



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 СМО вида ММРР|М|N с обратной связью методом асимптотически диффузионного анализа

Анатолий Назаров, Екатерина Павлова

*Национальный исследовательский
Томский государственный университет, г. Томск, Россия*

Представлены результаты исследования СМО с N обслуживающими приборами, с обратной связью и орбитой. Заявки могут поступать на орбиту в неограниченном количестве. Входящий поток является марковским модулированным пуассоновским (ММРР). Методом асимптотически диффузионного анализа находятся распределения вероятностей числа занятых приборов в системе и числа заявок на орбите.

Введение

Под обратной связью понимают повторное обращение заявки к обслуживающему прибору. Самым простым примером систем с обратной связью являются сети коммуникации, в ходе использования которых повреждение данных приводит к повторному отправлению данных адресату.

В [1] представлены результаты исследований СМО с мгновенной обратной связью, а в [2] изучены СМО с отсроченной обратной связью. Также ряд работ [3–5] посвящен исследованию систем с двумя типами обратной связи.

Математическая модель и постановка задачи

Рассмотрим систему массового обслуживания с N обслуживающими устройствами и обратной связью. На вход системы поступает ММРР-поток заявок, заданный диагональной матрицей условных интенсивностей $\Lambda = [\lambda_k]$, $k = 1, 2, \dots, K$, матрицей инфинитезимальных характеристик $Q = [q_{ij}]$, $i, j = 1, 2, \dots, N$, управляющей потоком цепи Маркова $k(t) = 1, 2, \dots, K$.

Заявка, поступая в систему, занимает один из свободных приборов и обслуживается в течение случайного времени, распределенного экспоненциально с параметром μ . Если, при поступлении в систему, заявка обнаружит все приборы занятыми, она мгновенно отправляется на ор-

биту, где осуществляет задержку в течение случайного времени, экспоненциально распределенного с параметром σ .

В момент завершения обслуживания заявка может покинуть систему с вероятностью r_0 ; осуществляя мгновенную обратную связь, отправиться на повторное обслуживание с вероятностью r_1 ; осуществляя отсроченную обратную связь, отправиться на орбиту с вероятностью r_2 .

Обозначим $k(t) = k$ – состояние цепи Маркова, управляющей ММРР-поток в момент времени t , $k = 1, 2, \dots, K$, $n(t)$ – число занятых приборов в системе в момент времени t , $n = 0, 1, \dots, N$, $i(t)$ – число заявок на орбите в момент времени t .

Ставится задача получения трехмерного стационарного распределения вероятностей $P(k, n, i) = P\{k(t) = k, n(t) = n, i(t) = i\}$.

Система уравнений Колмогорова

Рассмотрим марковский процесс $\{k(t), n(t), i(t)\}$, для его нестационарного распределения вероятностей $P\{k(t) = k, n(t) = n, i(t) = i\} = P(k, n, i, t)$ запишем систему дифференциальных уравнений Колмогорова

$$\begin{aligned} \frac{\partial P(k, n, i, t)}{\partial t} = & -(\lambda_k + (1 - r_1)n\mu + i\sigma)P(k, n, i, t) + \lambda_k P(k, n - 1, i, t) + \\ & + (i + 1)\sigma P(k, n - 1, i + 1, t) + (n + 1)r_0\mu P(k, n + 1, i, t) + \\ & + (n + 1)r_2\mu P(k, n + 1, i - 1, t) + \sum_v q_{vk} P(v, n, i, t), 0 \leq n \leq N - 1, \\ \frac{\partial P(k, N, i, t)}{\partial t} = & -(\lambda_k + (1 - r_1)N\mu)P(k, N, i, t) + \lambda_k P(k, N - 1, i, t) + \\ & + \lambda_k P(k, N, i - 1, t) + (i + 1)\sigma P(k, N - 1, i + 1, t) + \sum_v q_{vN} P(v, N, i, t). \end{aligned} \quad (1)$$

Введем частичные характеристические функции вида

$$H(k, n, u, t) = \sum_{i=0}^{\infty} e^{jui} P(k, n, i, t),$$

где $j = \sqrt{-1}$ мнимая единица. Тогда можем записать систему (1) для характеристических функций

$$\begin{aligned}
\frac{\partial H(k, n, u, t)}{\partial t} &= -(\lambda - k + n\mu(1 - r_1))H(k, n, u, t) + \lambda_k H(k, n - 1, u, t) + \\
&+ j\sigma \frac{\partial H(k, n, u, t)}{\partial u} + (n + 1)\mu(r_0 + r_2 e^{ju})H(k, n + 1, u, t) - \\
&- j\sigma e^{-ju} \frac{\partial H(k, n - 1, u, t)}{\partial u} + \sum_v q_{vk} H(v, n, u, t), 0 \leq n \leq N - 1, \\
\frac{\partial H(k, N, u, t)}{\partial t} &= (\lambda_k (e^{ju} - 1) - N\mu(1 - r_1))H(k, N, u, t) + \\
&+ \lambda_k H(k, N - 1, u, t) - j\sigma e^{-ju} \frac{\partial H(k, N - 1, u, t)}{\partial u} + \sum_v q_{vk} H(v, N, u, t). \quad (2)
\end{aligned}$$

