

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Информатика. Телекоммуникации.
Управление

3(247) 2016

Издательство Политехнического университета
Санкт-Петербург
2016

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНФОРМАТИКА. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ. УПРАВЛЕНИЕ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

Председатель

Юсупов Р.М., чл.-кор. РАН;

Редакционный совет:

Абрамов С.М., чл.-кор. РАН;

Арсеньев Д.Г., д-р техн. наук, профессор;

Воеводин В.В., чл.-кор. РАН;

Заборовский В.С., д-р техн. наук, профессор;

Козлов В.Н., д-р техн. наук, профессор;

Фотиади А.Э., д-р физ.-мат. наук, профессор;

Черноруцкий И.Г., д-р техн. наук, профессор.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

Главный редактор

Коротков А.С., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

Редакционная коллегия:

Бабкин А.В., д-р экон. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

Ицыксон В.М., канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

Prof. Dr. Philippe Ferrari, Head of the RF and Millimeter-Wave Lab IMEP-LAHC Microelectronics, Electromagnetism and Photonic Institute, Grenoble Alpes University, France;

Клавдиев В.Е., канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

Prof. Dr. Wolfgang Krautschneider, Head of Nanoelectronics Institute, Hamburg University of Technology, Germany;

Кучерявый Е.А., канд. техн. наук, профессор, Tampere University of Technology, Finland.

Dr. Fa-Long Luo, Chief Scientist, Element CXI, San Jose, USA;

Макаров С.Б., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

Prof. Dr. Emil Novakov, IMEP-LAHC Microelectronics, Electromagnetism and Photonic Institute, Grenoble, France;

Трифонов П.В., канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

Устинов С.М., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

Цикин И.А., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия;

Шкодыврев В.П., д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Россия.

Журнал с 1995 года издается под научно-методическим руководством Российской академии наук. С 2008 года выпускается в составе сериального периодического издания «Научно-технические ведомости СПбГПУ» ISSN 1994-2354.

Журнал с 2002 года входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

Сведения о публикациях представлены в Реферативном журнале ВИНТИ РАН, в международной справочной системе «Ulrich`s Periodical Directory», в базах данных Российский индекс научного цитирования (РИНЦ), Google Scholar, EBSCO, Math-Net.Ru, ProQuest, Index Copernicus

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-51457 от 19.10.2012 г.

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

Адрес редакции и издательства: Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
Тел. редакции (812) 552-62-16.

Подписной индекс **47517** в объединенном каталоге «Пресса России».

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2016

THE MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF THE RUSSIAN FEDERATION



ST. PETERSBURG STATE
POLYTECHNICAL UNIVERSITY
JOURNAL

Computer Science.
Telecommunications and Control Systems

3(247) 2016

Polytechnical University Publishing House
Saint Petersburg
2016

ST. PETERSBURG STATE POLYTECHNICAL UNIVERSITY JOURNAL
COMPUTER SCIENCE. TELECOMMUNICATIONS AND CONTROL SYSTEMS

EDITORIAL COUNCIL

Head of the editorial council

Prof. Dr. *Rafael M. Yusupov* (corresponding member of the Russian Academy of Sciences)

Members:

Prof. Dr. *Sergey M. Abramov* (corresponding member of the Russian Academy of Sciences),

Prof. Dr. *Dmitry G. Arseniev*,

Prof. Dr. *Vladimir V. Voevodin* (corresponding member of the Russian Academy of Sciences),

Prof. Dr. *Vladimir S. Zaborovsky*,

Prof. Dr. *Vladimir N. Kozlov*,

Prof. Dr. *Alexandr E. Fotiadi*,

Prof. Dr. *Igor G. Chernorutsky*.

EDITORIAL BOARD

Editor-in-chief

Prof. Dr. *Alexander S. Korotkov*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Members:

Prof. Dr. *Alexandr V. Babkin*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Assoc. Prof. Dr. *Vladimir M. Itsykson*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Prof. Dr. *Philippe Ferrari*, Head of the RF and Millimeter-Wave Lab IMEP-LAHC Microelectronics, Electromagnetism and Photonic Institute, Grenoble Alpes University, France;

Assoc. Prof. Dr. *Vladimir E. Klavdiev*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Prof. Dr. *Yevgeni Koucheryavy*, Tampere University of Technology, Finland.

Prof. Dr. *Wolfgang Krautschneider*, Head of Nanoelectronics Institute, Hamburg University of Technology, Germany;

Dr. *Fa-Long Luo*, Chief Scientist, Element CXI, San Jose, USA;

Prof. Dr. *Sergey B. Makarov*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Prof. Dr. *Emil Novakov*, IMEP-LAHC Microelectronics, Electromagnetism and Photonic Institute, Grenoble, France;

Prof. Dr. *Viacheslav P. Shkodyrev*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Assoc. Prof. Dr. *Peter V. Trifonov*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Prof. Dr. *Igor A. Tsikin*, Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

Prof. Dr. *Sergey M. Ustinov*, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia.

The journal is published under scientific and methodical guidance of the Russian Academy of Sciences since 1995. The journal is published since 2008 as part of the periodical edition «Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU» (ISSN 1994-2354).

The journal is included in the List of Leading Peer-Reviewed Scientific Journals and other editions to publish major findings of PhD theses for the research degrees of Doctor of Sciences and Candidate of Sciences.

The journal is indexed by Ulrich's Periodicals Directory, Google Scholar, EBSCO, ProQuest, Index Copernicus, VINITI RAS Abstract Journal (Referativnyi Zhurnal), VINITI RAS Scientific and Technical Literature Collection, Russian Science Citation Index (RSCI) database © Scientific Electronic Library and Math-Net.ru databases.

The journal is registered with the Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom, Information Technologies and Mass Communications (ROSKOMNADZOR). Certificate ПИ № ФС77-51457 issued Oct. 19, 2012.

No part of this publication may be reproduced without clear reference to the source.

The views of the authors can contradict the views of the Editorial Board.

