

V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences
Academy of Sciences
RUDN University
Tomsk State University
Institute of Information and Communication
Technologies Bulgarian Academy of Sciences
Research and development company
“Information and networking technologies”

**DISTRIBUTED COMPUTER
AND COMMUNICATION NETWORKS:
CONTROL, COMPUTATION,
COMMUNICATIONS
(DCCN-2016)**

**Volume 3
Youth School-Seminar**

**Proceedings
of the Nineteenth International Scientific Conference**

Russia, Moscow, 21–25 November 2016

*Under the general editorship
of D.Sc. V. M. Vishnevskiy and D.Sc. K. E. Samouylov*

**Moscow
2016**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ДРУЖБЫ НАРОДОВ»
Национальный исследовательский
Томский государственный университет
Институт информационных и телекоммуникационных технологий
БОЛГАРСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
Научно-производственное объединение
«Информационные и сетевые технологии»

РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ КОМПЬЮТЕРНЫЕ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СЕТИ: УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛЕНИЕ, СВЯЗЬ (DCCN-2016)

В трех томах

**Том 3
Молодежная школа-семинар**

**Материалы
Девятнадцатой международной научной конференции**

Россия, Москва, 21–25 ноября 2016 г.

*Под общей редакцией
д.т.н. В.М. Вишневого и д.т.н. К.Е. Самуйлова*

**Москва
2016**

УДК 004.7:004.4.001:621.391:007(063)

ББК 32.973.202:32.968

Р 24

Р 24

Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь (DCCN-2016) = Distributed computer and communication networks: control, computation, communications (DCCN-2016) : материалы Девятнадцатой международной научной конференции, 21–25 нояб. 2016 г. : в 3 т.; под общ. ред. В. М. Вишневого и К. Е. Самуйлова — М.: РУДН, 2016.

ISBN 978-5-209-07666-7

Т. 3: Молодежная школа-семинар = Youth School-Seminar. — 499 с. : ил.

ISBN 978-5-209-07669-8 (т. 3)

Научная молодежная школа-семинар проводится при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Проект № 16-37-10500.

В научном издании представлены материалы Девятнадцатой международной научной конференции «Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь» по следующим направлениям:

- Оптимизация архитектуры компьютерных и телекоммуникационных сетей;
- Управление в компьютерных и телекоммуникационных сетях;
- Оценка производительности и качества обслуживания в беспроводных сетях;
- Аналитическое и имитационное моделирование коммуникационных систем последующих поколений;
- Беспроводные сети 4G/5G и технологии сантиметрового и миллиметрового диапазона радиоволн;
- RFID-технологии и их применение в интеллектуальных транспортных сетях;
- Интернет вещей, носимые устройства, приложения распределенных информационных систем;
- Распределенные системы и системы облачного вычисления, анализ больших данных;
- Вероятностные и статистические модели в информационных системах;
- Теория очередей, теория надежности и их приложения;
- Математическое моделирование высокотехнологичных систем;
- Математическое моделирование и задачи управления.

Сборник материалов конференции предназначен для научных работников и специалистов в области теории и практики построения компьютерных и телекоммуникационных сетей.

Текст воспроизводится в том виде, в котором представлен авторами

Утверждено к печати Программным комитетом конференции

ISBN 978-5-209-07669-8 (т. 3)

