

На правах рукописи

Велиева Татьяна Рефатовна

**АНАЛИЗ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ
РЕЖИМОВ
НЕПРЕРЫВНО-ДИСКРЕТНЫХ
ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ**

05.13.18 — математическое моделирование, численные методы и
комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2019

Работа выполнена на кафедре прикладной информатики и теории вероятностей Российского университета дружбы народов

**Научный
руководитель:**

Доцент кафедры прикладной информатики и теории вероятностей ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов», кандидат физико-математических наук, доцент
Королькова Анна Владиславовна

**Официальные
оппоненты:**

Заведующая кафедрой математического моделирования и компьютерных технологий ФГБОУ ВО «Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина», доктор физико-математических наук, доцент
Масина Ольга Николаевна

Профессор Департамента анализа данных, принятия решений и финансовых технологий ФГБОУ ВО «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации», доктор физико-математических наук, доцент
Щетинин Евгений Юрьевич

**Ведущая
организация:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тверской государственный университет»

Защита состоится «24» мая 2019 г. в 15 ч. 30 мин на заседании диссертационного совета Д 212.203.28 при Российском университете дружбы народов по адресу: г. Москва, ул. Орджоникидзе д. 3, ауд. 110.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Российского университета дружбы народов по адресу: 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6.

(Отзывы на автореферат просьба направлять по указанному адресу.)

Автореферат разослан «_____» апреля 2019 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета

к. ф.-м. н.

С. А. Васильев

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Протокол TCP остаётся основным транспортным протоколом для передачи данных между различными приложениями, работающими через сеть Интернет. С ростом числа интернет-приложений и их разнообразия ключевой проблемой остаётся контроль перегрузок. Взаимодействие протокола TCP и механизма активного управления очередями (Active Queue Management, AQM) на маршрутизаторах существенно влияет на производительность интернет-приложений. В процессе взаимодействия протокола TCP и механизма активного управления очередями возможно возникновение такого паразитного явления, как глобальная синхронизация. Сущность данного явления состоит в том, что источники в сети начинают синхронную передачу данных, а затем (по получению информации о перегрузке) синхронно прекращают передачу. В результате деградируют показатели сети, такие как пропускная способность, задержки и т.п. Внешне явление глобальной синхронизации выглядит как возникновение устойчивого автоколебательного режима в системе.

Одним из наиболее известных алгоритмов AQM, управляющего перегрузкой в сетевом шлюзе, является алгоритм случайного раннего обнаружения (Random Early Detection, RED). Хотя этот алгоритм и разработан довольно давно, но до сих пор он используется в современном оборудовании в вариантах Weighted RED (WRED), Distributed WRED (DWRED), Flow-Based WRED (FB-WRED), Class-Based WRED и т.п. Сложностью в работе с алгоритмами типа RED остаётся подбор правильных параметров для его эффективной работы. Точная модель взаимодействия TCP с механизмом управления по алгоритму RED может помочь понять и предсказать динамическое поведение сети. Кроме того, модель может помочь определить границы области стабильной работы системы, что, в свою очередь, предоставит возможность проектировщикам выработать рекомендации по выбору параметров

алгоритма управления и сети в целом. Это важно для обеспечения надёжности работы сети и сетевых приложений.

Это делает **актуальным диссертационное исследование.**

Цель диссертационной работы

Целью работы является исследование явления глобальной синхронизации, а именно исследование нелинейных колебаний в системе и определение границы области возникновения автоколебательного режима, а также параметров возникновения автоколебаний в непрерывно-дискретной динамической модели процесса передачи данных с управлением интенсивностью TCP-подобного потока по алгоритму типа RED.

Задачи диссертационной работы

1. Определение аналитического метода линеаризации непрерывно-дискретной динамической модели процесса передачи данных с управлением интенсивностью TCP-подобного потока по алгоритму типа RED (п. 1 паспорта специальности 05.13.18);
2. Разработка алгоритмов и программного комплекса для линеаризации непрерывно-дискретной динамической модели процесса передачи данных с управлением интенсивностью TCP-подобного потока по алгоритму типа RED (п. 2 паспорта специальности 05.13.18);
3. Разработка алгоритмов и программного комплекса для численного исследования линеаризованной непрерывно-дискретной динамической модели процесса передачи данных с управлением интенсивностью TCP-подобного потока по алгоритму типа RED с целью определения границ области возникновения автоколебательного режима и определения значений параметров автоколебаний (п. 4 паспорта специальности 05.13.18).