The address: 195251 Polytekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

Содержание

Устройства и системы передачи, приема и обработки сигналов

Сергеев А.Я. *Экономичный транзисторный возбуждатель оконечного каскада передатчика на тетроде.....* 7

Аппаратное обеспечение вычислительных, телекоммуникационных и управляющих систем

Смердов Р.С., Лобода В.В., Спивак Ю.М., Мошников В.А. *Загрязняющий фильтр видимого и ближнего ультрафиолетового диапазона для флуоресцентного микроскопа на основе явления плазмонного резонанса* 13

Моделирование вычислительных, телекоммуникационных, управляющих и социально-экономических систем

Копп В.Я., Заморёнов М.В., Обжерин Ю.Е., Ларин М.Ю. *Использование метода траекторий для построения полумарковской модели структуры «технологическая ячейка – накопитель»* 23

Горожанкин С.А., Шитов А.А., Савенков Н.В. *Методики для аппроксимации зависимостей нескольких переменных в программной среде MS Excel и Mathcad.....* 35

Интеллектуальные системы и технологии

Лиманова Н.И., Атаев С.Г. *Алгоритм программной параметризации объектов компьютерной томографии и его практическая реализация.....* 49

Contents

Circuits and Systems for Receiving, Transmitting and Signal Processing

Sergeev A.Ya. <i>Cost-Effective Final-Stage Transistor Amplifier of a Tetrode-Based Transmitter</i>	7
--	---

Hardware of Computer, Telecommunications and Control Systems

Smerdov R.S., Loboda V.V., Spivak Yu.M., Moshnikov V.A. <i>UV-Vis Band-Stop Filter Based on Plasmon Resonance for Fluorescent Microscopic Applications.....</i>	13
--	----

Simulations of Computer, Telecommunications, Control and Social Systems

Kopp V.Ya., Zamoryonov M.V., Objerin Yu.E., Larin M.Yu. <i>Using the Method of Trajectories for Constructing a Semi-Markov Model of a 'Technological Cell – Storage Device' Structure</i>	23
--	----

Gorozhankin S.A., Shitov A.A., Savenkov N.V. <i>Procedures for Approximating Dependences of Several Variables in MS Excel and Mathcad Software Environment.....</i>	35
--	----

Intellectual Systems and Technologies

Limanova N.I., Ataev S.G. <i>Computer-Aided Parametrization Algorithm for Tomographic Objects and Its Practical Realization.....</i>	49
---	----

**ЭКОНОМИЧНЫЙ ТРАНЗИСТОРНЫЙ ВОЗБУДИТЕЛЬ
ОКОНЕЧНОГО КАСКАДА ПЕРЕДАТЧИКА НА ТЕТРОДЕ**

A.Ya. Sergeev

**COST-EFFECTIVE FINAL-STAGE TRANSISTOR AMPLIFIER
OF A TETRODE-BASED TRANSMITTER**

Рассмотрена работа оконечного каскада тракта усиления вещательного передатчика ДСВ-диапазона, в котором импульсы возбуждения формируются за счет заряда и разряда входной ёмкости лампы. Показано, что это технически реализуется схемой, аналогичной последовательному инвертору. Проанализирована работа такого инвертора на емкостную нагрузку. Приведены экспериментальные результаты.

ПЕРЕДАТЧИК; ТЕТРОД; ВХОДНАЯ ЁМКОСТЬ; ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЙ ИНВЕРТОР.

The paper considers the performance of an amplifying final stage of a broadcasting transmitter of the UHF range, in which excitation pulses are formed at the expense of charge and discharge of the lamp input capacity. It is shown that it can be technically implemented through a scheme similar to a series inverter. We have analyzed the capacitor load performance of such an inverter. The corresponding experimental results are demonstrated.

TRANSMITTER; TETRODE; INPUT CAPACITY; SERIES INVERTER.

Усилительные тракты современных вещательных передатчиков диапазонов длинных и средних волн мощностью в десятки (на средних волнах) и даже в сотни киловатт (на длинных волнах) имеют лишь один выходной ламповый каскад. Все остальные каскады являются твердотельными [1, 2]. Типовая схема оконечного каскада представлена на рис. 1.

На схеме трансформатор $Tr1$ предназначен для уменьшения входного напряжения каскада $u_{вх}$, т. к. амплитуда управляющего напряжения на сетке лампы может достигать 300–400 В.

При этом возникает задача построения предоконечного транзисторного каскада (возбудителя), обеспечивающего входное напряжение лампы $u_{вх}$ и работающего в

специфических условиях на нагрузку, имеющую емкостной характер за счет емкости $C_{вх}$ (см. рис. 1).

Применение для этой цели широкополосных транзисторных усилителей в режиме В, работающих на фильтр низких частот (ФНЧ), в который включено входное сопротивление лампы, ведет к большим затратам мощности, теряемой в резисторе, обеспечивающем режим согласования ФНЧ.

Эту мощность можно существенно (практически на порядок) снизить, формируя импульсы возбуждения лампы оконечного каскада путем заряда и разряда входной емкости лампы $C_{вх}$ при условии работы тетрода в левой части проходной характеристики (рис. 2).