ISBN 978-5-209-07666-7

©Коллектив авторов, 2016

©Российский университет дружбы народов, 2016

Contents

Abaev P.O., Beschastny V.A., Tsarev A.S., Samouylov K.E. Network Resource Management	9
Abaev P.O., Beschastny V.A., Samouylov K.E. Tractable distance distribution approximations for hardcore processes	17
Abrosimov L.I., Rudenkova M.A. Analysis of Throughput Wireless Media and Settings for Access Point Data Layer	26
Abrosimov L.I., Larin A.A. Minimization of Data Center Cost Creating Monitoring System with Determinate Data Flow	34
Adkhamova A.S., Skubachevskii A.L. About damping problem for control system with delay	41
Aliev T.I., Sosnin V.V. Characteristics of Priority Queues with High Utilization Parameter	45
Begishev V.O., Petrov V.I., Samuylov A.K., Moltchanov D.A., Gaidamaka Yu.V. Modeling NB-IoT technologies for the Internet of Things Applications.	56
Belyaeva J.O., Skubachevskii A.L. Stationary solutions of the Vlasov equations for a two-component high temperature plasma.	60
Blinov A.I., Sevastianov L.A., Vasilyev S.A. Transport systems analysis using neural networks	65
Bogatyrev V.A., Parshutina S.A. Efficiency of Redundant Multipath Transmission of Requests Through the Network to Destination Servers	73
Bolotova G.O., Vasilyev S.A., Udin D.N. Systems of Differential Equations of Infinite Order with Small Parameter and Countable Markov Chains	81
Borodina A.B., Efrosinin D.V., Morozov E.V. Accelerated regenerative simulation of degradation process in the system with gradual and sudden failures	89
Dao T.N., Paramonov A.I. Analysis of communications network based unmanned aerial vehicles	92
Devyatkov V.V., Naung M.T. Model-oriented check the correctness of network interaction	101
Dinh T.D., Kirichek R.V. Development and research of methods of installation of wireless sensor nodes from UAV	114
Dolgushev R.A., Kirichek R.V. An Overview of Possible Testing Types and Methods for the Internet of Things	122

Eferina E. G., Kuznetsova O. V., Korolkova A. V., Kulyabov D. S., Sevastianov L. A. Spinor representation of Maxwell's equations	129
Fomin M. B., Ivanov A. E. Recognition of anchor points on three-dimensional objects by stereo images in machine vision systems	137
Gerasimenko M. A. Neuron Networks	143
Gevorkyan M. N., Demidova A. V., Korolkova A. V., Kulyabov D. S., Sevastianov L. A. Implementation of the Wiener stochastic process in OpenModelica	150
Gevorkyan M. N., Demidova A. V., Korolkova A. V., Kulyabov D. S., Sevastianov L. A. About extensions programming for OpenModelica	158
Glukhov I. V., Orlov Y. N. Modeling of stock prices in the density distribution of a product of processes Weibull	165
Gorbunova A. V., Kradenyh A. A., Zaryadov I. S. The mathematical model of a cloud computing system	169
Gorshenin A. K., Korolev V. Yu. On noising of data to refine the output of moving separation of mixtures	176
Grebeshkov A. Yu., Zuev A. V., Kiporov D. S. Computer Simulation of Average Channel Access Delay in Cognitive Radio Network	184
Hussein O. A., Okuneva D. V. Analysis of D2D technologies impact on the operation of wireless networks	191
Izmaylova Y. The research of retrieval queueing systems with exclusion of customers	198
Kalimulina E. Yu. Queueing System Convergence Rate	203
Kalinina K. A. Effective bandwidth estimation in highly critical systems	212
Kanzitdinov S. K., Vasilyev S. A. Neural networks with an infinite number of cells analysis	216
Kaspirovich I. E. Analysis of Numerical Solution Stability of Motion of Rolling Sphere on Rotating Plane	225
Kochegarov V. M., Zorine A. V. Low-priority queue and server's steady-state existence in a tandem under prolongable cyclic service	232
Kokshenev V., Mikheev P., Suschenko S., Tkachev R. Analysis of the effectiveness of forward error correction in selective mode of transport protocol	240
Kolbasova V., Lisovskaya E., Moiseeva S. Total capacity of customers in infinite-server queueing system with stationary renewal arrivals	248