Положения, выносимые на защиту

1. Проведена адаптация метода Крылова–Боголюбова и метода гармонической линеаризации для их применения к непрерывно-дискретной динамической модели процесса передачи данных с управлением интенсивностью ТСП-подобного потока по алгоритму типа RED. (п. 1 паспорта специальности 05.13.18);
2. Разработан программный комплекс для проведения символьных вычислений с целью получения линеаризованной системы ОДУ и автоматизации генерации программного кода для проведения численного эксперимента (п. 2 паспорта специальности 05.13.18);
3. Разработан программный комплекс на языке Julia для проведения вычислительного эксперимента с целью определения границ области возникновения автоколебательного режима и определения значений параметров автоколебаний (п. 4 паспорта специальности 05.13.18).

Научная новизна

1. Исследуемая в работе непрерывно-дискретная динамическая модель процесса передачи ТСП-подобного трафика с регулируемой алгоритмом типа RED динамической интенсивностью потока построена с помощью метода стохастизации одношаговых процессов, позволившего получить формализованное математическое описание предмета исследований из первых принципов, базируясь на виде основного кинетического уравнения, полученного из него приближённого уравнения Фоккера–Планка и соответствующего ему уравнения Ланжевена. При построении моделей подобного рода другими исследователями такой подход не применялся.
2. Линеаризация исследуемой непрерывно-дискретной динамической модели процесса передачи данных с управлением интенсивностью потока по алгоритму типа RED проведена с использованием адаптированного к этой модели метода Крылова–Боголюбова и метода

гармонической линеаризации, описываемый в рамках теории автоматического управления. Данные методы ранее к подобного рода моделям не применялись.

3. Для проведения аналитико–численного исследования полученной модели разработаны программные комплексы символьных и численных вычислений, причём реализована автоматическая генерация кода для численного эксперимента. В результате это позволило определить границы области возникновения автоколебательного режима, получить значения параметров автоколебаний, построить их спектральный портрет.

Практическая значимость

Разработанные методики позволяют формализовать задачи проектирования модулей активного управления очередями, что, в свою очередь, позволяет выделять подзадачи и алгоритмизировать их решение при реализации на компьютере. Метод определения границы области возникновения автоколебательного режима позволяет предоставить рекомендации проектировщикам телекоммуникационных сетей по выбору параметров сети для более оптимального использования ширины полосы пропускания, снижения латентности и джиттера при передаче информации. Кроме того, разработанные в работе методы и алгоритмы можно использовать в разнообразных системах с управлением потоком, таких как автомобильный трафик и т.п. Всё это позволяет реализовать процесс проектирования модулей активного управления трафиком в форме вычислительного эксперимента, включающего этап верификации с экспериментальными измерениями.

Результаты диссертации были использованы при реализации грантов РФФИ № 15-07-08795 «Разработка методики компьютерного проектирования стохастических моделей систем методом вычислительного эксперимента» и № 16-07-00556 «Программный комплекс для численных и символьных расчётов в распределённой среде для работы статистических и стохастических моделей на основе операторного метода».

Методы исследования

В работе использовались методы нелинейной теории колебаний, методы теории кинетических уравнений, компьютерные методы (методы компьютерной алгебры и символьных вычислений, численные методы, параллельные и распределённые вычисления).

Обоснованность и достоверность результатов

Обоснованность результатов диссертации следует из строгих математических методов нелинейной теории колебаний, зарекомендовавших себя пакетов символьных вычислений (SymPy), а также математических пакетов численных вычислений (NumPy, Julia).