Обозначим вектор-строки

$$\mathbf{H}(n, u, t) = \{H(1, n, u, t), \dots, H(K, n, u, t)\},$$

$$\mathbf{H}(u, t) = \{\mathbf{H}(0, u, t), \mathbf{H}(1, u, t), \dots, \mathbf{H}(N, u, t)\}$$

и перепишем (2) в матричном виде с учетом введенных обозначений

$$\frac{\partial \mathbf{H}(u, t)}{\partial t} = \mathbf{H}(u, t)(\mathbf{A} + e^{ju}\mathbf{B}) + j\sigma \frac{\partial \mathbf{H}(u, t)}{\partial u} (\mathbf{I}_0 - e^{-ju}\mathbf{I}_1).$$

Здесь \mathbf{I} – единичная матрица размерности $K \times K$,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q} - \mathbf{\Lambda} & \mathbf{\Lambda} & 0 & \dots & 0 \\ \mu r_0 \mathbf{I} & \mathbf{Q} - \mathbf{\Lambda} - \mu \mathbf{I}(r_0 + r_2) & \mathbf{\Lambda} & \dots & 0 \\ 0 & 2\mu \mathbf{I} r_0 & \mathbf{Q} - \mathbf{\Lambda} - 2\mu \mathbf{I}(r_0 + r_2) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \mathbf{Q} - \mathbf{\Lambda} - N\mu \mathbf{I}(r_0 + r_2) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \mu \mathbf{I} r_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 2\mu \mathbf{I} r_2 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & N\mu \mathbf{I} r_2 & \mathbf{\Lambda} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{I}_0 = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{I} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \mathbf{I} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{I}_1 = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{I} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{I} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \mathbf{I} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Домножая матричное уравнение на единичный вектор-столбец \mathbf{e} , принимая во внимание $(\mathbf{A} + \mathbf{B})\mathbf{e} = 0$ и $(\mathbf{I}_0 - \mathbf{I}_1)\mathbf{e} = 0$, получим скалярное уравнение и запишем систему

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{H}(u, t)}{\partial t} &= \mathbf{H}(u, t)(\mathbf{A} + e^{ju}\mathbf{B}) + j\sigma \frac{\partial \mathbf{H}(u, t)}{\partial u}(\mathbf{I}_0 - e^{-ju}\mathbf{I}_1), \\ \frac{\partial \mathbf{H}(u, t)}{\partial t} \mathbf{e} &= [\mathbf{H}(u, t)\mathbf{B}\mathbf{e} + j\sigma e^{-ju} \frac{\partial \mathbf{H}(u, t)}{\partial u} \mathbf{I}_0 \mathbf{e}] (e^{ju} - 1). \end{aligned} \quad (3)$$

Будем искать решение задачи (3) методом асимптотически диффузионного анализа в условии большой задержки заявки на орбите, то есть $\sigma \rightarrow 0$.

Асимптотически диффузионный анализ

Обозначим $\sigma = \varepsilon$ и выполним следующие замены в (3):

$$u = \varepsilon w, \tau = t\varepsilon, \mathbf{H}(u, t) = \mathbf{F}(w, \tau, \varepsilon).$$

С учетом замен перепишем (3)

$$\begin{aligned} \varepsilon \frac{\partial \mathbf{F}(w, \tau, \varepsilon)}{\partial \tau} &= \mathbf{F}(w, \tau, \varepsilon)(\mathbf{A} + e^{j\varepsilon w}\mathbf{B}) + j \frac{\partial \mathbf{F}(w, \tau, \varepsilon)}{\partial w}(\mathbf{I}_0 - e^{-j\varepsilon w}\mathbf{I}_1), \\ \varepsilon \frac{\partial \mathbf{F}(w, \tau, \varepsilon)}{\partial \tau} \mathbf{e} &= [\mathbf{F}(w, \tau, \varepsilon)\mathbf{B}\mathbf{e} + j e^{-j\varepsilon w} \frac{\partial \mathbf{F}(w, \tau, \varepsilon)}{\partial w} \mathbf{I}_0 \mathbf{e}] (e^{j\varepsilon w} - 1). \end{aligned}$$