Kolechkin A.O., Vladiko A.G. Software for testing of controllers in software-defined networks	256
Kolomoitcev V.S., Bogatyrev V.A. The Fault-tolerant Structure of Multilevel Secure Access to the Resources of the Public Network	264
Korshok E.O., Vasilyev S.A. Solutions analysis of infinite order singular perturbed stochastics differential equation	272
Korzun D.G., Vdovenko A.S., Bogoiavlenskaia O.I. On Convergence of Active Control Strategies for Subscription Notification Delivery in Smart Spaces	281
Koucheryavy A., Makolkina M.A., Paramonov A.I. Applications of augmented reality traffic and quality requirements study and modeling	289
Kovalchukov R., Samuylov A.K., Moltchanov D.A., Andreev S., Samouylov K.E. The three-dimensional simulation framework for interference and SIR assessment	301
Kulik V.A., Vybornova A.I. Methods of complex testing the devices of the Internet of Things	305
Lisovskaya E., Moiseeva S., Pagano M. The total capacity of customers in the MMPP/GI/ ∞ queueing system	313
Makolkina M.A., Surodeeva E.V. Study of the interrelationship of subjective perception of the video quality and Hurst parameter of traffic	326
Morozov E.V., Potakhina L.V. Speed-up estimation of a system with random volume customers	334
Morozov E., Peshkova I., Rumyantsev A. On regenerative envelopes for high performance cluster simulation	337
Nazarov A.A., Fedorova E. Asymptotic analysis of retrial queue M/M/1 with impatient calls under the long patience time condition	342
Nazarov A.A., Broner V.I. Inventory management system with On/Off control and phase-type distribution of purchases quantity	349
Nazarov A.A., Pomortseva N.A. Asymptotic analysis of M/GI/1 retrial system with conflicts and afterservice	356
Okuneva D.V., Proshutinskiy K.S. Improving of the traffic balancing efficiency on the base of estimations of user attention concentration	363
Pirmagomedov R., Hudoev I., Shangina D. Simulation of Medical Sensor Nanonetwork Applications Traffic	371
Schetinin E.Yu., Merzlyakov V. Statistical extreme type dependence structures modeling in spatial domains	381

Serebryakova A. A., Kulik V. A., Pham V. D., Kirichek R. V. Effect of Traffic IoT on network equipment	388
Shilin P. A., Kirichek R. V. Research the possibility of using UAVs swarm for organization VANET infrastructure	394
Shklyueva A. V., Kirichek R. V. An Overview of Possible Testing Types and Methods for the Flying Ubiquitous Sensor Networks	401
Sopin E. S., Daraseliya A. V., Yarkina N. V. On the virtual machines migration effectiveness in cloud systems	408
Sosnin V. V. Per-Packet Load Balancing of TCP Traffic for Goodput Aggregation of Communication Channels with Asymmetric Transmission Delay	412
Teltevskaya V. A., Makolkina M. A. Method for evaluating the quality of experience in augmented reality systems	419
Velieva T. R., Korolkova A. V., Kulyabov D. S., Sevastianov L. A. Hybrid simulation of active traffic management	427
Vishnevsky V. M., Ivanov R. E., Larionov A. A., Dudin M. S. Optimisation of data transmission scheduling in 5G mmWave backhaul network with STDMA	435
Yapo G. S., Milovanova T. A., Zaryadov I. S. Interval estimation of system performance with the optimal choice.	445
Zadiranova L., Melikov A., Moiseev A. Asymptotic Analysis of Queueing System with MMPP Arrivals and Feedback.	452
Zaryadov I. S., Matskevich I. A., Scherbanskaya A. A. The queueing system with general renovation and repeated service — time-probability characteristics.	458
Fedorov S. L. Kinetic approach in models of forecasting non-stationary time-series and functional calculations on them.	463
Gorbunova A. V., Zaryadov I. S., Matushenko S. I., Sopin E. S. The Estimation of Probability Characteristics of Cloud Computing Systems with Splitting of Requests.	467
Houankpo H. G. K., Kozyrev D. V. Sensitivity analysis of steady state reliability characteristics of a cold redundant data transmission system to the shapes of lifetime and repair time distributions of its elements	473
Ustyuzhanin N., Gilmudinov M. Analysis of background modeling methods performance in lossy video compression systems	481
Zaryadov I. S., Razumchik R. V. Stationary waiting time in $G/M/n/r$ FCFS queue with random renovation	489

УДК 004.94

Гибридное имитационное моделирование модуля активного управления трафиком

Т. Р. Велиева*, А. В. Королькова*,
Д. С. Кулябов*[†], Л. А. Севастьянов*[‡]

* Кафедра прикладной информатики и теории вероятностей,
Российский университет дружбы народов,
ул. Миклухо-Маклая, д.6, Москва, Россия, 117198

[†] Лаборатория информационных технологий,
Объединённый институт ядерных исследований,
ул. Жолио-Кюри 6, Дубна, Московская область, Россия, 141980