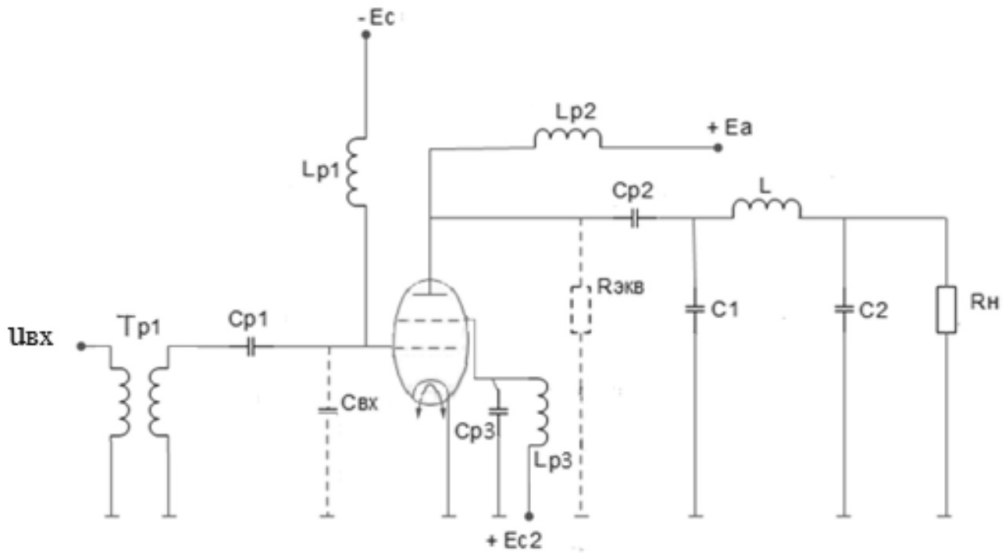


Рис. 1. Типовая схема оконечного каскада на тетроде

При этом импульсы анодного тока имеют трапециевидную форму. Эта идея была впервые изложена в [3], однако особую актуальность она приобрела лишь в последние годы в связи с появлением мощных генераторных тетродов с «левыми» характеристиками, в которых требуемая мощность достигается при работе лампы без сеточных токов.

Гармонический анализ трапециевидных импульсов анодного тока показал, что при обычных значениях нижнего угла отсечки $\theta_n = 80^\circ\text{--}90^\circ$ и сохранении эквивалентно-

го сопротивления нагрузки тетрода $R_{экв}$, а также максимального значения импульса анодного тока $I_{a\text{ max}}$, такой режим не уступает по энергетике (значениям выходной мощности $P_{вых}$ и КПД η) режиму при косинусоидальном возбуждении. Кроме того, при верхнем угле отсечки θ в более $30^\circ\text{--}35^\circ$, в импульсе анодного тока появляется третья гармоника в противофазе по отношению к первой, что позволяет использовать такой возбудитель при реализации в оконечном каскаде энергетически выгодного бигармонического режима [3].

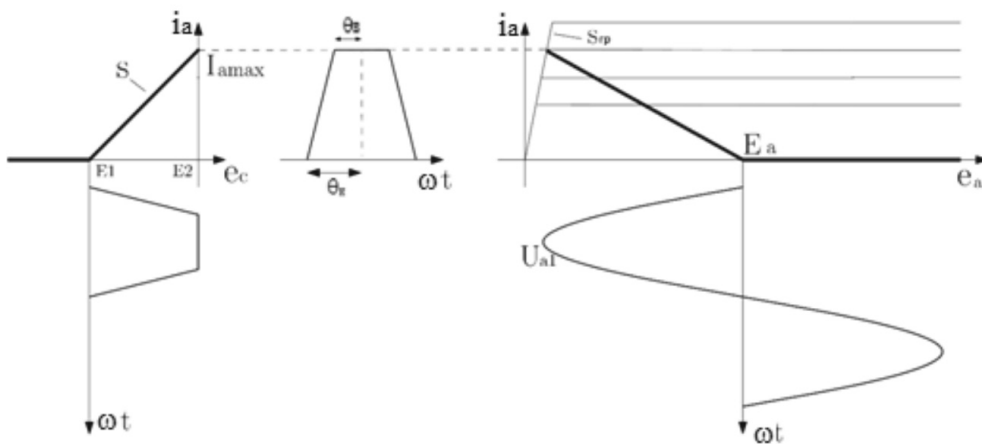


Рис. 2. Линейно аппроксимированные характеристики тетрода

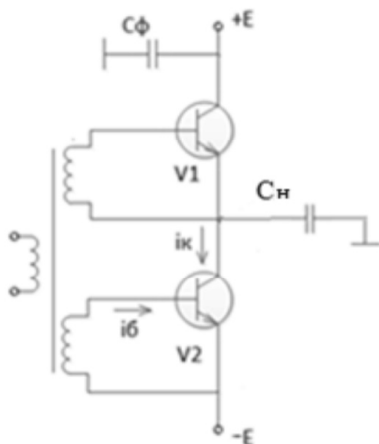


Рис. 3. Последовательный инвертор, работающий на емкость C_n

Технически перезаряд емкости $C_{вх}$ можно осуществить с помощью схемы, аналогичной последовательному инвертору, с тем отличием, что транзисторы в ней работают не в ключевом режиме, а в активной области (рис. 3).

Рассмотрим работу инвертора на емкостную нагрузку C_n (здесь C_n — пересчитанное к первичной обмотке трансформатора Tr1 значение $C_{вх}$), в идеализированном варианте (считая транзисторы V1 и V2 генераторами прямоугольного тока). Временные диаграммы токов и напряжений для этого случая представлены на рис. 4 (штриховые линии).

Найдем связь между длительностью фронта t_ϕ напряжения u_c на емкости C_n и размахом этого напряжения ΔE . Полагая $u_{c_{нач}} = E$ (см. рис. 4), получим на этапе разряда $u_c = E - \frac{1}{C} \int i_c dt$. При $t = t_\phi$,

$$u_c = E - \frac{I_{km} t_\phi}{C_n} = -E, \text{ откуда}$$

$$t_\phi = \frac{\Delta E \cdot C_n}{I_{km}}, \quad (1)$$

где $\Delta E = -u_{c_{кон}} + u_{c_{нач}} = 2E$.