Достоверность подтверждается совпадением полученных в работе результатов с результатами имитационного моделирования на ps-2.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях:

- Научная сессия НИЯУ МИФИ, Москва, Россия (2014 г., 2015 г., 2016 г.);
- Международной конференции «Математика. Компьютер. Образование», ОИЯИ, г. Дубна, Россия (2014 г., 2016 г.);
- International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT) (2014 г., 2015 г.);
- Научно-практический семинар молодых ученых и студентов «Системы управления, технические системы: устойчивость, стабилизация, пути и методы исследования», Елецкий государственный университет им. И. А. Бунина, Елец, Россия (2016 г., 2017 г., 2018 г.);
- International Scientific Conference Convergent Cognitive Information Technologies, Convergent, Moscow, Russia (2016 г., 2017 г.);

- Международная научная конференция «Распределённые компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь» (DCCN), Москва, Россия (2016 г.);
- Молодежная научная школа по прикладной теории вероятностей и телекоммуникационным технологиям (АРТСТ–2017), Москва, Россия (2017);
- International conference “Problems of Mathematical Physics and Mathematical Modelling”, NRNU MEPhI, Moscow, Russia (2017 г.);
- Международная конференция «Компьютерная алгебра», ФГБОУ ВО «РЭУ им. Г. В. Плеханова», Москва, Россия (2017 г.);
- Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем, РУДН, Москва, Россия (2015 г., 2016 г., 2017 г., 2018 г.);
- European Conference on Modelling and Simulation, Germany (2016 г., 2018 г.);
- International Conference on Dependability and Complex Systems (DepCoS-RELCOMEX), Brunow, Poland (2016 г., 2017 г., 2018 г.);

Также основные результаты диссертации докладывались на следующих научных семинарах:

- Семинар «Компьютерная алгебра» факультета ВМК МГУ и ВЦ РАН.
- Семинар «Математическое моделирование» кафедры прикладной информатики и теории вероятностей РУДН.
- Семинар кафедры управления информационными системами и цифровой инфраструктурой Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики».
- Семинар кафедры общей математики и математической физики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тверской государственный университет».

Публикации

По теме диссертации опубликовано 39 печатных работ, из которых 4 работы [1–4] — в рецензируемых журналах и изданиях, входящих в перечень ВАК, 12 — работы в изданиях, индексируемых WoS/Scopus [5–16]. Также имеются свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Личный вклад автора

Автор диссертации, работая в коллективе соавторов, самостоятельно сформулировал, выполнил проверку и улучшение математической модели, а также провел компьютерное моделирование. Его вклад в разработку всех вычислительных схем, в создание всех комплексов алгоритмов и программ, в их тестирование является определяющим. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, приложения, списка иллюстраций, а также списка литературы из 126 наименований. Общий объем диссертации 141 страница, из них 94 — страницы основного текста. Приложение составляет 22 страницы. Диссертация содержит 42 иллюстрации.

Во **Введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены основные положения, выносимые на защиту. Кратко изложено содержание диссертации.

В **первой главе** описывается объект моделирования, а также построение математической модели модуля управления трафиком типа RED. Глава состоит из 3 подразделов.

В **разделе 1.1** рассмотрены механизмы управления перегрузками в сетях передачи данных по протоколам TCP

Дано описание механизма адаптивного управления перегрузками в сетях на базе транспортных протоколов типа TCP. Рассмотрены фазы протокола TCP Reno, его механизмы предотвращения перегрузок. Также рассмотрено адаптивное управление перегрузками в алгоритме RED, применяемом в сетевом оборудовании.

В этом же подразделе проведён обзор работ, посвящённых методам моделирования и анализа моделей взаимодействия TCP и RED. Предложена схема проведения исследований по теме диссертационного исследования.

В **разделе 1.2** с помощью метода стохастизации одношаговых процессов проведено построение модели взаимодействия TCP и RED. Модель формализована в виде системы трёх стохастических дифференциальных уравнений, описывающих изменение размера окна TCP, изменение размера очереди и уравнения связывающего их через функцию экспоненциально взвешенного скользящего среднего размера очереди, используемого алгоритмом RED для управления очередью.