[‡] Лаборатория теоретической физики,
Объединённый институт ядерных исследований,
ул. Жолио-Кюри 6, Дубна, Московская область, Россия, 141980

Аннотация. Для исследования и верификации разрабатываемой коллективом математической модели сетевых протоколов были созданы дискретная имитационная и непрерывная аналитическая модели. Однако созданные реализации признаны не достаточно удовлетворительными. В связи с этим была поставлена задача разработать более адекватную имитационную модель, возможно в рамках иной парадигмы моделирования. В качестве подхода к моделированию сетевых протоколов предлагается использовать гибридный (непрерывно-дискретный) подход. Для компьютерной реализации модели использован язык физического моделирования Modelica. Открытый язык программирования Modelica имеет несколько реализаций. Нами выбран компилятор OpenModelica. Применение гибридного подхода позволяет в рамках непрерывной модели учесть переходы между разными состояниями при функционировании сетевых протоколов. Рассмотренный подход позволил получить простую имитационную модель протокола TCP. При этом данная модель имеет большой потенциал к расширению. Кроме того, представляется возможным использовать гибридный подход и при выполнении не только имитационного, но и аналитического моделирования.

Ключевые слова: гибридное моделирование, жидкостные модели, Modelica.

1. Введение

При моделировании сложных систем возникает проблема выбора модельного подхода. При применении дискретного и непрерывного подходов всегда остаются элементы модели, которые в не полной мере соответствуют выбранному подходу. Существующие модели систем с управлением не могут полностью удовлетворить нашим потребностям.

При моделировании сетевых протоколов перед нами встали серьёзные проблемы. Как оказалось, адекватные модели пакетного трафика просто отсутствуют. Нет даже общепринятой методики для его моделирования [1–3].

Для моделирования мы использовали непрерывные (жидкостные) модели TCP и RED [4, 5]. Однако, непрерывный подход позволяет лишь частично моделировать сетевые протоколы, так как обычно сетевые протоколы функционируют как конечные автоматы.

Для верификации полученной модели был использован программный комплекс ns-2 [6, 7], который позволяет проводить имитационное моделирование. По своей идеологии ns-2 является средством дискретного моделирования. В связи с этим комплекс обладает низкой масштабируемостью и подходит для моделирования малых сетей на малых промежутках времени.

Также проводилась верификация на натурном стенде на базе программного маршрутизатора [8].

Для дальнейшего развития нашей модели было принято решение использовать гибридный подход [9–13]. В данной статье описывается общий подход к гибридному моделированию сетевых протоколов. В качестве средства реализации предлагается использовать язык Modelica [14, 15].

В данной статье в разделе 2 описывается идеология гибридной парадигмы математического моделирования. В разделе 2.1 даётся общая информация об языке физического моделирования Modelica, реализующем в том числе и гибридную парадигму. В разделе 3 описывается процесс непрерывного и гибридного моделирования сетевого протокола TCP Reno.

2. Гибридный подход к моделированию

Гибридная¹ [9–13] система имеет как непрерывные, так и дискретные аспекты поведения. Гибридное поведение может быть обусловлено следующими причинами:

- совместное функционирование непрерывных и дискретных объектов. Например, система автоматического управления с непрерывным объектом управления и дискретным устройством управления.
- изменение состава системы. Здесь можно рассматривать системы с переменным количеством компонентов.
- мгновенные качественные изменения в непрерывном объекте. В данном случае качественные изменения непрерывных систем при моделировании представляются как дискретные события. В данном случае гибридность — не имманентная характеристика системы, а скорее приём моделирования.

Гибридные системы можно рассматривать как дискретно-непрерывные или как непрерывно-дискретные.

¹Другие названия: *непрерывно-дискретная система, система с переменной структурой, событийно-управляемая система.*

- В дискретных системах можно учитывать длительность ожидания очередного входного сигнала и длительность выходных действий (оснащение непрерывным временем).
- В модели с непрерывным временем можно допустить возможность протекания мгновенных процессов наряду с длительными.

Изначально нашим научным коллективом была разработана непрерывная динамическая модель. Для перехода к гибридной модели будем добавлять к существующей динамической модели дискретные элементы.

