



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ДРУЖБЫ НАРОДОВ  
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ УПРАВЛЕНИЯ  
ИМ. В.А. ТРАПЕЗНИКОВА РАН

# **ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ (ИТММ-2020)**

**МАТЕРИАЛЫ  
XIX Международной конференции  
имени А. Ф. Терпугова  
2–5 декабря 2020 г.**



ТОМСК  
«Издательство НТЛ»  
2021

УДК 519  
ББК 22.17  
И74

И74 Информационные технологии и математическое моделирование (ИТММ-2020): Материалы XIX Международной конференции имени А. Ф. Терпугова (2–5 декабря 2020 г.). – Томск: Изд-во НТЛ, 2021. – 498 с.

ISBN 978-5-89503-647-1

Сборник содержит избранные материалы XIX Международной конференции имени А. Ф. Терпугова по следующим направлениям: теория массового обслуживания и ее приложения, интеллектуальный анализ данных и визуализация, информационные технологии и программная инженерия, математическое и компьютерное моделирование технологических процессов.

Для специалистов в области информационных технологий и математического моделирования.

УДК 519  
ББК 22.17

Редколлегия:

**А.А. Назаров**, доктор технических наук, профессор,  
**С.П. Моисеева**, доктор физико-математических наук, профессор,  
**А.Н. Моисеев**, доктор физико-математических наук, доцент,  
**М.П. Фархадов**, доктор технических наук, профессор,  
**Е.Ю. Лисовская**, кандидат физико-математических наук.

*Конференция проведена при поддержке  
международного научно-методического центра  
Томского государственного университета по математике,  
информатике и цифровым технологиям в рамках  
федерального проекта «Кадры для цифровой экономики»  
национальной программы  
«Цифровая экономика в Российской Федерации»*

ISBN 978-5-89503-647-1

© Авторы. Текст, 2021  
© ООО «Издательство НТЛ».  
Оформление. Дизайн, 2021

# Исследование системы с обратной связью, рекуррентным обслуживанием и неординарным пуассоновским входящим потоком

Анатолий Назаров<sup>1</sup>, Светлана Рожкова<sup>1,2</sup>,  
Екатерина Титаренко<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Национальный исследовательский  
Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

<sup>2</sup> *Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет, г. Томск, Россия*

В настоящее время для обеспечения надежности инфокоммуникационных систем используют модель RQ-системы с обратными связями, которая предполагает повторное облуживание заявок, уже получивших облуживание [1].

Данное исследование посвящено системам массового облуживания (СМО) с мгновенными и отложенными обратными связями, неординарным пуассоновским входящим потоком, рекуррентным облуживанием и является продолжением исследования [2], в котором рассматривалось экспоненциальное облуживание. При исследовании систем с произвольным облуживанием используются дополнительные переменные, такие, как истекшее и остаточное время [3].

В работе при построении системы уравнений Колмогорова используется истекшее время. В этом случае рассматриваемая система допускает аналитическое решение, в отличие от метода с использованием остаточного времени, при котором необходимо применять асимптотические способы решения. Получено стационарное распределение вероятностей числа заявок на орбите.

## Описание модели и постановка задачи

Рассмотрим СМО  $M^n/GI/1$  с повторными вызовами (рис. 1). На вход поступает пуассоновский неординарный поток заявок с параметром  $\lambda$  и заданными вероятностями  $q_\nu$  появления  $\nu$  заявок в группе ( $\nu > 1$ ,  $q_0 = 0$ ,  $\sum_{\nu=1}^{\infty} q_\nu = 1$ ). Если облуживающий прибор свободен, то одна заявка поступает на облуживание, остальные попадают на орбиту. Заявки, поступившие в момент, когда прибор занят, также попадают на орбиту.

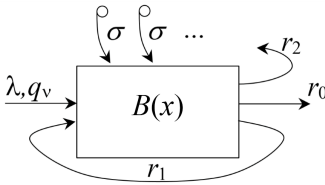


Рис. 1. Модель СМО

Длительность обслуживания заявки является случайной величиной с произвольной функцией распределения  $B(x)$ . Заявка, обслуживание которой завершено, покидает систему с вероятностью  $r_0$ , повторно поступает на обслуживание с вероятностью  $r_1$  или переходит на орбиту с вероятностью  $r_2$ , таким образом  $r_0 + r_1 + r_2 = 1$ . На

орбите заявки ожидают повторного обслуживания в течение времени, распределенного по экспоненциальному закону с параметром  $\sigma$ , после чего повторяют попытку занять прибор. В случае неудачной попытки заявки остаются на орбите.

