0.09 | 0.010843 | 0.0 | 0.000479 | 0.0 | 0.098389 | 0.049424 | 0.089890 | 0.049513 | 0.773390 | 0.793548 |

5.2 Построение графиков

```
[15]: plt.figure(1, figsize=(18, 11), dpi=100)
plt.plot(rho, q_fbm_m_1_H_0_8, label='fbm/M/1, H=0.8', lw=2.5)
plt.plot(rho, q_fbm_d_1_H_0_8, label='fbm/D/1, H=0.8', lw=2.5)
plt.plot(rho, omnetpp_data['q(rho), P/M/1, H=0.8'], label='P/M/1, H=0.8', ls='-.', lw=2.5)
plt.plot(rho, omnetpp_data['q(rho), P/D/1, H=0.8'], label='P/D/1, H=0.8', ls='-.', lw=2.5)
plt.plot(rho, omnetpp_data['q(rho), P/M/1, H=0.5'], label='P/M/1, H=0.5', ls='--', lw=1.5)
plt.scatter(rho, omnetpp_data['q(rho), P/D/1, H=0.5'], label='P/D/1, H=0.5', alpha=0.4)
plt.scatter(rho, omnetpp_data['q(rho), M/M/1, H=0.5'], label='M/M/1, H=0.5', alpha=0.4)
plt.plot(rho, omnetpp_data['q(rho), M/D/1, H=0.5'], label='M/D/1, H=0.5', ls=':', lw=2.5)
```

Рис. 5. Фрагмент окна интерактивной IDE Jupyter Notebook

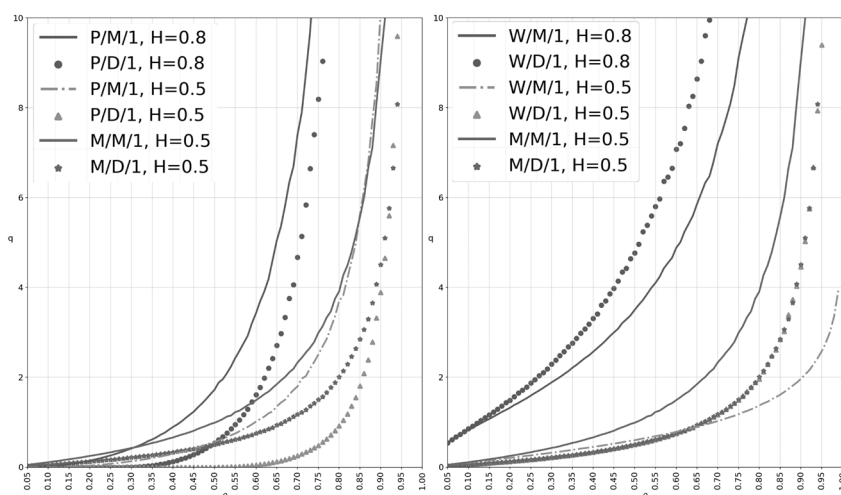


Рис. 6. Графическая интерпретация результатов экспериментального нахождения зависимостей $q(\rho, H)$ при различном характере входной нагрузки