В непрерывных динамических моделях дискретные события могут задавать следующие составляющие:

- начальные условия или значения параметров в правых частях;
- форму правых частей;
- число уравнений.

Смена начальных условий и скачкообразное изменение параметров относятся к одному типу, поскольку скачкообразное изменение параметров может быть описано как смена начальных условий в некоторой новой системе уравнений.

Таким образом, в рамках гибридной модели можно представить как индикаторные функции, так и дифференциальные включения. Этот приём позволяет заменить систему с изменяющейся правой частью на систему с неизменной правой частью и меняющимися начальными условиями.

2.1. Язык моделирования Modelica

Язык Modelica [14, 15] позиционируется как объектно-ориентированный язык физического моделирования.

Modelica поддерживает непрерывную и гибридную [16] (непрерывно-дискретную) парадигмы. Впрочем, дискретные элементы в языке тоже присутствуют.

Язык Modelica представлен большим количеством коммерческих реализаций, такими как:

- Dymola [<http://www.claytex.com/>]. Один из наиболее развитых трансляторов для языка OpenModelica.
- CATIA [<http://www.3ds.com/products-services/catia/>]. Использует ядро на основе Dymola.
- MapleSim [<http://www.maplesoft.com/products/maplesim/>]. Интегрирована с Maple.
- Wolfram SystemModeler [<http://www.mathcore.com/>]. Является частью инфраструктуры платформы Wolfram.

Существуют и открытые реализации языка и среды Modelica:

- OpenModelica [<https://openmodelica.org/>]. Старейшая открытая реализация языка Modelica. Целью проекта является полная реализация спецификации Modelica.

- JModelica.org [<http://jmodelica.org/>]. Идеология реализации Jmodelica.org отличается от OpenModelica [17]. Целью проекта является возможность реализации расширений языка. В частности, Jmodelica.org поддерживает расширение Optimica, направленное на динамическую оптимизацию. Кроме того, связующим языком для Jmodelica.org является python.
- Modelicas реализует подмножество языка OpenModelica и используется в симуляторах Scicos [<http://www.scicos.org/>] и Xcos [<http://www.scilab.org/>].

3. Модель функционирования TCP

В протоколе TCP используется механизм скользящего окна для борьбы с перегрузками. Реализация данного механизма зависит от конкретного стандарта протокола TCP.

3.1. Механизм управления перегрузками в TCP

Поскольку оригинальная модель [8, 18, 19] базировалась на протоколе TCP Reno, то моделировать мы будем именно этот протокол.

В TCP Reno механизм управления перегрузками состоит из следующих фаз: медленный старт, предотвращение перегрузок, быстрая передача и быстрое восстановление. Динамика изменения размера окна перегрузки (Congestion Window, CWND) зависит от конкретной фазы.

Протокол TCP Reno отслеживает два варианта потери пакетов:

- Тройное дублирование подтверждения (Triple Duplicate ACK, TD).
- Тайм-аут (Timeout, TO).

Общий алгоритм управления перегрузкой относится к типу AIMD (Additive Increase, Multiplicative Decrease) — аддитивное увеличение размера окна и мультипликативное его уменьшение.

3.2. Переход к непрерывной модели для окна перегрузки

Поскольку мы строим гибридную непрерывно-дискретную модель, то для описания каждой фазы функционирования TCP перейдем к модели с непрерывным временем. Переход же между фазами будет описываться дискретными состояниями.

Используя сведения из раздела 3.1, формализуем поведение нашей модели.

Изменение размера TCP-окна связано с элементарным событием, которому соответствует либо приход одного подтверждения, либо приход всех подтверждений. Примем за элементарное событие приход всех подтверждений, который происходит за время двойного оборота (RTT).