Обозначим  $i(t)$  – число заявок на орбите в момент времени  $t$ . Процесс  $n(t)$  определяет состояние прибора:  $n(t) = 0$ , если прибор свободен,  $n(t) = 1$ , если прибор занят. Требуется найти стационарное распределение числа заявок на орбите с учетом состояния прибора.

### Уравнения Колмогорова с использованием истекшего времени обслуживания

Случайный процесс  $\{i(t)\}$ , а также процесс  $\{i(t), n(t)\}$  не являются марковскими, поэтому введем дополнительную переменную  $y(t)$ . Процесс  $y(t)$  представляет собой истекшее время обслуживания, т.е. длину интервала времени от момента начала обслуживания заявки до момента  $t$ . Если прибор свободен, то процесс  $y(t)$  не определяется. Тогда марковским является случайный процесс с переменным числом компонент  $\{i(t), n(t), y(t)\}$ . Этот процесс состоит из двух компонент  $i(t), n(t)$ , если прибор свободен, и из трех компонент  $i(t), n(t), y(t)$ , если прибор занят.

Обозначим вероятности числа заявок на орбите в момент времени  $t$

$$P_0(i, t) = P\{i(t) = i, n(t) = 0\},$$

$$P_1(i, y, t) = \partial P\{i(t) = i, n(t) = 1, y(t) < y\} / \partial y.$$

Рассмотрим интенсивность обслуживания  $\mu(y) = B'(y) / [1 - B(y)]$ , тогда

$$\mu(y)\Delta t = \frac{B'(y)\Delta t}{1 - B(y)} = \frac{B(y + \Delta t) - B(y)}{1 - B(y)} = P\{y < \tau < y + \Delta t / \tau > y\}$$

– условная вероятность того, что время обслуживания  $\tau$  закончится за  $y + \Delta t$  при условии, что оно продолжается дольше  $y$ .

Запишем вероятности в момент времени  $t + \Delta t$ :

$$P_0(i, t + \Delta t) = \int_0^{\infty} r_0 \mu(y) \Delta t P_1(i, y, t) dy + \int_0^{\infty} r_2 \mu(y) \Delta t P_1(i - 1, y, t) dy + \\ + (1 - \lambda \Delta t)(1 - i \sigma \Delta t) P_0(i, t) + o(\Delta t);$$

$$P_1(i, y + \Delta t, t + \Delta t) = (1 - \lambda \Delta t)(1 - \mu(y) \Delta t) P_1(i, y, t) + \\ + \sum_{v=1}^i \lambda q_v \Delta t P_1(i - v, y, t) + o(\Delta t).$$

Если истекшее время мало, то

$$\int_0^{\Delta t} P_1(i, x, t + \Delta t) dx = \int_0^{\infty} r_1 \mu(y) \Delta t P_1(i, y, t) dy + \sum_{v=1}^{i+1} \lambda q_v \Delta t P_0(i - v + 1, t) + \\ + (i + 1) \sigma \Delta t P_0(i + 1, t) + o(\Delta t).$$

После преобразований получим систему уравнений Колмогорова

$$\frac{\partial P_0(i, t)}{\partial t} = -(\lambda + i \sigma) P_0(i, t) + \int_0^{\infty} r_0 \mu(y) P_1(i, y, t) dy + \int_0^{\infty} r_2 \mu(y) P_1(i - 1, y, t) dy; \\ \frac{\partial P_1(i, y, t)}{\partial t} + \frac{\partial P_1(i, y, t)}{\partial y} = -(\lambda + \mu(y)) P_1(i, y, t) + \sum_{v=1}^i \lambda q_v P_1(i - v, y, t)$$

с краевым условием

$$P_1(i, 0, t) = (i + 1) \sigma P_0(i + 1, t) + \int_0^{\infty} r_1 \mu(y) P_1(i, y, t) dy + \sum_{v=1}^{i+1} \lambda q_v P_0(i - v + 1, t).$$