Для исследования явления глобальной синхронизации используется система стохастических дифференциальных уравнений в моментах:

$$\begin{cases} \dot{W}(t) = \frac{1}{T(Q(t), t)} - \frac{W(t)W(t - T(Q(t), t))}{2T(t - T(Q(t), t))}p(t - T(Q(t), t)); \\ \dot{Q}(t) = \frac{W(t)}{T(Q(t), t)}N(t) - C; \\ \dot{\hat{Q}}(t) = -w_q C \hat{Q}(t) + w_q C Q(t). \end{cases}$$

В **разделе 1.3** показано, что полученная в разделе 1.2 модель является гибридной (непрерывно-дискретной) моделью. Построены UML-диаграммы состояний TCP и RED на основе описания их функционирования.

Во **второй главе** проводится построение метода исследования автоколебательного режима нелинейной системы. Также в главе проведено аналитическое исследование модели. При этом в главе доказан ряд утверждений о структуре метода и особенностях исследуемой модели.

В разделе 2.1 проведена линеаризация модели в окрестности точки равновесия и через варьирования правых частей полученных уравнений, линеаризованная система приведена к блочно-линейному виду.

В разделе 2.2 проведена гармоническая линеаризация линеаризованной модели с целью сохранения свойств автоколебательного режима в исходной модели. Выписаны выражения для коэффициентов гармонической линеаризации. Выписаны выражения для постоянной и периодической составляющих линеаризованной модели.

В разделе доказано 2 утверждения.

Утверждение 2.1. При учёте сдвига автоколебаний линеаризованная система имеет вид:

$$\begin{aligned} x_0 + H_l(\omega) \Big|_{\omega=0} \quad \varkappa_0(A, \omega, x_0) &= 0, \\ 1 + H_l(\varkappa(A, \omega, x_0) + i\varkappa'(A, \omega, x_0)) &= 0. \end{aligned}$$

Утверждение 2.2. Для следующих соотношений

$$Q_{\min} < x_0 < Q_{\max}, \quad x_0 - A > Q_{\min}, \quad x_0 + A > Q_{\max}.$$

уравнения гармонической линеаризации для исследуемой системы имеют вид:

$$\begin{aligned}
& x_0 - \frac{C^3 T_f^3 (CT_p + Q)}{N \left(C^2 T_f^2 W_{Tp} + 2CNT_p + 2NQ \right)} \times \\
& \quad \times \frac{p_{\max}}{2\pi (Q_{\max} - Q_{\min})} \left[2 \operatorname{asin} \left(\frac{Q_{\max} - x_0}{A} \right) + \pi \right] = 0; \\
& 1 + \left[C^4 T_f^3 w_q (CT_p + Q) \right] \left[N (Cw_q + i\omega) (iT_f \omega + 1) \times \right. \\
& \quad \times \left. \left(2iC^2 T_f^2 T_p \omega + C^2 T_f^2 W_{Tp} + 2CNT_p + 2iCQT_f^2 \omega + 2NQ \right) \right]^{-1} \times \\
& \quad \times \frac{2p_{\max}}{\pi A (Q_{\max} - Q_{\min})} \sqrt{1 - \frac{(Q_{\max} - x_0)^2}{A^2}} = 0.
\end{aligned}$$

В разделе 2.3 проведено аналитическое исследование с целью определения параметров автоколебаний. Для определения границ области возникновения автоколебаний применён метод Найквиста–Михайлова. Также приведено описание метода Рауса–Гурвица, позволяющего определить амплитудно-фазовые частотные характеристики системы.

В третьей главе приведено описание разработанных для исследуемой в работе модели программных комплексов.

В разделе 3.1 дано описание принципов реализации модели в комплексе символьных вычислений (диаграмма 1). Алгоритмы работы программного комплекса представлены в форме диаграмм деятельности UML (UML Activity Diagram).

В разделе 3.2 дано описание принципов реализации модели в разработанном комплексе для проведения вычислительного эксперимента (диаграмма 2). Алгоритмы работы программного комплекса приведены также в форме диаграмм деятельности UML. По результатам работы двух программных комплексов программ построены параметрические портреты зависимости параметров автоколебаний от свободного параметра модели (рис. 3, 4, 5).

