

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ЕЛЕЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. И.А. БУНИНА»  
ИНСТИТУТ МАТЕМАТИКИ, ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ И ТЕХНИКИ  
КАФЕДРА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
И КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

# **Системы управления, технические системы: устойчивость, стабилизация, пути и методы исследования**

**Материалы молодежной секции  
в рамках IV Международной  
научно-практической конференции**

**25 апреля 2018 г.**

Елец – 2018

УДК 51  
ББК 32.97  
**С 34**

Печатается по решению редакционно-издательского совета  
Елецкого государственного университета

**Редколлегия:**

О.Н. Масина, доктор физико-математических наук, доцент  
(Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина);  
О.Б. Гладких, кандидат физико-математических наук, доцент  
(Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина)

**С 34** Системы управления, технические системы: устойчивость, стабилизация, пути и методы исследования: материалы молодежной секции в рамках IV Международной научно-практической конференции (25 апреля 2018 г.). – Елец: Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина, 2018. – 318 с.

**ISBN 978-5-94809-982-8**

В сборнике представлены материалы молодежной секции в рамках IV Международной научно-практической конференции, проходившей в ЕГУ им. И.А. Бунина 25 апреля 2018 г. Включенные в сборник материалы посвящены теоретическим аспектам, практическим приложениям и современным тенденциям в области системного анализа, управления и обработки информации, теории устойчивости и стабилизации динамических систем, математического моделирования технических систем с применением комплексов проблемно-ориентированных программ. Рассмотрены возможности применения информационных технологий в сфере образования, научных исследований, технических разработок. Молодежная секция проведена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-38-10006 мол\_г).

Сборник предназначен научным работникам, преподавателям вузов, аспирантам, магистрантам, студентам. Материалы опубликованы в авторской редакции.

УДК 51  
ББК 32.97

**ISBN 978-5-94809-982-8**

© Елецкий государственный  
университет им. И.А. Бунина, 2018

## Содержание

<i>Седова Н.О.</i> Функции Ляпунова и условия Разумихина в анализе устойчивости непрерывных систем с запаздыванием .....	7
<i>Синицын И.Н., Дружинина О.В., Масина О.Н.</i> Обобщение нелинейных моделей миграционных потоков.....	16
<i>Кулябов Д.С., Геворкян М.Н.</i> Численный анализ геометризованных уравнений Максвелла.....	24
<i>Талагаев Ю.В.</i> Методы оценки инвариантных множеств нечетких систем Такаги–Сугено, подверженных действию внешних ограниченных возмущений.....	31
<i>Велиева Т.Р., Завозина А.В., Королькова А.В.</i> Нахождение параметров возникновения автоколебательного режима .....	36
<i>Мамонов С.С., Ионова И.В., Харламова А.О.</i> Пачечные биения в системе частотно-фазовой автоподстройки частоты .....	44
<i>Корольков Е.П., Иванова А.А.</i> Математическая модель поперечных колебаний тележки с криволинейным профилем катания колес .....	45
<i>Локтев А.А., Тальских К.Ю.</i> Воздействие на объекты транспортной инфраструктуры высокочастотных вибраций и возможности их демпфирования .....	49
<i>Токмаков С.В.</i> Применение техники линейных матричных неравенств в решении задачи стабилизации с учетом запаздывания обратной связи.....	55
<i>Кондаков О.В.</i> Моделирование свойств анизотропных объектов.....	64
<i>Геворкян М.Н., Демидова А.В., Демидова Т.С., Соболев А.А.</i> Стохастическое моделирование распространения компьютерных вирусов .....	73
<i>Петров А.А., Дружинина О.В., Масина О.Н.</i> Поиск оптимальных параметров движения для нелинейных динамических систем с многозначностью.....	79
<i>Лисовский Е.В., Ларьков Н.А.</i> Анализ экспоненциальной устойчивости некоторых классов неавтономных систем.....	86
<i>Петрова С.Н., Меньщикова К.Д.</i> Применение параметризованных линейных матричных неравенств в задачах стабилизации.....	89
<i>Климова Д.В.</i> Анализ возможностей применения аппарата экспертных оценок в задачах безопасности функционирования транспортных систем.....	93
<i>Елецких И.А.</i> Применение методов математического анализа в моделировании экономических процессов .....	98
<i>Велиева Т.Р., Завозина А.В., Королькова А.В.</i> Спектральная верификация модели модуля управления трафиком .....	102
<i>Апреутесей А.М.Ю., Королькова А.В., Кулябов Д.С.</i> Моделирование системы с управлением на языке Modelica .....	108
<i>Васильева И.И., Гладких О.Б.</i> Создание приложения в среде MS Visual C# для расчета компонент тензора электропроводности висмута .....	113