Теорема 1. В системе массового обслуживания с обратной связью в предельном условии $\sigma \rightarrow 0$ предельная характеристическая функция нормированного числа $i(t)$ заявок на орбите имеет вид

$$\lim_{\sigma \rightarrow 0} M \{e^{jw\sigma i(t)}\} = e^{jw\chi(\tau)},$$

где функция $\chi(\tau)$ является решением дифференциального уравнения $\chi'(\tau) = a(\chi)$, а функция $a(\chi)$ определяется равенством

$$a(x) = \mathbf{R}(\mathbf{B} - x(\tau)\mathbf{I}_0)\mathbf{e}. \quad (4)$$

Здесь вектор-строка $\mathbf{R} = \{R(0), R(1), \dots, R(N)\}$ является решением системы

$$\mathbf{R}\{(\mathbf{A} + \mathbf{B}) - x(\tau)(\mathbf{I}_0 - \mathbf{I}_1)\} = 0,$$

$$\mathbf{R}\mathbf{e} = 1.$$

Теорема 2. Предельная плотность распределения вероятностей нормированного числа заявок на орбите в рассматриваемой системе с обратной связью имеет вид

$$\pi(z) = \frac{C}{b(z)} \exp\left\{\frac{2}{\sigma} \int_0^z \frac{a(x)}{b(x)} dx\right\}, \quad (5)$$

где C – нормирующая константа, функция $a(x)$ определяется выражением (4), а $b(x)$ – равенством

$$b(x) = a(x) + 2\mathbf{g}[\mathbf{B} - x\mathbf{I}_0]\mathbf{e} + 2\mathbf{R}x\mathbf{I}_0\mathbf{e}, \quad (6)$$

а вектор \mathbf{g} является решением системы уравнений

$$\mathbf{g}(\mathbf{A} + \mathbf{B} + x(\mathbf{I}_1 - \mathbf{I}_0)) = a(x)\mathbf{R} + \mathbf{R}(x\mathbf{I}_1 - \mathbf{B}),$$

$$\mathbf{g}\mathbf{e} = 0.$$

Рассмотрим выражение (5), подставляя в него набор аргументов $k\sigma$, где $k = 0, 1, 2, \dots$, получим набор чисел

$$\pi(k\sigma) = \frac{C}{b(k\sigma)} \exp\left\{\frac{2}{\sigma} \int_0^{k\sigma} \frac{a(x)}{b(x)} dx\right\},$$

к которому применим условие нормировки, получим дискретное распределение вероятностей

$$P(k) = \frac{\pi(k\sigma)}{\sum_{k=0}^{\infty} \pi(k\sigma)}.$$

Таким образом, получена аппроксимация $P(k)$ дискретного распределения числа заявок на орбите в рассматриваемой системе с обратной связью.

Заклучение

При предельном условии большой задержки ($\sigma \rightarrow 0$) заявок на орбите для СМО вида $MPP|M|N$ с обратной связью получены асимптотические распределения вероятностей числа занятых приборов в системе и нормированного числа заявок на орбите.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Takacs L.* A single-server queue with feedback // *Bell System Technical Journal*. 1963. V. 42. P. 505–519.
2. *Lee H.W., Seo D.W.* Design of a production system with feedback buffer // *Queueing Systems*. 1997. V. 26. Iss. 1. P. 187–198.
3. *Melikov A.Z., Ponomarenko L.A., Rustamov A.M.* Methods for analysis of queuing models with instantaneous and delayed feedbacks // *Communications in Computer and Information Sciences*. 2015. V. 564. P. 185–199.
4. *Koroliuk V.S., Melikov A.Z., Ponomarenko L.A., Rustamov A.M.* Methods for analysis of multi-channel queuing models with instantaneous and delayed feedbacks // *Cybernetics and System Analysis*. 2016. V. 52. Issue 1. P. 58–70.
5. *Melikov A.Z., Ponomarenko L.A., Rustamov A.M.* Hierarchical space merging algorithm to analysis of open tandem queuing networks // *Cybernetics and System Analysis*. 2016. V. 52. Iss. 6. P. 867–877.

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 Maqbali, Varghese C. Joshua, Achyutha Krishnamoorthy.</i> On A single server queueing inventory system with common life time for inventoried items | 70 |
| <i>Agassi Melikov¹, 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/(∞,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 $GI^{(k)}/GI/\infty$ с групповым обслуживанием.....</i> | 166 |
| <i>Татьяна Бушкова, Анастасия Галилейская Екатерина Лисовская, Светлана Моисеева. Асимптотический анализ ресурсной гетерогенной СМО $(MMPP+2M)^{(v)}/M/\infty$</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 Аюста, 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> | 454 |
| <i>Валерий Гольшев, Дарья Семенова. Нечёткий анализ формальных понятий: метод α-сечения.....</i> | 462 |
| <i>Эллада Ибрагимова, Дарья Семенова. Распознавание k-кластеризуемости знаковых графов.....</i> | 468 |
| <i>Анна Ивлева, Сергей Смирнов. Первичный концептуальный анализ сестринского дела для экспертной советующей системы.....</i> | 473 |
| <i>Александр Солдатенко, Дарья Семенова. Алгоритм HGFC нахождения формальных понятий.....</i> | 478 |
| СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ | 483 |

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 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура «Таймс».
Усл. п. л. 28.95. Уч.-изд. л. 32.42. Тираж 100 экз. Заказ № 4.