Перепишем систему с краевым условием для стационарного режима

$$-(\lambda + i \sigma) P_0(i) + \int_0^{\infty} \mu(y) [r_0 P_1(i, y) + r_2 P_1(i - 1, y)] dy = 0; \quad (1) \\ \frac{\partial P_1(i, y)}{\partial y} + [\lambda + \mu(y)] P_1(i, y) - \sum_{v=1}^i \lambda q_v P_1(i - v, y) = 0;$$

$$P_1(i, 0) = (i + 1) \sigma P_0(i + 1) + \int_0^{\infty} r_1 \mu(y) P_1(i, y) dy + \sum_{v=1}^{i+1} \lambda q_v P_0(i - v + 1). \quad (2)$$

Введем частичные характеристические функции числа заявок на орбите  $H_0(u) = \sum_{i=0}^{\infty} e^{ju} P_0(i)$ ,  $H_1(u, y) = \sum_{i=0}^{\infty} e^{ju} P_1(i, y)$  и характери-

ческую функцию числа заявок в группе  $Q(u) = \sum_{v=1}^{\infty} e^{juv} q_v$ , где  $j = \sqrt{-1}$ . Преобразуя (1) и (2), получим систему уравнений для функций  $H_0(u)$  и  $H_1(u, y)$

$$-\lambda H_0(u) + j\sigma \frac{\partial H_0(u)}{\partial u} + (r_0 + r_2 e^{ju}) \int_0^{\infty} \mu(y) H_1(u, y) dy = 0; \quad (3)$$

$$\frac{\partial H_1(u, y)}{\partial y} - [\lambda Q(u) - \lambda - \mu(y)] H_1(u, y) = 0$$

с краевым условием

$$H_1(u, 0) = -j\sigma e^{-ju} \frac{\partial H_0(u)}{\partial u} + \int_0^{\infty} r_1 \mu(y) H_1(u, y) dy + \lambda e^{-ju} Q(u) H_0(u). \quad (4)$$

Полная характеристическая функция числа заявок на орбите имеет вид  $H(u) = H_0(u) + H_1(u)$ , где  $H_1(u) = \int_0^{\infty} H_1(u, y) dy$ .

Систему (3) с условием (4) можно решить аналитически. Для этого найдем  $H_1(u, y)$  из второго уравнения системы

$$H_1(u, y) = H_1(u, 0) \cdot (1 - B(y)) e^{\lambda(Q(u)-1)y} \quad (5)$$

и перепишем (4) в виде

$$h(u) = \lambda e^{-ju} Q(u) H_0(u) - j\sigma e^{-ju} H_0'(u) + r_1 h(u) \int_0^{\infty} e^{\lambda(Q(u)-1)y} B'(y) dy, \quad (6)$$

где  $h(u) = H_1(u, 0)$ .

Обозначим  $B^*(u) = \int_0^{\infty} e^{\lambda(Q(u)-1)y} dB(y)$  – преобразование Лапласа – Стилтгеса распределения  $B(x)$ , тогда из (6)

$$h(u) = \lambda \frac{e^{-ju}}{1 - r_1 B^*(u)} Q(u) H_0(u) - j\sigma \frac{e^{-ju}}{1 - r_1 B^*(u)} H_0'(u). \quad (7)$$

Подставим (5) в первое уравнение (3), получим уравнение

$$-\lambda H_0(u) + j\sigma H_0'(u) + (r_0 + r_2 e^{ju}) h(u) B^*(u) = 0,$$

которое с учетом (7) перепишем в виде

$$j\sigma \left[ 1 - \frac{(r_0 e^{-ju} + r_2) B^*(u)}{1 - r_1 B^*(u)} \right] H_0'(u) = \lambda \left[ 1 - \frac{(r_0 e^{-ju} + r_2) B^*(u)}{1 - r_1 B^*(u)} \right] Q(u) H_0(u).$$

Решением этого уравнения является функция

$$H_0(u) = R \cdot \exp \left\{ -\frac{\lambda j}{\sigma} \cdot \int_0^u \frac{1-F(x)Q(x)}{1-F(x)} dx \right\},$$

где  $F(x) = (r_0 e^{-jx} + r_2) B^*(x) / (1 - r_1 B^*(x))$ , а константу интегрирования  $R$  найдем из условия нормировки  $H(0) = 1$ .