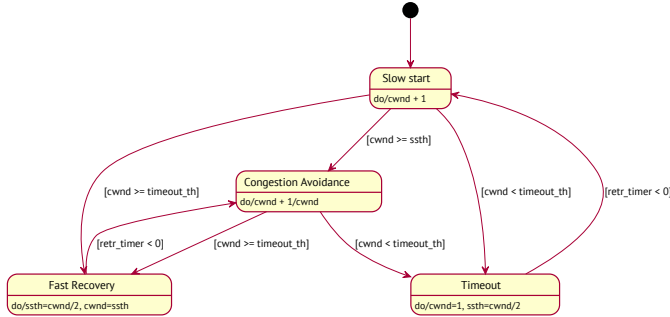


Рис. 1. Диаграмма состояний TCP

В фазе медленного старта (Slow Start) размер окна увеличивается при каждом приходе подтверждения АСК.

$$\frac{dW}{dt} = \frac{W}{T}, \quad d \ln W = \frac{dt}{T}, \quad \ln W = \frac{1}{T}; \quad W = \exp\left\{\frac{1}{T}\right\}.$$

Таким образом, окно растёт экспоненциально, как и должно быть в стадии медленного старта в соответствии с описанием TCP.

Аналогично рассмотрим фазу избежания перегрузок. При каждом приходе подтверждения АСК размер окна увеличивается.

$$\frac{dW}{dt} = \frac{1}{T}, \quad dW = \frac{dt}{T}, \quad W = \frac{1}{T}.$$

В результате получим линейный рост окна, как и описано в спецификации TCP.

3.3. Построение гибридной модели TCP

Для построения гибридной модели необходимо:

- записать динамическую модель для каждого состояния (сделано в пункте 3.2);
- заменить системы с кусочно-постоянными параметрами на системы с переменными начальными условиями;
- записать диаграмму состояний модели (рис. 1).

Полученную диаграмму (рис. 1) можно преобразовать в программу на языке Modelica (листинг 1).

Листинг 1: Алгоритм перехода состояний для протокола TCP

```
algorithm
  state := TCPState.slowStart;
  when edge(DelayD) and w >= timeout_th and (state ==
    TCPState.slowStart or state == TCPState.congestAvoid)
    then state := TCPState.fastRecov;
  elseif w >= ssth and state == TCPState.slowStart then
    state := TCPState.congestAvoid;
  elseif w < timeout_th and edge(DelayD) and (state ==
    TCPState.slowStart or state == TCPState.congestAvoid)
    then state := TCPState.timeOut;
  elseif retr_timer < 0 and state == TCPState.fastRecov
    then state := TCPState.congestAvoid;
  elseif retr_timer < 0 and state == TCPState.timeOut then
    state := TCPState.slowStart;
  end when;
end TCPSender;
```

4. Заключение

В качестве реализации сетевого протокола нами рассматривался протокол TCP. Было сделано несколько математических моделей (как аналитических, так и имитационных) данного механизма с использованием разных парадигм и техник. При ближайшем рассмотрении во всех методах моделирования были выявлены определенные недостатки.

Рассмотренный в статье гибридный (непрерывно-дискретный) подход к моделированию представляется нам на данном этапе наиболее адекватным для моделирования сетевых протоколов.

Гибридный подход может применяться как при аналитическом, так и при имитационном моделировании. К сожалению, данный подход не достаточно активно применяется исследователями, хотя и реализован в ряде систем компьютерного моделирования.

Благодарности

Работа частично поддержана грантами РФФИ № 14-01-00628, 15-07-08795 и 16-07-00556.

Литература

1. Paxson V., Floyd S. Why we don't know how to simulate the Internet // Proceedings of the 29th conference on Winter simulation - WSC '97. — New York, New York, USA : ACM Press, 1997. — P. 1037–1044.