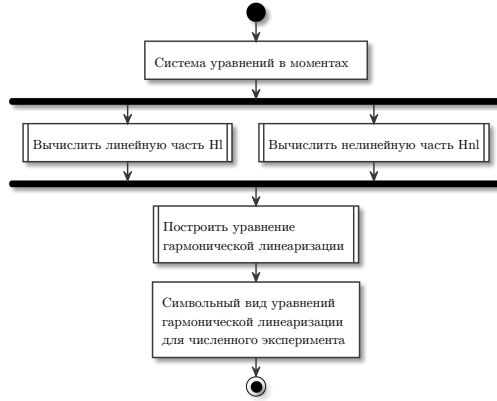


Рис. 1. Схема символьных вычислений

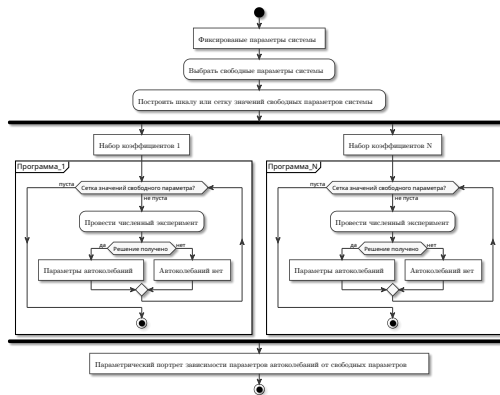


Рис. 2. Схема вычислительного эксперимента

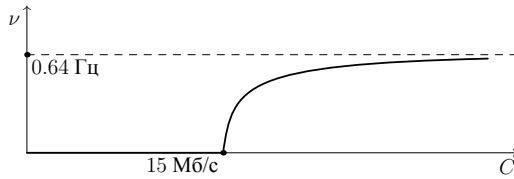


Рис. 3. Параметрический портрет зависимости частоты автоколебаний от интенсивности обслуживания

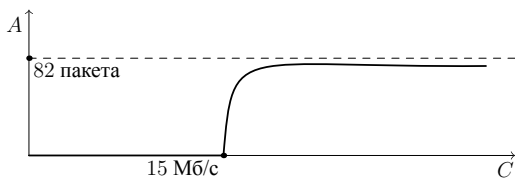


Рис. 4. Параметрический портрет зависимости амплитуды автоколебаний от интенсивности обслуживания

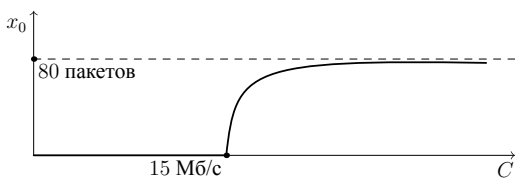


Рис. 5. Параметрический портрет зависимости сдвига автоколебаний от интенсивности обслуживания

В разделе 3.3 дано описание принципов реализации модели в системе имитационного моделирования ns-2. Построены графики поведения средней длины очереди для заданных значений интенсивности обслуживания (выбран в качестве свободного параметра системы). Показаны случаи наличия и отсутствия автоколебательного режима. Получены значения параметров автоколебаний, построен спектральный портрет автоколебаний мгновенной длины очереди при заданном значении свободного параметра. Показано совпадение с результатами как аналитического исследования, так и результатами эксперимента, проведённого с помощью разработанных комплексов программ.

В заключении перечислены основные выводы и результаты, полученные в диссертации.

1. В диссертационной работе решена поставленная задача по определению и применению аналитического метода линеаризации непрерывно-дискретной динамической модели процесса передачи данных с управлением интенсивностью ТСП-подобного потока по

алгоритму типа RED. Для рассмотренной в диссертации непрерывно-дискретной модели адаптированы и применены к анализу колебаний, возникающих в модели, метод Крылова–Боголюбова и метод гармонической линеаризации. Применение этих методов позволило сохранить свойство наличия автоколебаний в модели при её линеаризации.

2. Разработаны алгоритмы и программный комплекс символьных вычислений, позволивший провести линеаризацию исходной нелинейной системы дифференциальных уравнений и выделить линейную и нелинейную части в каждом из уравнений линеаризованной модели. Полученное семейство уравнений преобразовано в программный код для включения его в комплекс программ по проведению численного эксперимента.
3. Разработаны алгоритмы и программный комплекс для проведения серии численных экспериментов, позволивших решить задачу определения границ области возникновения автоколебательного режима и получить значения параметров автоколебаний для заданного значения выбранного в качестве свободного параметра системы (интенсивности обслуживания в очереди). Границы области возникновения автоколебательного режима определены по построенным параметрическим портретам зависимости параметров автоколебаний от значений свободного параметра.
4. Для верификации результатов разработаны алгоритмы и комплекс программ для проведения имитационного моделирования. Результаты проведённых экспериментов показали качественное совпадение с результатами символьно–численного эксперимента.