Окончательно, получим

$$H(u) = R \cdot \exp \left\{ -\frac{\lambda j}{\sigma} \cdot \int_0^u \frac{1-F(x)Q(x)}{1-F(x)} dx \right\} \times \\ \times \left[ 1 - \frac{\lambda e^{-ju}}{1-r_1 B^*(u)} \cdot \frac{1-Q(u)}{1-F(u)} \int_0^\infty (1-B(y)) e^{\lambda(Q(u)-1)y} dy \right].$$

Для нахождения распределения вероятностей  $P(i)$  числа заявок  $i$  на орбите применим обратное преобразование Фурье

$$P(i) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{-jui} H(u) du.$$

### Заключение

Исследована система массового обслуживания с обратной связью, рекуррентным обслуживанием и неординарным входящим потоком. Для марковизации случайного процесса числа заявок на орбите введена дополнительная переменная – истекшее время обслуживания. Решение уравнений Колмогорова позволило получить аналитическое выражение для характеристической функции, а также стационарное распределение вероятностей числа заявок на орбите.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Кудрявцева Е.Н., Росляков А.В. Применение теории сетевого исчисления к исследованию систем массового обслуживания с обратной связью // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2015. № 1. С. 17–21.
2. Назаров А.А., Рожкова С.В., Титаренко Е.Ю. Исследование М/М/1 системы с повторными вызовами, обратной связью и неординарным пуассоновским входящим потоком // Математика, ее приложения и математическое образование (МПМО'20): материалы VII Междунар. конф. Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2020. С. 160–162.
3. Моисеева Е.А. Исследование RQ-системы M|GI|1 в допредельной ситуации // Математическое и программное обеспечение информационных, технических и экономических систем: материалы II Всероссийской молодежной научной конф. Сер. «Труды ТГУ. Серия физико-математическая». 2013. С. 116–121.

# СОДЕРЖАНИЕ

## ТЕОРИЯ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

### QUEUING THEORY AND APPLICATION

<i>Yves Adou, Ekaterina Markova.</i> To queueing system model performance measures analysis under network slicing.....	5
<i>Kirill Ageev, Eduard Sopin.</i> Analysis of the simplified network slicing model .....	11
<i>Anilkumar M.P., K.P. Jose.</i> An eigen value approach to a discrete-time queueing model with $N$ -policy on two modes of service.....	17
<i>P. Beena, K.P. Jose.</i> A MAP/PH(1), PH(2)/2 inventory system with production, multiple servers and vacations.....	24
<i>Anastasia Daraseliya, Eduard Sopin.</i> Optimization of task offloading thresholds in the fog computing system .....	31
<i>Dhanya Babu, Varghese. C. Joshua, Achyutha Krishnamoorthy.</i> A queueing system with probabilistic joining strategy for priority customers .....	37
<i>Elmira Kalimulina.</i> On convergence of queueing network with changing structure to stationary distribution.....	43
<i>Maksim Korshikov, Eduard Sopin.</i> Analysis of the processor sharing systems with random serving rate coefficients .....	46
<i>Achyutha Krishnamoorthy, Varghese C. Joshua, Ambily P. Mathew.</i> A reliability problem with Interdependent Lifetimes .....	52
<i>Eugene Lebedev, Vadim Ponomarov, Oksana Pryshchepa.</i> The exact formulas for state-dependent Markov retrial queues .....	58
<i>Eugene Lebedev, Hanna Livinska.</i> Gaussian approximation and reducing of dimension for a general-type multichannel network .....	64
<i>Khamis Abdullah Khamis AL Maqballi, Varghese C. Joshua, Achyutha Krishnamoorthy.</i> On A single server queueing inventory system with common life time for inventoried items .....	70
<i>Agassi Melikov<sup>1</sup>, V. Divya, Sevinc Aliyeva.</i> Analyses of feedback queue with positive server setup time and impatient calls.....	77
<i>Faina Moskaleva, Ekaterina Lisovskaya, Yuliya Gaidamaka.</i> A two-class service system for performance analysis of network slicing with QoS Isolation .....	82