Мощность потерь на этапе формирования фронтов:

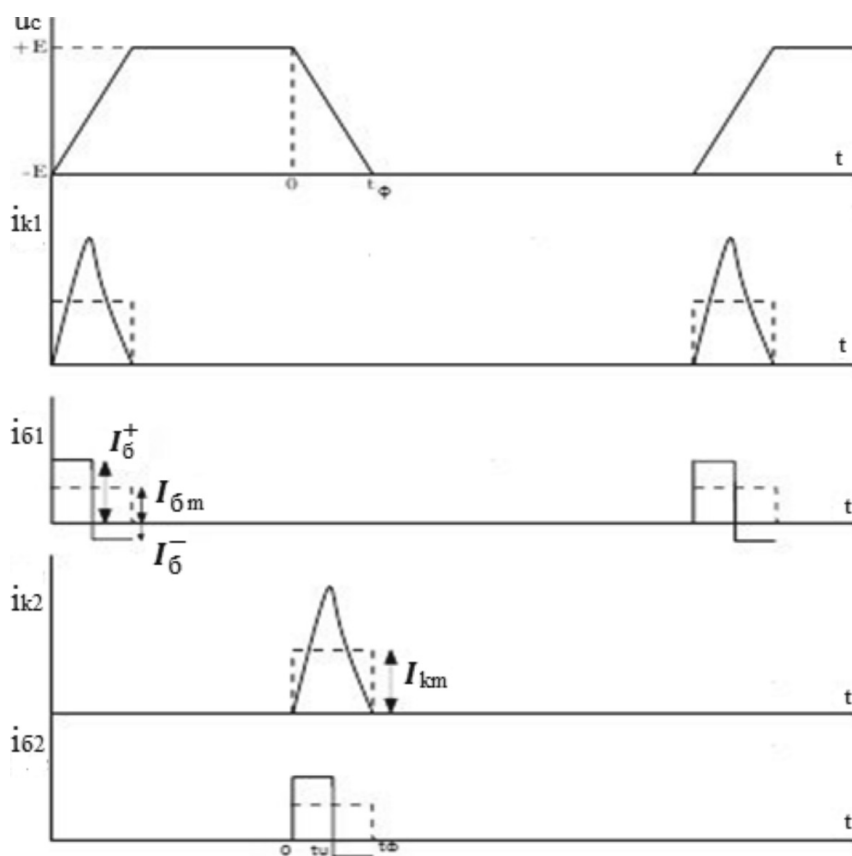


Рис. 4. Временные диаграммы токов и напряжений инвертора

$$P_{\Phi} = \frac{2}{T} \int_0^{t_{\Phi}} I_{km} \left(1 - \frac{t}{t_{\Phi}^c}\right) 2E dt = (\Delta E)^2 C_f. \quad (2)$$

Вся эта мощность рассеивается в устройстве перезаряда.

Рассмотрим перезаряд емкости C_H с учетом инерционности транзисторов V1 и V2 (см. рис. 4). При этом предполагается, что транзисторы управляются источниками тока и не заходят в область насыщения. При анализе использована зарядовая модель транзистора, параметры которой считались не зависящими от режима (текущих значений тока и напряжений) [4]:

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{\tau_{\beta}} - C_k \frac{du_k}{dt} = i_k, \quad (3)$$

где $Q = \tau_T i_k$; C_k – емкость закрытого коллекторного перехода.

Решение задачи проводится в два этапа. На первом этапе рассматривается разряд C_H ($0 \dots t_u$, сплошные кривые см. на рис. 4), при этом уравнение для коллекторного тока имеет вид:

$$di_k^{(1)} + i_k^{(1)} \frac{m}{\tau_{\beta}} = \frac{I_6^+}{\tau_T}, \quad (4)$$

при начальном условии $i_k^{(1)}(0) = 0$. Здесь $m = 1 + \frac{C_k}{C_H} \beta$, $\beta = \frac{\tau_{\beta}}{\tau_T}$ – коэффициент передачи тока транзистора.

Из решения (4) следует:

$$i_k^{(1)} = \frac{I_6^+ \beta}{m} \left(1 - e^{-\frac{m}{\tau_{\beta}} t}\right). \quad (5)$$

Напряжение на емкости $u_C = -\frac{1}{C_H} \int_0^{t_u} i_k dt$.

Полагая $u_C(0) = u \cong E$, получим

$$u_C^{(1)} = u_{\text{кон}} + \frac{I_6^+ \beta \tau_{\beta}}{C_H m} \left(1 - e^{-\frac{m}{\tau_{\beta}} t}\right) - \frac{I_6^+ \beta}{C_H m} t. \quad (6)$$

Начальные условия для второго этапа ($t_u \dots t_{\Phi}$) находятся из (5) и (6) при $t = t_u$. Используя уравнение для коллекторного тока на втором этапе:

$$di_k^{(2)} + i_k^{(2)} \frac{m}{\tau_{\beta}} = -\frac{I_6^-}{\tau_T}, \quad (7)$$

где I_6^- – некоторый заданный обратный

ток базы, получим:

$$i_k^{(2)} = -\frac{I_6^+ \beta}{m} \left(1 - e^{-\frac{m}{\tau_{\beta}} t_u}\right) e^{-\frac{m}{\tau_{\beta}} (t-t_u)} - \frac{I_6^- \beta}{m} \left(1 - e^{-\frac{m}{\tau_{\beta}} (t-t_u)}\right) \quad (8)$$

и

$$u_C^{(2)} = u_{\text{кон}} - \frac{I_6^+ \beta}{C_H m} t_u - \frac{I_6^- \beta}{C_H m} (t - t_u) + \frac{I_6^- \beta \tau_{\beta}}{C_H m^2} \times \left(1 - e^{-\frac{m}{\tau_{\beta}} (t-t_u)}\right) + \frac{I_6^+ \beta \tau_{\beta}}{C_H m^2} \left(1 - e^{-\frac{m}{\tau_{\beta}} t_u}\right) e^{-\frac{m}{\tau_{\beta}} (t-t_u)}. \quad (9)$$

Из условия $i_k(\Delta t) = 0$ найдем момент окончания тока через транзистор на втором этапе, $\Delta t = \frac{\tau_{\beta}}{m} \ln \left[k \left(1 - e^{-\frac{m t_u}{\tau_{\beta}}}\right) + 1 \right]$, где

$k = \frac{I_6^+}{I_6^-}$; $t_{\Phi} = t_u + \Delta t$ – длительность фронта напряжения на емкости C_H (см. рис. 4), тогда

$$\frac{t_{\Phi}}{t_u} = 1 + \frac{\omega \tau_{\beta}}{\omega t_u m} \ln \left[k \left(1 - e^{-\frac{m \omega t_u}{\omega \tau_{\beta}}}\right) + 1 \right]. \quad (10)$$

Расчетные графики этой зависимости от $\omega \tau_{\beta}$ при различных m представлены на рис. 5 (сплошные линии при $k = 5$, штриховые – при $k = 2$).