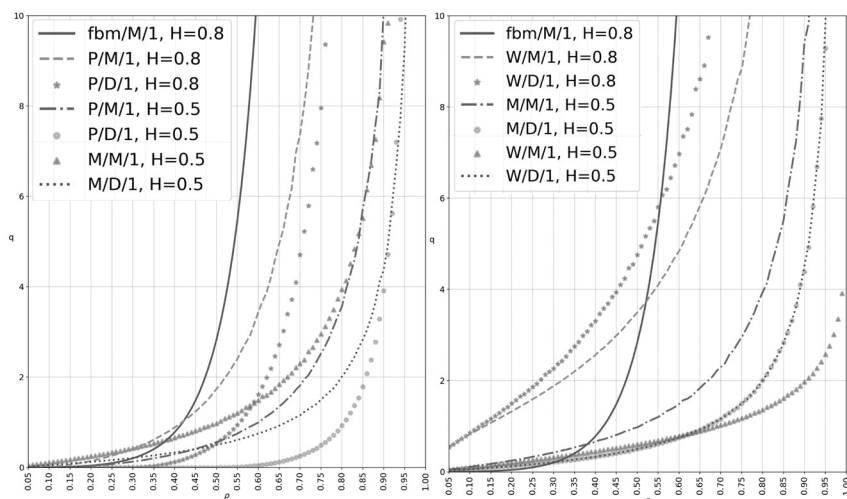


Рис. 7. Графики зависимости $q(\rho, H)$ при различных моделях входного потока, построенные с помощью имитационных и аналитических моделей

муляции функционирования СМО типа $W/M/1$, $W/D/1$, $M/M/1$, $M/D/1$.

Выводы

Логическая непротиворечивость наблюдаемых в имитационной модели программно-конфигурируемого коммутатора ПККИС ПД ВН зависимостей среднего времени ожидания обслуживания q от нагрузки ρ при различных коэффициентах самоподобия H известным аналитическим выражениям (таблица), представленных на графиках рис. 7, свидетельствует об объективной адекватности исследуемой имитационной модели ПККИС ПД ВН в целом как совокупности СМО.

Исходя из этого, следует считать, что предлагаемая имитационная модель ПККИС ПД ВН пригодна для исследования сети как макрообъекта. Однако в интересах получения максимального правдоподобия результатов дальнейших исследований необходимо провести частные исследования в направлении определения соответствия контролируемых и управляемых параметров аналитической модели сети и настраиваемых параметров её имитационной модели.

Литература

1. Прикладная математика / под ред. А.А. Колесникова. — СПб: ВАС, 1987.

2. Смелянский Р.Л. Технологии SDN и NFV: новые возможности для телекоммуникаций // Вестник связи, 2014. № 1. С. 43–47.
3. Трубников Д.О., Григорчук А.Н., Оранский С.В. К вопросу о применении технологии SDN в сетях связи // Теория и практика применения новых информационных технологий: Сборник трудов II Всероссийской научно-практической конференции кафедры электротехники, автоматики и метрологии электроэнергетического факультета, Ставрополь, 25–27 января 2021 года. — Ставрополь: Издательство «АГРУС», 2021. С. 111–115.
4. Долматов Е.А., Трубников Д.О., Яговитов Д.С. Методические подходы к решению задачи проактивного управления функционированием программно-конфигурируемой инфокоммуникационной сети специального назначения // Экстремальная робототехника, 2021. Т. 3. № 1. С. 216–227.
5. Трофимов А.Ю. Анализ современных технологий построения систем управления мультисервисными сетями связи // Инновационные технологии, экономика и менеджмент в промышленности: сборник научных статей IX международной научной конференции, Волгоград, 23–24 сентября 2021 года / Научно-производственное предприятие «Медпромдеталь». — Волгоград: ООО «Конверт», 2021. С. 79–80.
6. Одоевский С.М., Григорчук А.Н., Яговитов Д.С., Ясинский С.А. Модель совместного управления трафиком и пропускной способностью программно-конфигурируемой сети без промежуточной коммутации транзитных каналов // Информатика и космос. 2021. № 3. С. 24–30.
7. Одоевский С.М., Хоборова В.П. Моделирование пульсирующего трафика на входе инфокоммуникационной системы с заданными выходными характеристиками процесса обслуживания // Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники: III Всероссийская научно-практическая конференция. Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского. — Санкт-Петербург: Общество с ограниченной ответственностью «Арт-Экспресс», 2016. С. 293–295.
8. Одоевский С.М., Бусыгин А.В. Аналитическая модель обслуживания мультимедийного трафика с распределением Парето на основе аппроксимации результатов имитационного моделирования // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1. С. 74–108.
9. OMNeT++. Discrete Event Simulator [Электронный ресурс] // OpenSim Ltd. 2021. URL: <https://omnetpp.org/> (дата обращения 22.02.2022).
10. CoRE [Электронный ресурс] // CoRE Group. 2021. URL: <https://core-researchgroup.de/> (дата обращения 22.02.2021).
11. SDN4CoRE [Электронный ресурс] / Т. Haeckel, Т. Haugg. 2019. URL: <https://github.com/CoRE-RG/SDN4CoRE> (дата обращения 22.02.2021).
12. Шелухин О.И. Моделирование информационных систем. Учебное пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Горячая линия-Телеком, 2018. 516 с.: ил.
13. Миков А.И., Замятина Е.Б. Особенности моделирования распределенных информационных систем // Научный журнал. Вестник Пермского университета 2013. Математика. Механика. Информатика. Выпуск 4 (23). С. 107–118.
14. OMNeT++ Community Site. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.omnetpp.org> (дата обращения 10.01.2022).
15. Zamyatina E., Mikov A., Mikheev R. Linguistic and Program Tools For Debugging and Testing Of Simulation Models Of Computer Networks // International Journal «Information Models and Analyses». 2013. Vol. 2. № 1. P. 70–80.