<i>Anatoly Nazarov, Tuan Phung-Duc, Yana Izmailova. Asymptotic-diffusion analysis of multiserver retrial queueing system with priority customers.....</i>	88
<i>Anatoly Nazarov, Tuan Phung-Duc, Svetlana Paul, Olga Lizyura, Ksenia Shulgina. Asymptotic analysis of Markovian retrial queue with unreliable server and two-way communication under low rate of retrials condition .....</i>	99
<i>Anatoly Nazarov, Maria Samorodova. Asymptotic waiting time analysis of a M/M/1 retrial queueing system .....</i>	105
<i>Hamza Nemouchi, Mohamed Hedi Zaghouni, János Sztrik. Simulation analysis in cognitive radio networks with unreliability and abandonment.....</i>	110
<i>Nisha Mathew, Varghese Joshua, Achyutha Krishnamoorthy. On a MMAP/(PH,PH)/1/(<math>\infty</math>,N) queueing-inventory system.....</i>	115
<i>K.R. Ranjith, Achyutha Krishnamoorthy, B. Gopakumar. Analysis of a PH/PH/1 queue with interdependence.....</i>	122
<i>Stepan Rogozin, Evsey Morozov. Stability condition of a modified Erlang loss system with different service rates .....</i>	126
<i>Sandhya E., C. Sreenivasan, Sajeev S. Nair. An explicit solution for an inventory model with positive lead time and backlogs.....</i>	131
<i>Smija Skaria, Sajeev S. Nair. Transient analysis of an inventory model with instantaneous replenishment and catastrophes .....</i>	138
<i>János Sztrik, Ádám Tóth, Elena Danilyuk, Svetlana Moiseeva. Simulation of retrial queueing system M/G/1 with impatient customers, collisions and unreliable server .....</i>	145
<i>János Sztrik, Ádám Tóth. Some special features of finite-source retrial queues with collisions, an unreliable server and impatient customers in the orbit .....</i>	152
<i>Алексей Благинин, Иван Лапатин, Анатолий Назаров. Исследование двумерного выходящего потока марковской модели узла обработки запросов с повторными обращениями и вызываемыми заявками .....</i>	159
<i>Анна Бояркина, Светлана Моисеева, Ирина Туренова, Алексей Шкуркин. СМО вида <math>GI^{(k)}/GI/\infty</math> с групповым обслуживанием.....</i>	166
<i>Татьяна Бушкова, Анастасия Галилейская Екатерина Лисовская, Светлана Моисеева. Асимптотический анализ ресурсной гетерогенной СМО <math>(MMPP+2M)^{(v)}/M/\infty</math> .....</i>	172
<i>Константин Вытовтов, Елизавета Барабанова, Владимир Вишневецкий. Аналитический метод анализа случайных процессов с</i>	

непрерывным временем и дискретными состояниями при времязависимых вероятностях переходов.....	178
<i>Максим Жарков, Михаил Пavidис.</i> Об использовании четырех- фазных систем массового обслуживания для описания работы грузовых и сортировочных железнодорожных станций.....	184
<i>Владимир Задорожный, Татьяна Захаренкова.</i> Метод бесконеч- ных разметок в системах с неизвестным временем обслужива- ния поступающих заявок .....	188
<i>Владимир Задорожный, Микеле Пагано, Татьяна Захаренкова.</i> Применение метода бесконечных разметок к сетям с коммута- цией пакетов.....	194
<i>Андрей Зорин, Ксения Сизова.</i> Метод решения стационарных уравнений для процесса приоритетного обслуживания с раз- делением времени в случайной среде.....	200
<i>Валентина Клименок, Александр Дудин, Иван Ванькович.</i> Стацио- нарные характеристики системы массового обслуживания с повторными вызовами и поиском на орбите .....	205
<i>Дмитрий Копать, Михаил Матальцкий.</i> Анализ ожидаемого до- хода в открытой сети с ограниченным числом заявок и обхо- дами ими систем обслуживания.....	211
<i>Анатолий Назаров, Екатерина Павлова.</i> Исследование СМО вида ММРР М N с обратной связью методом асимптотически диф- фузионного анализа.....	217
<i>Анатолий Назаров, Светлана Рожкова, Екатерина Титаренко.</i> Исследование системы с обратной связью, рекуррентным об- служиванием и неординарным пуассоновским входящим по- током.....	223
<i>Анна Полховская, Ольга Бобкова, Светлана Моисеева.</i> Ресурсная RQ-система с коллизиями.....	228
<i>Павел Приступа, Павел Михеев, Сергей Суценко.</i> Прямая кор- рекция ошибок на внутрисегментном уровне транспортного протокола.....	232
<i>Екатерина Пройдакова, Виктория Санникова.</i> Математическое моделирование и исследование приоритетной управляющей системы с непостоянной интенсивностью обслуживания тре- бований .....	238
<i>Светлана Рожкова, Наталья Воронина, Александра Семашко.</i> Исследование RQ-системы M/M/1 с ненадежным прибором асимптотическим и матричным методами .....	244