Из закона сохранения количества электричества величина изменения напряжения на емкости:

$$\Delta E = \frac{1}{C_H} \int_0^{t_u + \Delta t} i_k dt = \int_0^{t_u} i_k^{(1)} dt + \int_{t_u}^{t_u + \Delta t} i_k^{(2)} dt = \frac{I_6^+ \beta t_u}{m C_H} \left[1 - \frac{\ln \left[1 + k \left(1 - e^{-\frac{m t_u}{\tau_{\beta}}}\right) \right]}{k \frac{m t_u}{\tau_{\beta}}} \right]. \quad (11)$$

Сравнение по гармоническому составу последовательности импульсов u_C с фронтами согласно выражениям (6), (9) и последовательности трапецевидных импульсов с фронтами, аппроксимированными по уровням 0,1 и 0,9 прямыми линиями, показало, что различие между ними невелико.

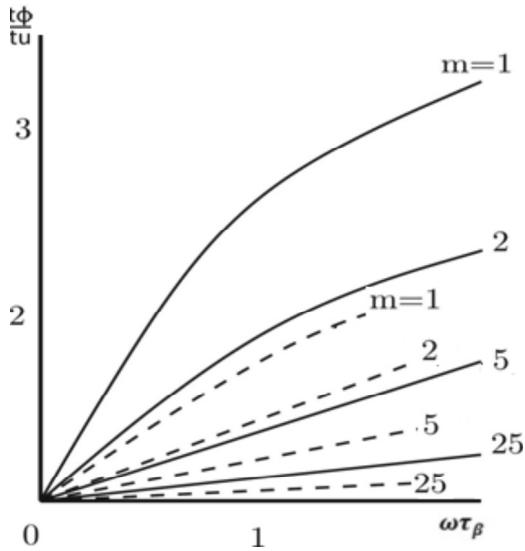


Рис. 5. Зависимость отношения длительности фронта к длительности импульса от относительной частоты

лико (порядка 2–3 %). Следовательно, для расчета гармонического состава импульсов анодного тока можно использовать расчетные данные для последовательности трапецевидных импульсов.

На практике интересна и максимальная мгновенная мощность, рассеиваемая транзистором, $P_{\text{пик}}$. Как следует из рис. 4, в идеализированном представлении ее величина достигает своего максимального значения при $t = t_u$. Например, при $t_{\text{ф}}/T = 1/12$, $P_{\text{пик}} = I_{\text{км}} E = 24 P_0$. На более высоких частотах, с ростом влияния инерционности, момент достижения $P_{\text{пик}}$ сдвигается к середине этапов заряда или разряда, оставаясь (при $\Delta E = \text{const}$) величиной такого же порядка по отношению к P_0 , где $P_0 = \frac{E}{T} \int_0^{t_u} i_k dt = Ef \frac{I_6^+ \beta}{m} t_u$ (оценка при $I_6^- = 0$).

При экспериментальных исследованиях в схеме рис. 3 в качестве $V_{1,2}$ использовались транзисторы КТ908А с параметрами $\beta = 30$, $\tau_{\beta} = 0,1$ мкс, $C_k = 300$ пФ. Емкость $C_H = 10$ нФ, что при $E_2 = 0$ и $E_1 = 30$ В примерно соответствовало работе на входную цепь генераторного тетрода ГУ61А ($C_{\text{вх}} = 350$ пФ, амплитуда напряжения возбуждения $U_g = 180$ В) через трансформатор

с коэффициентом трансформации $n = 6$.

На рис. 6 приведены экспериментальные зависимости размаха напряжения на емкости от длительности импульса тока транзисторов $\Delta E(t_u)$ на разных частотах.

Там же приведены расчетные кривые согласно соотношению (11) при фиксированных значениях I_6^+ $m = 1 + \frac{C_k \beta}{C_H} \cong 1,9$ и $k = \frac{I_6^+}{I_6^-} \cong 5$ (экспериментальная оценка по экрану осциллографа). Относительно последней величины надо отметить, что отрицательный ток базы с амплитудой I_6^- не создавался искусственно, а получался за счет намагничивания, возникающего в обмотках Тр1 под действием напряжения, приложенного к ним во время формирования импульса прямого тока. Они качественно хорошо согласуются с экспериментом, однако с уменьшением t_u различие между теоретическими кривыми и экспериментом увеличивается. Это объясняется тем, что из-за конечной длительности фронтов, импульсы тока транзисторов теряют прямоугольную форму и с дальнейшим уменьшением ($t_u < 0,1 \dots 0,2$ мкс) вырождаются в треугольники (сплошные линии на рис. 4). Их площадь уменьшается, и на той же частоте емкость C_H перезаряжается до меньшего значения ΔE , чем предусматривает формула (11).

На рис. 7 показаны экспериментальные зависимости мощности, потребляемой от источника питания, P_0 от частоты f .