<i>Игонина Е.В.</i> О построении аппроксимирующих моделей для динамических систем с неполной информацией.....	116
<i>Масина О.Н., Дружинина О.В., Миялович Н., Ячимович М.</i> Исследование устойчивости некоторых классов моделей естествознания на основе принципа редукции.....	121
<i>Ефимов Д.Д., Кондаков О.В.</i> Определение оптимальных параметров энергетического спектра висмута моделированием коэффициента пропускания планарного волновода.....	126
<i>Герега В.А., Кондаков О.В.</i> Моделирование свойств анизотропного кристалла магнитооптическим методом .....	132
<i>Родионов А.В.</i> Компьютерное моделирование неустойчивых объектов маятникового типа.....	137
<i>Щенникова Е.В., Дружинина О.В.</i> О стабилизации многосвязных динамических систем .....	145
<i>Киселев Е.Г.</i> Математическое моделирование магнитооптического эффекта в ультраквантовом пределе магнитного поля .....	148
<i>Гладких О.Б.</i> Анализ функционирования экономических моделей с управлением.....	152
<i>Щербаков А.В.</i> Качественное исследование нелинейной трехмерной модели взаимодействия популяций .....	156
<i>Калабухов А.Н.</i> Микропроцессорное управление синхронным электродвигателем малой мощности.....	160
<i>Чурсин Д.В.</i> Системы частотного управления асинхронными электродвигателями .....	163
<i>Зайцева И.Н.</i> Применение программного пакета ASIMEC для исследования систем автоматического управления.....	168
<i>Клюндт К.Р., Кондаков О.В.</i> Программирование в Matlab магнитооптического эффекта в далекой инфракрасной области.....	175
<i>Петрищев Н.И., Кондаков О.В.</i> Восстановление энергетического спектра моделированием физического эксперимента .....	177
<i>Трубицын А.А.</i> Подход к разработке и созданию беспилотного летательного аппарата с помощью лазерной обработки и 3D-печати .....	181
<i>Опенкин Д.Ю.</i> Методы программно-аппаратной диагностики средств вычислительной техники.....	185
<i>Родионов А.В.</i> Сравнительный анализ методов распространения вредоносного программного обеспечения .....	189
<i>Тарова Е.Д.</i> Анализ устойчивости модели Лотки–Вольтерра с помощью математического пакета Maxima .....	193
<i>Мельников М.О.</i> Сортировка массивов с помощью алгоритма Timsort средствами MS Visual C#.....	199

<i>Максимов Д.И.</i> Разработка модульных приложений на C# .....	205
<i>Меркулова О.Ю.</i> Особенности разработки рекламного веб-сайта на основе html с использованием javascript и css .....	211
<i>Быков А.Р.</i> Использование среды имитационного моделирования GPSS World при построении технических моделей .....	215
<i>Герасимов П.Н.</i> Характеристика работоспособности рельсов в путевом хозяйстве .....	218
<i>Пирогов Д.П.</i> Оценка надежности функционирования электромеханического комплекса метрополитена с учетом максимальной нагрузки .....	225
<i>Ковалева Т.А.</i> Современные направления развития транспортно-технологических систем на основе создания мультимодальных терминално-логистических центров .....	229
<i>Игонина Е.В., Людаговская М.А., Петрова С.Н.</i> Современные подходы к разработке АСУ для оценки функционирования транспортных систем .....	235
<i>Плетнева И.Д.</i> Характеристика факторов риска при оценке надежности функционирования железнодорожного пути .....	240
<i>Позняк Н.А., Кабанов М.А.</i> Применение принципа модульности при проектировании оболочки для работы с базой данных .....	245
<i>Першина Н.А.</i> Особенности применения информационных технологий при обработке данных .....	249
<i>Опенкин Д.Ю.</i> Анализ методов тестирования программного обеспечения .....	254
<i>Роцупкин С.А.</i> Применение компьютерных технологий в процессе обучения информатике при реализации ФГОС .....	257
<i>Костик В.В., Серем Э.К.</i> Анализ современного состояния обеспечения конфиденциальности, целостности и доступности информации в мультисервисных сетях связи .....	261
<i>Щучка Т.А., Гнездилова Н.А., Гнездилова О.Н.</i> Интерактивные методы обучения в высшем образовании .....	266
<i>Черноусова О.Ю.</i> Организация учебно-исследовательской деятельности школьников в рамках непрерывного образования .....	270
<i>Печикина Д.И.</i> Использование современных информационных технологий при обучении поиску решения текстовых алгебраических задач .....	273
<i>Таров Д.А., Тарова И.Н.</i> Обобщенная модель функционирования распределенной информационной образовательной системы .....	278
<i>Симоновская Г.А.</i> Использование информационно-коммуникационных технологий при подготовке учащихся к итоговой аттестации .....	284
<i>Чуева А.В.</i> Возможности информационно-коммуникационных технологий при тестировании школьников .....	287
<i>Черноусова Н.В.</i> К вопросу о применении метода моделирования при тестовом контроле знаний .....	289