В **приложении** приведён аннотированный программный код разработанных в диссертационном исследовании программных комплексов.

В разделе **A.1** приведён код для системы компьютерной алгебры SymPy для линеаризация модели.

В разделе **A.2** приведён код на языке Julia для проведения вычислительного эксперимента.

В разделе **А.3** приведён код для системы компьютерной алгебры SymPy для реализации метода Рауса–Гурвица.

В разделе **А.4** приведён код имитационной модели для системы имитационного моделирования ns-2.

В разделе **А.5** приведён код на языке Julia для обработки результатов имитационного эксперимента.

Список работ, в которых опубликованы основные положения диссертации

1. *Велиева Т. Р.* Параметрическое исследование системы с модулем активного управления трафиком // Вестник РУДН. Серия «Математика. Информатика. Физика». — М., 2018. — Т. 26, № 3. — С. 272–284.
2. Реализация метода стохастизации одношаговых процессов в системе компьютерной алгебры / М. Н. Геворкян, А. В. Демидова, Т. Р. Велиева, А. В. Королькова, Д. С. Кулябов, Л. А. Севастьянов // Программирование. — М., 2018. — № 2. — С. 18–27.
3. *Кулябов Д. С., Королькова А. В., Велиева Т. Р.* Применение метода гармонической линеаризации к исследованию автоколебательного режима систем с управлением // Вестник РУДН. Серия «Математика. Информатика. Физика». — М., 2017. — Т. 25, № 3. — С. 234–252.
4. Модель управления очередями на маршрутизаторах / Т. Р. Велиева, А. В. Королькова, Д. С. Кулябов, Б. А. Сантуш // Вестник РУДН. Серия «Математика. Информатика. Физика». — М., 2014. — Т. 2. — С. 81–92.
5. Software Package Development for the Active Traffic Management Module Self-oscillation Regime Investigation / T. R. Velieva, A. V. Korolkova, A. V. Demidova, D. S. Kulyabov // Contemporary Complex Systems and Their Dependability: Proceedings of the Thirteenth International Conference on Dependability and Complex Systems

- DepCoS-RELCOMEX, July 2-6, 2018, Brunów, Poland. Vol. 761. — Cham : Springer International Publishing, 2019. — Chap. 48. P. 515–525.
6. Implementing a Method for Stochastization of One-Step Processes in a Computer Algebra System / M. N. Gevorkyan, A. V. Demidova, T. R. Velieva, A. V. Korol'kova, D. S. Kulyabov, L. A. Sevast'yanov // Programming and Computer Software. — 2018. — Vol. 44, no. 2. — P. 86–93.
 7. The Methodology of Studying of Active Traffic Management Module Self-oscillation Regime / D. S. Kulyabov, A. V. Korolkova, T. R. Velieva, E. G. Eferina, L. A. Sevastianov // DepCoS-RELCOMEX 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing. Vol. 582. — Cham : Springer International Publishing, 2018. — P. 215–224.
 8. The approach to investigation of the the regions of self-oscillations / T. R. Velieva, D. S. Kulyabov, A. V. Korolkova, I. S. Zaryadov // Journal of Physics: Conference Series. — 2017. — Dec. — Vol. 937. — P. 012057.1–8.
 9. Modelica-based TCP simulation / T. R. Velieva, E. G. Eferina, A. V. Korolkova, D. S. Kulyabov, L. A. Sevastianov // Journal of Physics: Conference Series. — Moscow, 2017. — Jan. — Vol. 788, no. 100. — P. 012036.1–7.
 10. The Criteria for the Study of Occurrence of Self-Oscillation Mode of Active Traffic Management Module / T. R. Velieva, I. S. Zaryadov, A. V. Korolkova, D. S. Kulyabov // 2nd International Scientific Conference "Convergent Cognitive Information Technologies", Convergent 2017. Vol. 2064. — Moscow : CEUR-WS, 11/2017. — P. 70–78.
 11. *Velieva T. R., Korolkova A. V., Kulyabov D. S.* About Linearization of Active Traffic Management Module Model // Proceedings of the Selected Papers of the 7th International Conference "Information and Telecommunication Technologies and Mathematical Modeling of