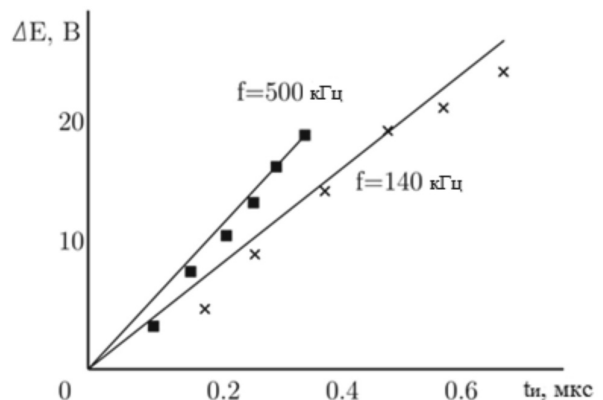


Рис. 6. Зависимости размаха напряжения на емкости от длительности импульса тока транзисторов

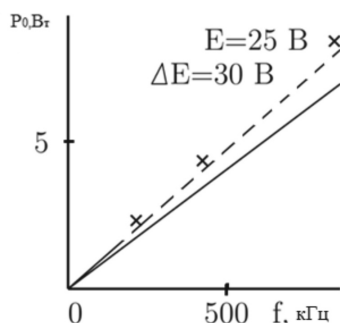


Рис. 7. Зависимость мощности, потребляемой возбудителем, от частоты

Здесь же (сплошная кривая) представлена расчетная зависимость $P_0 = E\Delta EC_H f$, откуда следует, что P_0 линейно возрастает с

увеличением частоты. Эта зависимость лучше совпадает с экспериментом, если учесть, что C_H включает в себя выходную емкость транзистора $C_k = 300$ пФ и паразитную емкость $C_{ПАР} = 100$ пФ (штриховая линия). Из графика, в частности, следует, что для раскачки лампы ГУ61А до мощности 15 кВт на частотах до 1 МГц оказывается достаточной мощность возбудителя менее 10 Вт.

Полученные результаты позволяют рекомендовать использование таких возбудителей при модернизации большого числа находящихся в эксплуатации вещательных передатчиков диапазонов длинных и средних волн.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шахгильдян В.В., Козырев В.Б., Ляховкин А.А. и др. Радиопередающие устройства: Учебник для вузов. М.: Радио и связь, 2003. 560 с.
2. Шахгильдян В.В., Шумилин М.С., Козырев В.Б. и др. Проектирование радиопередатчиков: Учеб. пособие для вузов. М.: Радио и связь, 2000. 656 с.
3. Сергеев А.Я., Уткин М.А. Транзисторные возбудители для выходного лампового каскада в бигармоническом режиме // Системы и устройства радиотехники, автоматики и автоматизированного проектирования: Тез. докл. науч.-техн. конф. Свердловск, 1982.
4. Каганов В.И. Радиопередающие устройства. М.: ИРПО, 2002. 288 с.


REFERENCES

1. Shakhgildyan V.V., Kozyrev V.B., Lyakhovkin A.A. et al. Radioperedayushchiye ustroystva [Radio transmitters: Textbook for high schools], Moscow: Radio i svyaz Publ., 2003, 560 p. (rus)
2. Shakhgildyan V.V., Shumilin M.S., Kozyrev V.B. et al. Proektirovaniye radioperedatchikov [Radio transmitters: Textbook for high schools], Moscow: Radio i svyaz Publ., 2000, 656 p. (rus)
3. Sergeev A.Ya., Utkin M.A. Tranzistornyye vozбудители dlya vykhodnogo lampovogo kaskada v bigarmonicheskom rezhime [Thyristor activators for the output tube stage in the harmonic mode], Sistemy i ustroystva radiotekhniki, avtomatiki i avtomatizirovannogo proyektirovaniya [Conference on Systems and devices of radio engineering, automation and computer-aided design], Sverdlovsk, 1982. (rus)
4. Kaganov V.I. Radioperedayushchiye ustroystva [Radio transmitters], Moscow: IRPO Publ., 2002, 288 p. (rus)

СЕРГЕЕВ Александр Яковлевич — доцент кафедры радиотехнических и телекоммуникационных систем Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, кандидат технических наук.

195251, Россия, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29.
E-mail: acsergeev@yandex.ru

SERGEEV Aleksander Ya. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.
195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.
E-mail: acsergeev@yandex.ru



Аппаратное обеспечение вычислительных, телекоммуникационных и управляющих систем

DOI: 10.5862/JCSTCS.247.2

УДК 621.315

Р.С. Смердов, В.В. Лобода, Ю.М. Спивак, В.А. Мошников

ЗАГРАЖДАЮЩИЙ ФИЛЬТР ВИДИМОГО И БЛИЖНЕГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛЯ ФЛУОРЕСЦЕНТНОГО МИКРОСКОПА НА ОСНОВЕ ЯВЛЕНИЯ ПЛАЗМОННОГО РЕЗОНАНСА

R.S. Smerdov, V.V. Loboda, Yu.M. Spivak, V.A. Moshnikov

UV-VIS BAND-STOP FILTER BASED ON PLASMON RESONANCE FOR FLUORESCENT MICROSCOPIC APPLICATIONS

Разработана технология синтеза плазмонного фильтра на основе массива наночастиц. Реализован прототип фильтра на основе плазмонного резонанса в массиве наночастиц серебра с двумя полосами поглощения 260 и 360 нм. Методом электронно-абсорбционной спектроскопии исследованы характеристики затухания фильтров в зависимости от параметров синтеза. Показана возможность достижения уровня оптического подавления фильтра до 40 дБ путем синтеза массива плазмонных наночастиц, обладающих меньшим разбросом по размерам и фрактальностью. Выявлено превосходство данного типа фильтра над интерференционным по диапазону регулировки положения полосы затухания.

ПОЛОСНО-ЗАГРАЖДАЮЩИЙ ФИЛЬТР; ПЛАЗМОННЫЙ РЕЗОНАНС; ФЛУОРЕСЦЕНТНАЯ МИКРОСКОПИЯ; МОДЕЛЬ ДРУДЕ; ФРАКТАЛЫ; МЕТОД УННО-ИМАИ..