<i>Трубицына И.А.</i> Основы организации системы контентной фильтрации для провайдеров .....	294
<i>Пашкова В.В.</i> Использование технологии Macromedia Flash для создания анимационных рекламных объектов .....	298
<i>Лаухин В.В.</i> Методические особенности проектирования курса «Математический аппарат для построения компьютерных сетей» для инженерно-технических специальностей .....	301
<i>Саввина А.К., Чеснакова Е.С.</i> Основные проблемы защиты информации при работе в корпоративных компьютерных сетях .....	304
<i>Пантиюков А.С., Кравченко В.С., Паськова Д.Д.</i> Об использовании функциональных возможностей и вычислительных средств электронных таблиц Exsel в финансово-экономических расчетах .....	309
<i>Черномордов С.В., Петраков Н.С.</i> Основные особенности разработки сайта института математики, естествознания и техники .....	314

# МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ С УПРАВЛЕНИЕМ НА ЯЗЫКЕ MODELICA

Апреутесей А. М. Ю., Королькова А.В., Кулябов Д.С.

Российский университет дружбы народов

1032152610@pfur.ru, korolkova\_av@rudn.university, kulyabov\_ds@rudn.university

*Аннотация. Описана и реализована в среде OpenModelica упрощенная модель передачи трафика в системе с активным управлением очередью с алгоритмом типа RED. Продемонстрирована динамика поведения основных динамических переменных данной системы при разных пороговых значениях длины очереди.*

*Ключевые слова: алгоритм случайного раннего обнаружения (RED), фазовый портрет, OpenModelica.*

## Введение

Алгоритм активного управления очередью (Active Queue Management, AQM) с алгоритмом управления типа Random Early Detection (RED) используется для контроля и предотвращения перегрузок в очередях маршрутизаторов [1]. Маршрутизаторы отслеживают значение средней длины очереди для того, чтобы в случае превышения порогового значения (т.е. при перегрузке) отбросить часть пакетов случайным образом, снизив при этом интенсивность трафика от источника. При моделировании нелинейных систем подобного рода оптимально использовать гибридный подход, реализованный с помощью средства OpenModelica. Modelica является объектно-ориентированным языком физического моделирования, подходящим для имитации как непрерывных, так и дискретных систем. Целью данной работы является моделирование упрощенной модели системы с управлением по алгоритму типа RED в среде OpenModelica, а также демонстрация поведения основных ее динамических переменных.

## Упрощенная модель системы с управление по алгоритму типа RED

Математическая модель системы с управлением по алгоритму типа RED представима в виде трех уравнений

$$\dot{W}(t) = \frac{1}{R(t)} - \frac{W(t)}{2} \frac{W(t-R(t))}{R(t-R(t))} p(t-R(t)), \quad (1)$$

$$\dot{Q}(t) = \begin{cases} (1-p(t)) \frac{N(t)W(t)}{R(t)} C, & Q(t) > 0, \\ \max \left[ (1-p(t)) \frac{N(t)W(t)}{R(t)} C, 0 \right], & Q(t) = 0, \end{cases} \quad (2)$$

$$q(t) = \frac{\ln(1-\alpha)}{\delta} q(t) - \frac{\ln(1-\alpha)}{\delta} Q(t), \quad (3)$$

описывающих поведение трех функций:  $W(t)$  – средний размер TCP окна (в пакетах),  $Q(t)$  – средний размер очереди (в пакетах),  $q(t)$  – экспоненциально взвешенное скользящее среднее значение длины очереди. Полная модель данной системы представлена в работе [2].