2. Paxson V., Floyd S. Wide area traffic: the failure of Poisson modeling // IEEE/ACM Transactions on Networking. — 1995. — jun. — Vol. 3, no. 3. — P. 226–244.
3. Leland W. E., Taqqu M. S., Willinger W., Wilson D. V. On the self-similar nature of Ethernet traffic (extended version) // IEEE/ACM Transactions on Networking. — 1994. — Vol. 2, no. 1. — P. 1–15.
4. Demidova A. V., Korolkova A. V., Kulyabov D. S., Sevastyanov L. A. The method of constructing models of peer to peer protocols // 6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). — IEEE, 2014. — P. 557–562. — 1504.00576.
5. Eferina E. G., Korolkova A. V., Gevorkyan M. N. et al. One-Step Stochastic Processes Simulation Software Package // Bulletin of Peoples' Friendship University of Russia. Series "Mathematics. Information Sciences. Physics". — 2014. — no. 3. — P. 46–59. — 1503.07342.
6. Altman E., Jiménez T. NS Simulator for Beginners // Synthesis Lectures on Communication Networks. — 2012. — Vol. 5, no. 1. — P. 1–184.
7. Issariyakul T., Hossain E. Introduction to network simulator NS2. — 2012. — Vol. 978146141414. — P. 1–510.
8. Velieva T. R., Korolkova A. V., Kulyabov D. S. Designing installations for verification of the model of active queue management discipline RED in the GNS3 // 6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). — IEEE, 2014. — P. 570–577. — 1504.02324.
9. Maler O. Hybrid Systems and Real-World Computations // Workshop on Theory of Hybrid Systems. — Lyndby, Denmark : Springer-Verlag, 1992.
10. Maler O. Control from computer science // Annual Reviews in Control. — 2002. — jan. — Vol. 26, no. 2. — P. 175–187.
11. Färnqvist D., Strandemar K., Johansson K. H., Hespanha J. P. Hybrid Modeling of Communication Networks Using Modelica // The 2nd International Modelica Conference. — 2002. — P. 209–213.
12. Hespanha J. P., Bohacek S., Obraczka K., Lee J. Hybrid Modeling of TCP Congestion Control // Lncs. — 2001. — No. 2034. — P. 291–304.
13. Bohacek S., Lee J. Analysis of a TCP hybrid model // Proc. of the 39th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing. — 2001. — P. 1–10.
14. Fritzson P. Principles of Object-Oriented Modeling and Simulation with Modelica 2.1. — Wiley-IEEE Press, 2003. — P. 939.
15. Fritzson P. Introduction to Modeling and Simulation of Technical and Physical Systems with Modelica. — Hoboken, NJ, USA : John Wiley & Sons, Inc., 2011.
16. Broman D., Greenberg L., Lee E. A. et al. Requirements for hybrid cosimulation standards // Proceedings of the 18th International Conference on Hybrid Systems Computation and Control - HSCC '15. —

2015. — no. April. — P. 179–188.
17. Broman D., Fritzson P., Hedin G., Åkesson J. A comparison of two metacompilation approaches to implementing a complex domain-specific language // Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on Applied Computing - SAC '12. — New York, New York, USA : ACM Press, 2012. — P. 1919.
 18. Misra V., Gong W.-B., Towsley D. Stochastic differential equation modeling and analysis of TCP-window size behavior // Proceedings of PERFORMANCE. — 1999. — Vol. 99.
 19. Misra V., Gong W.-B., Towsley D. Fluid-based analysis of a network of AQM routers supporting TCP flows with an application to RED // ACM SIGCOMM Computer Communication Review. — 2000. — Vol. 30, no. 4. — P. 151–160.

UDC 004.94

Hybrid simulation of active traffic management

T. R. Velieva*, A. V. Korolkova*, D. S. Kulyabov*[†],
L. A. Sevastianov*[‡]

* *Department of Applied Probability and Informatics
Peoples' Friendship University of Russia
Miklukho-Maklaya str. 6, Moscow, 117198, Russia*

[†] *Laboratory of Information Technologies
Joint Institute for Nuclear Research
Joliot-Curie 6, Dubna, Moscow region, 141980, Russia*

[‡] *Bogoliubov Laboratory of Theoretical Physics
Joint Institute for Nuclear Research
Joliot-Curie 6, Dubna, Moscow region, 141980, Russia*

For the study and verification of our mathematical model of network protocols a discrete simulation model and a continuous analytical model were developed. However, for various reasons, these implementations are not entirely satisfactory. In connection with the task to develop a more adequate simulation model, possibly using a different modeling paradigm. In order to modeling of networks protocols it is proposed to use a hybrid (continuous-discrete) approach. For computer implementation of the model the physical modeling language Modelica is used. Because the language Modelica has multiple implementations we have selected the OpenModelica compiler. The hybrid approach allows us to take into account the transitions between different states in the continuous model of network protocols. The considered approach allowed to obtain a simple simulation model of the TCP network protocol. This model has great potential for expansion. Furthermore, it is possible to use a hybrid approach not only for the simulation but also for analytical modeling.

Keywords: hybrid modeling, fluid model, Modelica.