A synthesis technique for plasmonic array of silver nanoparticles has been developed. Double absorption band (260 nm and 360 nm) UV-Vis filter based on plasmon resonance of functionalized silver nanoparticles array has been created. The dependence of the prototype's attenuation characteristics on synthesis parameters is investigated utilizing the Electronic Absorption Spectroscopy technique. We have proved it was possible to achieve a sufficient level of optical attenuation (up to 40 dB) by producing an array of plasmonic nanoparticles with less variations in size and less fractality while increasing the anodizing current density of the silicon matrix. The superiority of the plasmon filter over the interference filter in terms of adjusting the attenuation band position has been revealed.

BAND-STOP FILTER; PLASMON RESONANCE; FLUORESCENCE MICROSCOPY; DRUDE MODEL; FRACTALS; UNNO-IMAI TECHNIQUE.

Оптические фильтры, представляющие отрезки световодов, дифракционные решетки, многослойные покрытия с различными показателями преломления материалов слоев, находят широкое применение в системах контроля и передачи изображений, спектроскопических и интерференционных экспериментах, технике оптической

связи [1], а также в системах флуоресцентной микроскопии [2].

Явление плазмонного резонанса может использоваться при создании полосовых и заграждающих фильтров в оптическом диапазоне (300–1200 нм) [3]. В системах микроскопии используются оптические заграждающие фильтры (ЗФ), обеспечи-

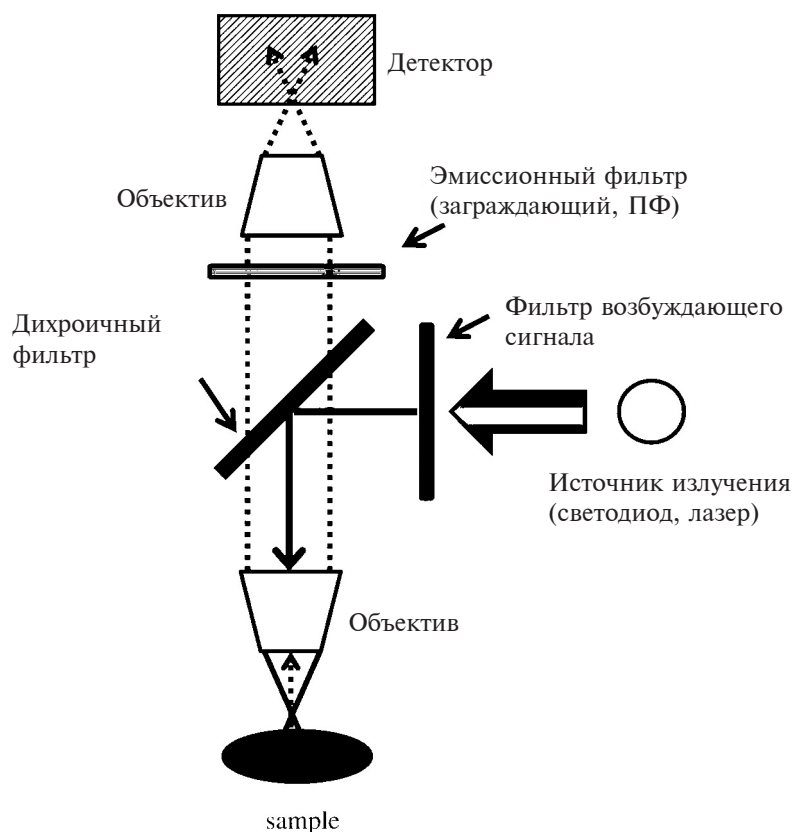


Рис. 1. Принципиальная блок-схема флуоресцентного микроскопа.
Частотно-избирательная часть: эмиссионный фильтр (заграждающий или полосовой фильтр),
фильтр возбуждающего сигнала (полосовой фильтр)

вающие прохождение эмитированного при флуоресценции света, задерживая сигнал возбуждения. Оптические фильтры высоких частот (ФВЧ) применяются для фильтрации сигнала возбуждения. Такие фильтры, разработанные для спектроскопии, называются *спектроскопическими фильтрами*.

На рис. 1 изображена принципиальная схема флуоресцентного микроскопа. Используется режим отраженного сигнала, при котором длина волны флуоресцентного отраженного сигнала больше, чем у возбуждающего сигнала. В работе [2] разработана система облучения для флуоресцентной микроскопии отраженного сигнала: сигнал определенной длины волны или набором длин волн (в ультрафиолетовом диапазоне) образуется при прохождении через фильтр возбуждающего сигнала. Сигнал затем отражается от дихроичного фильтра (зеркала)

и поступает через объектив к исследуемому образцу. Излученный флуоресцентный сигнал проходит через дихроичный фильтр и впоследствии заграждающий фильтр, блокирующий сигнал с длиной волны возбуждения. В данном режиме работы флуоресцентного микроскопа эмитированный сигнал распространяется сферически симметрично во всех направлениях, независимо от угла падения возбуждающего сигнала.

Таким образом, наша цель — разработка заграждающего фильтра видимого и ближнего ультрафиолетового диапазона на основе плазмонного резонанса в массиве наночастиц серебра. В ходе работы был реализован прототип фильтра с двумя полосами поглощения 260 и 360 нм, а также разработана технология синтеза фильтра, позволяющая исключить стадию жидкост-

ного травления металлического слоя на обратной поверхности кремния, на основе метода Унно-Имаи [4] и электрохимического осаждения. Проведено исследование оптического поглощения прототипа заграждающего фильтра.

Теоретические положения плазмонного резонанса в наночастицах

Металлические (золотые и серебряные) наночастицы могут проявлять резонансные свойства на определенных частотах, при которых выполняются следующие условия: диэлектрическая проницаемость наночастицы отрицательная; длина волны, распространяющейся в свободном пространстве, велика по сравнению с размерами наночастицы.

Плазмон – квазичастица, отвечающая квантованию плазменных колебаний, которые представляют коллективные колебания свободного электронного газа. Поверхностные плазмоны образуются на границе раздела сред с положительной диэлектрической проницаемостью (стекло, воздух, другие диэлектрики) и поверхностью металлической наночастицы. Необходимо отметить, что плазмонный резонанс в металлических наночастицах – физическое явление, обу-

словленное наноразмерными масштабами, поскольку два условия резонанса (отрицательная диэлектрическая проницаемость и малые размеры частицы по сравнению с длиной волны) могут быть одновременно реализованы в наномасштабе [5].