- High-Tech Systems” (ITTMM-2017), Moscow, Russia, April 24, 2017. Vol. 1995. — Moscow, 04/2017. — P. 114–124.
12. Stochastic Runge–Kutta Software Package for Stochastic Differential Equations / M. N. Gevorkyan, T. R. Velieva, A. V. Korolkova, D. S. Kulyabov, L. A. Sevastyanov // Dependability Engineering and Complex Systems. Vol. 470. — Springer International Publishing, 2016. — P. 169–179.
 13. Hybrid Simulation Of Active Traffic Management / A. V. Korolkova, T. R. Velieva, P. O. Abaev, L. A. Sevastianov, D. S. Kulyabov // Proceedings 30th European Conference on Modelling and Simulation. — Regensburg, Germany, 2016. — June. — P. 685–691.
 14. Diagram Representation for the Operator Approach of One-Step Processes Stochastization / E. G. Eferina, T. R. Velieva, A. V. Korolkova, M. Hnatic, D. S. Kulyabov, L. A. Sevastianov // 1st International Scientific Conference Convergent Cognitive Information Technologies, Convergent 2016. Vol. 1763. — Moscow : CEUR-WS.org, 11/2016. — P. 28–34.
 15. Diagram Representation for the Stochastization of Single-Step Processes / E. G. Eferina, M. Hnatic, A. V. Korolkova, D. S. Kulyabov, L. A. Sevastianov, T. R. Velieva // Distributed Computer and Communication Networks. DCCN 2016. Communications in Computer and Information Science. Vol. 678. — Cham : Springer International Publishing, 2016. — P. 483–497.
 16. *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 Computer Society, 2015. — P. 570–577.

Велиева Татьяна Рефатовна

Анализ автоколебательных режимов

непрерывно-дискретных динамических моделей

В работе исследуется непрерывно-дискретная динамическая модель процесса передачи TCP-подобного трафика с регулируемой с помощью алгоритма RED динамической интенсивностью потока. Для построения модели использован метод стохастизации одношаговых процессов. Исследование проводится путём линеаризации нелинейной системы дифференциальных уравнений на основе методики Крылова–Боголюбова. При линеаризации отдельно выделяются линейные и нелинейные части в каждом из уравнений линеаризованной модели. Разработаны алгоритмы и программные комплексы символьных и численных вычислений. Построены параметрические портреты зависимости параметров автоколебаний от значений свободных параметров. По построенным параметрическим портретам вычисляются границы области возникновения автоколебательного режима и значения параметров автоколебаний для заданного значения выбранного в качестве свободного параметра системы. Верификация аналитических и численных расчётов проводится на основе данных, полученных при имитационном моделировании.

Velieva Tatyana Refatovna

Analysis of the self-oscillatory regimes of continuous-discrete dynamic models

The continuous-discrete dynamic model of the process of transmitting TCP-like traffic with a dynamic flow rate controlled by the RED algorithm is investigated. The one-step stochastization process was used for the construction of the model. The study is conducted by linearizing the nonlinear system of differential equations based on the Krylov-Bogolyubov method. In linearization, the linear and nonlinear parts in each of the equations of the linearized model are separately distinguished. Algorithms and software complexes of symbolic and numerical calculations are developed. Parametric portraits of the dependence of the parameters of self-oscillations on the values of free parameters are constructed. On the basis of the constructed parametric portraits, the boundaries of the region of appearance of the self-oscillatory mode and the values of the parameters of the self-oscillations for a given value selected as a free parameter of the system are calculated. Verification of analytical and numerical calculations is carried out on the basis of data obtained from simulation.

Подписано в печать 29.01.2019. Формат 60×84/16.
Тираж 100 экз. Усл. печ. л. 1. Заказ № .

Типография Издательства РУДН
115419, ГСП-1, г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3