<i>Елена Станкевич, Игорь Тананко.</i> Метод анализа замкнутых сетей массового обслуживания с системами типа $M_a/M^{[x,y]}/1$ .....	251
<i>Елена Станкевич, Игорь Тананко.</i> Приближенный метод анализа замкнутых сетей массового обслуживания с ненадежными системами и групповым обслуживанием.....	255
<i>Гурами Цициашвили, Анатолий Назаров, Александр Мусеев.</i> Асимптотическая оценка интенсивности сборки пуассоновских потоков .....	258

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

### INFORMATION TECHNOLOGIES AND SOFTWARE ENGINEERING

<i>Marat Gainutdinov, Aleksey Shkurkin, Anastasia Pichugina.</i> Development of back-end of the service for internationalization of web-applications.....	265
<i>Алексей Бабанов, Елена Квач.</i> «IS-A»-отношение, как способ представления взаимосвязи обобщенных и специализированных понятий.....	271
<i>Людмила Демиденко.</i> Проектирование базовой архитектуры модуля «Расписание» системы Alterum Med.....	278
<i>Игорь Жуков, Юрий Костюк.</i> Программная реализация заданий по программированию с многовариантными решениями.....	285
<i>Денис Змеев, Лидия Иванова, Руфина Рафикова.</i> О представлении прогресса проекта по разработке программного обеспечения в форме динамической байесовской сети .....	291
<i>Олег Змеев, Юлия Протасевич, Данила Соколов.</i> Поддержка настраиваемых типов проектов в системе автоматизации управления Git-репозиториями для использования в процессе обучения.....	298
<i>Татьяна Кетова, Евгения Соколова.</i> Формальная модель образовательной программы в области компьютерных наук с точки зрения международного стандарта АСМ и IEEE .....	303
<i>Яна Куликова, Дмитрий Качалов, Маис Паша Оглы Фархадов.</i> Сценарии управления беспилотными транспортными средствами в среде «Умного города».....	308
<i>Яна Лебедева, Вячеслав Вавилов.</i> Разработка системы автоматизации процессов обращения кассовой техники в банковской организации .....	314

<i>Евгений Полин, Александр Моисеев, Константин Войтиков.</i> Имитационное моделирование СМО с входящими потоками, параметры которых зависят от состояния системы.....	320
<i>Вадим Тренькаев.</i> Обзор исследований по проблеме достижения высокой производительности протокола OPC UA.....	324

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

### MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELLING OF TECHNOLOGICAL PROCESSES

<i>Mary Michel Begre, Warren Kassy Dougg Feussi, Shakhmurad Kanzitdinov, Sergey Vasilyev.</i> Stability analysis and motion of the Kapitsa pendulum.....	330
<i>Mohamed Adel Bouatta, Irina Kolosova, Evgeniya Korshok, Darya Vasilyeva.</i> Kadshevsky equation numerical analysis with periodic boundary conditions on adaptive grids.....	336
<i>Jozil Takhirov.</i> A reaction-diffusion-advection competition model with a free boundary.....	339
<i>Sergey Pichugin.</i> Problem definition for LEO system switching technique development.....	345
<i>Анжела Абдразакова, Татьяна Булгакова, Антон Войтишек.</i> Об особенностях выбора ортонормированных систем функций в рандомизированных численных проекционных функциональ- ных алгоритмах.....	350
<i>Даниэль Перес Акоста, Сергей Васильев, Шахмурад Канзитди- нов, Игорь Левичев.</i> Построение решений задач оптимального управления динамическими системами в бесконечномерных пространствах с малым параметром.....	356
<i>Антон Войтишек, Ярослав Поставалов, Данил Черкашин.</i> Систе- ма численного моделирования одномерных случайных вели- чин NMPUD: формирование банка плотностей, автоматизация математических выкладок и приложения.....	363
<i>Мохамед Адель Буатта, Сергей Васильев, Вячеслав Федорченко.</i> Численный анализ на адаптивных сетках многомерного урав- нения Фоккера – Планка с малым параметром.....	369
<i>Никита Беляков, Рустам Бикмурзин, Дмитрий Федченко.</i> Об ис- пользовании конечных автоматов при моделировании наност- руктур.....	373