Система, рассматриваемая в данной работе, содержит  $C$  приборов, что соответствует скорости обработки пакетов в очереди ( $C$  пакетов в единицу времени). В рассматриваемой системе учитываются параметры  $N(t)$  – число TCP-сессий и  $R(t)$  – время двойного оборота (в сек) (англ. Round Trip Time, RTT).

На средний размер TCP окна влияет вероятностная функция сброса пакета  $p(\cdot)$ , отвечающая за управление по алгоритму RED, значения которой лежат в интервале  $[0,1]$ . Эта функция зависит от  $q$ , минимального и максимального пороговых значений  $Q_{min}$  и  $Q_{max}$ , а также от  $p_{max}$  – параметра, определяющего часть отбрасываемых пакетов в случае, если  $q$  достигает максимального значения.

Вероятность маркировки на отбрасывание пакетов вычисляется следующим образом [1, 2]:

$$p = \begin{cases} 0, & 0 \leq \hat{q} < q_{min}, \\ \frac{\hat{q} - q_{min}}{q_{max} - q_{min}} p_{max}, & q_{min} \leq \hat{q} \leq q_{max}, \\ 1, & \hat{q} > q_{max}. \end{cases} \quad (4)$$

Уравнение (1) описывает динамическое изменение среднего размера TCP окна  $\dot{W}(t)$ . Компонента  $1/R(t)$  отражает фазу медленного старта, во время которой размер окна увеличивается за единицу времени двойного оборота. Второе слагаемое  $\frac{W(t)W(t-R(t))}{2R(t-R(t))} p(t-R(t))$  описывает мультипликативное уменьшение размера окна в два раза при каждой потере пакета.

Уравнение (2) моделирует поведение среднего размера очереди  $\dot{Q}(t)$ . Слагаемое  $(1-p(t)) \frac{N(t)W(t)}{R(t)}$  отражает увеличение длины очереди при поступлении пакетов, что соответствует средней интенсивности поступления пакетов. Уменьшение длины очереди в случае, если она больше нуля, моделируется разностью средней интенсивности поступления пакетов и пропускной способности  $C$ .

Уравнение (3) отражает изменение экспоненциально взвешенного скользящего среднего значения длины очереди  $q(t)$ , необходимого для сглаживания выбросов мгновенного значения длины очереди  $Q(t)$ .

В уравнении (3)  $\delta$  – время между поступлениями пакетов в систему:  $\delta=1/C$ ,  $\alpha$  – весовой коэффициент экспоненциально взвешенного скользящего среднего размера длины очереди:  $\alpha=1-e^{-1/C}$ . Данная формула предложена в работе [1].

Дополнительно упростим нашу модель предположив, что число TCP-сессий и время двойного оборота являются постоянными, не изменяющимися со временем, т.е.  $N(t) \equiv N, R(t) \equiv R$ . В результате модель (1)–(3) примет вид:

$$\begin{aligned}\dot{W}(t) &= \frac{1}{R} \cdot \frac{W(t)}{2} \frac{W(t-R)}{R(t-R)} p(t-R), \\ \dot{Q}(t) &= \begin{cases} (1-p(t)) \frac{NW(t)}{R} - C & Q(t) > 0, \\ \max \left[ (1-p(t)) \frac{NW(t)}{R} - C, 0 \right], & Q(t) = 0, \end{cases} \\ q(t) &= \frac{\ln(1-\alpha)}{\delta} q(t) - \frac{\ln(1-\alpha)}{\delta} Q(t),\end{aligned}\tag{5}$$