References

solving the problem of proactive management of the software-defined infocommunication network for special purposes functioning // *Extreme robotics*, 2021. Vol. 3. № 1. P. 216–227.

5. Trofimov A.Yu. Analysis of modern technologies for building control systems for multiservice communication networks // *Innovative technologies, economics and management in industry: collection of scientific articles of the IX international scientific conference, Volgograd, September 23–24, 2021 / Research and Production Enterprise «Medpromdetal»*. — Volgograd: Envelope LLC, 2021. P. 79–80.

6. Odovskiy S.M., Grigorchuk A.N., Yagovityov D.S., Yasinsky S.A. Model of joint control of traffic and bandwidth of a software-defined network without intermediate switching of transit channels // *Information and space*. 2021. № 3. P. 24–30

7. Odovskiy S.M., Khoborova V.P. Modeling pulsating traffic at the input of an infocommunication system with given output characteristics of the service process // *Modern problems of the creation and operation of weapons, military and special equipment: III All-Russian scientific-practical conference. Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky*. — St. Petersburg: Limited Liability Company «Art-Express», 2016. P. 293–295.

8. Odovskiy, S.M., Busygin, A.V. An analytical model for servicing multimedia traffic with Pareto distribution based on the approximation of

simulation results // *Control, communication and security systems*. 2020. Vol. 1. P. 74–108.

9. OMNeT++. Discrete Event Simulator [Electronic resource] // OpenSim Ltd. 2021. URL: <https://omnetpp.org/> (date of the application 15.11.2021).

10. CoRE [Electronic resource] // CoRE Group. 2021. URL: <https://core-researchgroup.de/> (date of the application 15.11.2021).

11. SDN4CoRE [Electronic resource] / T. Haeckel, T. Haugg. 2019. URL: <https://github.com/CoRE-RG/SDN4CoRE> (date of the application 15.11.2021).

12. Shelukhin O.I. Information systems modeling. Textbook for universities. 2nd ed., rev. and add. — M.: Goryachaya liniya-Telecom, 2018. 516 p.

13. Mikov A.I., Zamyatina E.B. Features of modeling of distributed information systems // *Scientific Journal. Vestnik Permskogo Universiteta* 2013. Mathematics. Mechanics. Informatics. Issue 4 (23). P. 107–118.

14. OMNeT++ Community Site. [Electronic resource] Access mode: <http://www.omnetpp.org> (accessed 10.01.2022).

15. Zamyatina E., Mikov A., Mikheev R. Linguistic and Program Tools for Debugging and Testing Of Simulation Models Of Computer Networks // *International Journal «Information Models and Analyses»*. 2013. Vol. 2. № 1. P. 70–80.