<i>Ирина Гендрина.</i> Использование метода фиктивных переменных для исследования пространственной характеристики систем видения через атмосферу.....	377
<i>Антон Есин.</i> Исследование принципов применения моделей многозначной логики в современных приложениях .....	383
<i>Антон Есин.</i> Теоретические аспекты построения современных систем управления на базе многозначной логики.....	389
<i>Вячеслав Кувыкин, Максим Брюханов.</i> Математическое и компьютерное моделирование системы согласования материального баланса в нефтепереработке и нефтехимии.....	394
<i>Вячеслав Кувыкин, Артем Колпаков, Елена Колпакова.</i> Параметрический анализ математических моделей оптимального планирования нефтепереработки и компьютерное моделирование.....	398
<i>Ольга Кузоватова.</i> Компьютерное моделирование локализации деформации сыпучей среды в сходящемся канале .....	403
<i>Мария Шкленник, Александр Мусеев.</i> Реализация механизма сбора и обработки статистических данных потоков заявок в системе имитационного моделирования ODIS.....	409

## **ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ**

### **INTELLIGENT DATA ANALYSIS AND VISUALIZATION**

<i>Alyona Borisovskaya.</i> Methods of spelling correction in information retrieval systems.....	414
<i>Ivan Brokarev, Mais Farkhadov, Sergey Vaskovskii.</i> Recurrent neural networks to analyze the quality of natural gas .....	419
<i>Ivan Brokarev, Sergey Vaskovskii.</i> Analysis of reliability of gas analysis system based on vector Wiener process .....	423
<i>Victoria Shamraeva.</i> Analysis of business processes of construction and operation of highways on a toll basis using BIM tools.....	429
<i>Ирина Баранова.</i> Применение метода двудольных множеств событий в задачах регрессионного анализа многомерных разнотипных данных .....	441
<i>Инна Батраева, Александра Крючкова.</i> Алгоритм репрезентации кастомизированных диалектологических корпусов для Саратовского диалектологического корпуса русского языка .....	447
<i>Светлана Гагарина, Юрий Гагарин.</i> Прогнозирование частных показателей индекса активного долголетия .....	450

<i>Степан Гилин. Решение задачи распознавания образов при помощи алгоритма гибридной СММ-нейросети .....</i>	<i>454</i>
<i>Валерий Гольшев, Дарья Семенова. Нечёткий анализ формальных понятий: метод <math>\alpha</math>-сечения.....</i>	<i>462</i>
<i>Эллада Ибрагимова, Дарья Семенова. Распознавание <math>k</math>-кластеризуемости знаковых графов.....</i>	<i>468</i>
<i>Анна Ивлева, Сергей Смирнов. Первичный концептуальный анализ сестринского дела для экспертной советующей системы.....</i>	<i>473</i>
<i>Александр Солдатенко, Дарья Семенова. Алгоритм HGFC нахождения формальных понятий.....</i>	<i>478</i>
<b>СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ .....</b>	<b>483</b>

*Научное издание*

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
(ИТММ-2020)**

**МАТЕРИАЛЫ  
XIX Международной конференции  
имени А. Ф. Терпугова  
2–5 декабря 2020 г.**

Редактор *Т.С. Портнова*  
Дизайн, верстка *Д.В. Фортеса*

**ООО «Издательство научно-технической литературы»**  
634034, г. Томск, ул. Студенческая, 4, тел. (3822) 53-10-35

---

Изд. лиц. ИД № 04000 от 12.02.2001. Подписано к печати 24.02.2021.  
Формат 60 × 84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Усл. п. л. 28.95. Уч.-изд. л. 32.42. Тираж 100 экз. Заказ № 4.

---