Реализация системы уравнений (5) в среде OpenModelica имеет вид:

```
model TCP_RED
parameter Real Q_min(start=20); parameter Real Q_max(start=60);
parameter Real p_max(start=0.1); parameter Real N(start=1);
parameter Real C(start=11); parameter Real R(start=1); \
Real p(start=0); Real alfa;
Real q_cap(start=1);
Real Q(start=1);
Real W(start=0.1);
equation
p = if ((q_cap>=0)and(q_cap<Q_min)) then 0 else
(if ((q_cap>=Q_min) and (q_cap<=Q_max)) then
((q_cap-Q_min)*p_max/(Q_max-Q_min)) else 1);
der(W)=(1/R)-(W*delay(W,R)*delay(p,R)/(2*R));
der(Q)= if Q>0 then ((N*W*(1-p)/R)-C) else
max(((N*W*(1-p))/R)-C,0);
alfa=1-exp(-1/C);
der(q_cap)=(log(1-alfa)*q_cap/(1/C))-(log(1-alfa)*Q/(1/C));
annotation(experiment(StartTime=0, StopTime=200,
Tolerance=1e-06, Interval=0.2));
end TCP_RED;
```

Продемонстрируем поведение динамических переменных системы (5) при разных пороговых значениях. В случае начальных значений параметров  $Q_{min}=20; Q_{max}=60; p_{max}=0.1; N=1, C=11, R=1, p(0)=0.1, \hat{q}(0)=1; Q(0)=1; W(0)=0.1$  рисунок 1 демонстрирует динамику изменения  $W(t), Q(t), \hat{q}(t)$  и фазовую траекторию (рис. 2) в виде предельного цикла, что говорит о наличии автоколебательного режима при заданных параметрах [3].

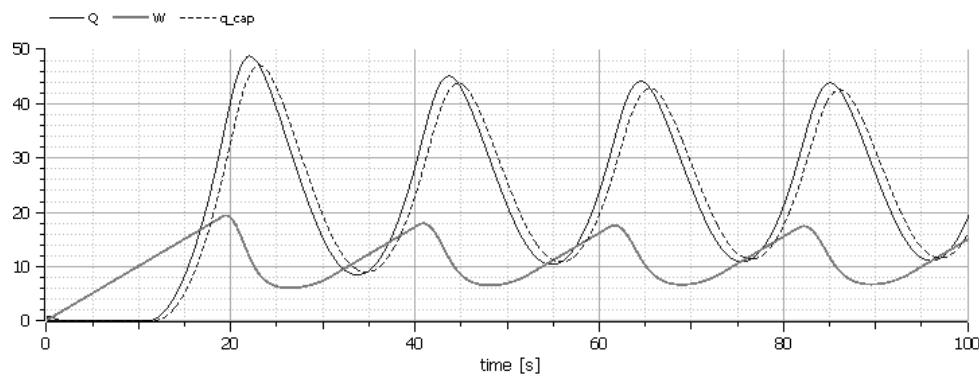


Рис.1. Динамика изменения динамики  $W(t),Q(t)$  и  $\hat{q}(t)$

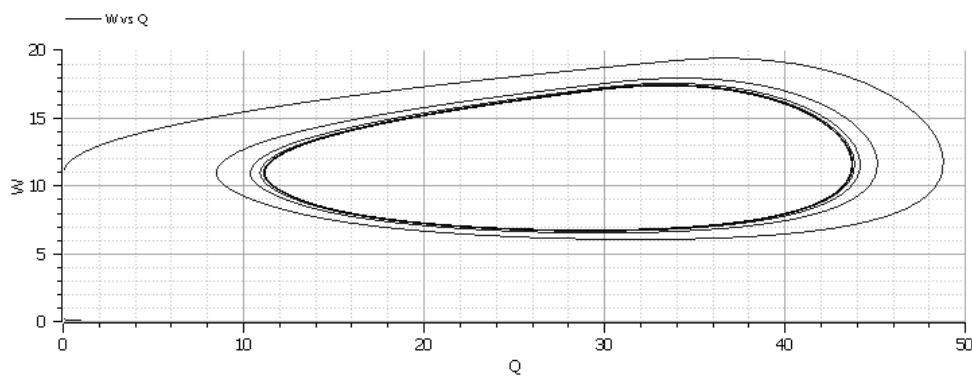


Рис. 2. Фазовый портрет  $(Q,W)$

В случае изменения минимального и максимального пороговых значений среднего размера очереди  $Q_{min}=10; Q_{max}=85$  динамика изменения  $W(t),Q(t),\hat{q}(t)$  (рис. 3) и фазовый портрет( $W,Q$ ) меняются. Фазовая траектория принимает вид фокуса, что говорит об отсутствии автоколебательного режима (рис. 4).

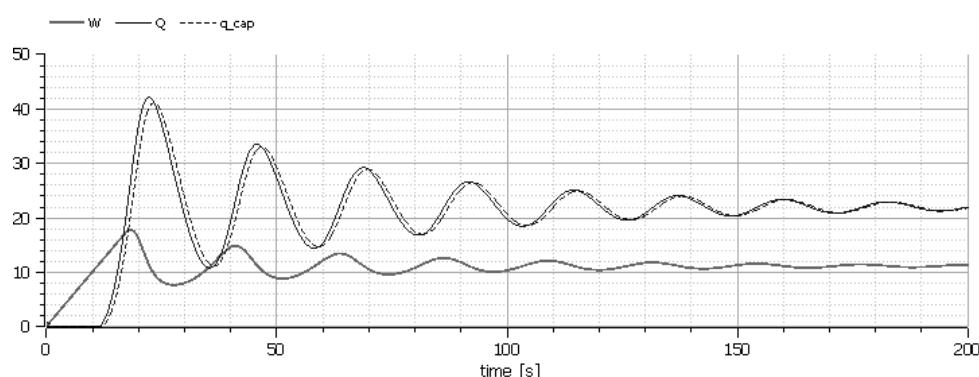


Рис. 3. Динамика изменения  $W(t),Q(t)$  и  $\hat{q}(t)$  при  $Q_{min}=10, Q_{max}=85$

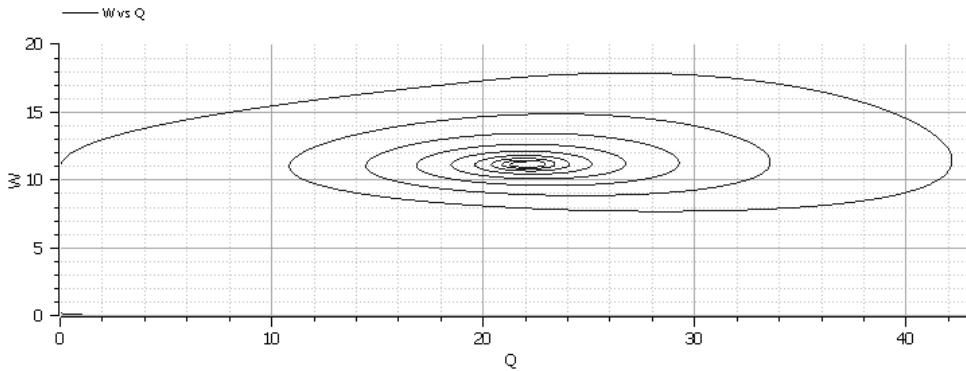


Рис. 4. Фазовый портрет  $(Q, W)$  при  $Q_{min} = 10, Q_{max} = 85$

### Заключение

В работе продемонстрировано применение языка Modelica к моделированию гибридной простой системы с управлением по алгоритму типа RED. Показано наличие или отсутствие автоколебательного режима при определенных параметрах системы. В дальнейшем планируется решить задачу нахождения области возникновения автоколебательного режима системы с управлением.

Работа частично поддержана грантом РФФИ № 16-07-00556. Также публикация подготовлена при поддержке программы РУДН «5-100».

### Литература

1. *Floyd S., Jacobson V.* Random Early Detection Gateways for Congestion Avoidance // IEEE/ACM Transactions on Networking. 1993. No 1(4). Pp. 397–413. <http://www.icir.org/floyd/papers/red/red.html>.
2. *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. Volume 30, Issue 4, October 2000. P. 151–160.
3. *Королькова А. В.* Определение области возникновения автоколебаний в системах типа RED // Вестник РУДН. Серия «Математика. Информатика. Физика». 2010. № 1. С. 103–105.

Научное издание

**Системы управления,  
технические системы:  
устойчивость, стабилизация,  
пути и методы исследования**

**Материалы молодежной секции в рамках  
IV Международной научно-практической конференции**

**25 апреля 2018 г.**

*Техническое исполнение – В. М. Гришин*

*Оформление обложки – А.В. Родионов*

*Книга печатается в авторской редакции*

Формат 60 x 84 1/16. Гарнитура Times. Печать трафаретная.

Печ.л. 19,9 Уч.-изд.л. 18,5

Тираж 500 экз. (1-й завод 1-80 экз.). Заказ 45

Отпечатано с готового оригинал-макета на участке оперативной полиграфии  
ФГБОУ ВО «Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина»

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина»  
399770, г. Елец, ул. Коммунаров, 28,1