Как уже было упомянуто ранее, второе условие – маленькие размеры наночастицы по сравнению с длиной волны падающего света – раскрывает физическую природу плазмонного резонанса в наночастицах как электростатический резонанс. Действительно, вследствие этого условия гармонические электромагнитные поля в пределах и около наночастиц изменяются практически синфазно. Как результат, в любой момент времени эти поля могут быть рассмотрены как электростатические. Электростатическая природа плазмонного резонанса в наночастицах и их отрицательная диэлектрическая проницаемость предполагают усиление локальных электрических полей внутри наночастиц и около них. На рис. 2 изображена сферическая наночастица с отрицательной диэлектрической проницаемостью ϵ , подвергавшейся воздействию однородного внешнего поля E_0 . Поскольку $\epsilon < 0$, вектор поляризации P направлен противоположно E_0 , что приводит к обра-

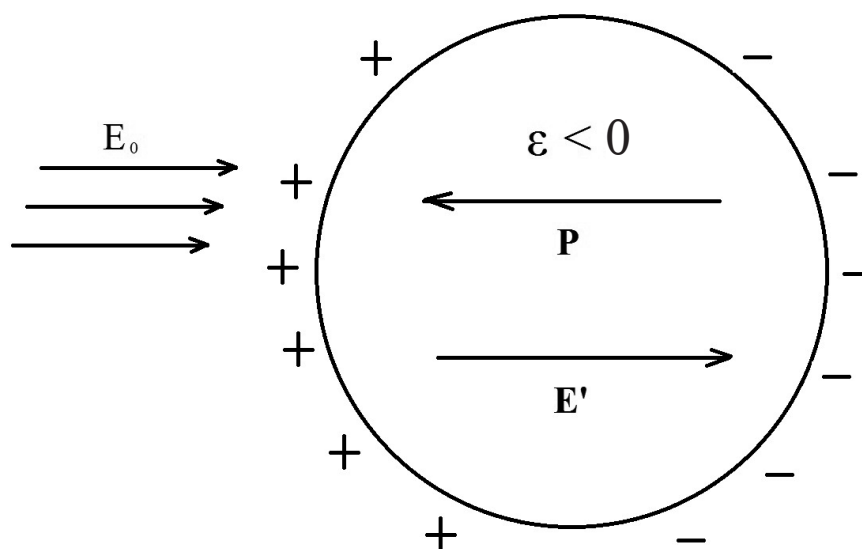


Рис. 2. Сферическая наночастица с отрицательной диэлектрической проницаемостью, подвергавшаяся воздействию внешнего электрического поля [5]

зованию поверхностных электрических зарядов, создающих «деполяризующее» поле E' , сонаправленное E_0 . Это приводит к увеличению суммарного электрического поля $E = E_0 + E'$ внутри сферической наночастицы.

Частота плазмонного резонанса в металлических наночастицах не зависит от размера самой наночастицы (при выполнении условия маленького размера частицы по сравнению с длиной волны падающего излучения). Такая инвариантность относительно размера подразумевает, что в случае массива почти одинаковых по форме, но разных по размерам металлических наночастиц, они могут резонировать на практически одинаковых длинах волн. Следовательно, плазмонный резонанс может быть одновременно возбужден на всех наночастицах сразу.

Как толщина, так и период массивов металлических наночастиц обуславливают поверхностный плазмонный резонанс, соответственно влияя на поток фотонов. В [6] предложен плазмонный фильтр для видимого диапазона, основанный на массиве ромбических наночастиц серебра. Однако массив наночастиц треугольной формы, расположенных в вершинах шестиугольников, обеспечивает более стабильную структуру и оптические свойства в отличие от массивов ромбических наночастиц серебра. Более того, чувствительность показателя преломления (RIS) сильно зависит от расположения, толщины и периода наномассивов.

Практическая реализация фильтра на основе плазмонного резонанса в массиве наночастиц серебра

Фильтр представляет массив фрактальных агрегатов наночастиц серебра размером порядка 500 нм и одиночных изолированных наночастиц серебра ($D = 20$ нм), осажденных на поверхность пористой кремниевой матрицы. Для формирования матрицы из пористого кремния использована система анодного травления. В традиционных системах анодирования металлы осаждаются на обратную сторону кремниевой пластины, и впоследствии данные слои

металлов используются в качестве электродов при анодном травлении [4]. Металлический слой затем должен подвергаться процедуре травления перед процессом осаждения металлических наноструктур на поверхности пористого кремния. Новая разработанная система анодирования не требует формирования заднего металлического слоя. На рис. 3 а схематически изображено поперечное сечение разработанной ячейки анодного окисления. Ячейка состоит из двух частей: левая и правая части симметричны и заполнены фтороводородной (HF) кислотой на время реакции анодирования. Кремниевая пластина установлена таким образом, что разделяет левую и правую части ячейки. Анодный ток поступает на кремниевую пластину через HF, находящуюся в непосредственном контакте с кремниевой пластиной. Анодный ток обеспечивается платиновыми электродами, располагающимися в левой и правой частях ячейки. При задании напряжения таким образом, что левый электрод является катодом, а правый — анодом, пористый кремний формируется на левой поверхности кремниевой подложки [4].

При создании массива наночастиц серебра на поверхности матрицы из пористого кремния использован метод катодного электрохимического осаждения из водного раствора $AgNO_3$ (рис. 3 б). В качестве электрода сравнения использован хлорсеребряный электрод, сохраняющий свой потенциал в растворах с водородным показателем от 0 до 15. Для поддержания точки отсчета по потенциалу использован потенциостат — гальваностат Elins P-40X.

Результаты исследования характеристик затухания прототипа заграждающего фильтра

Методом электронно-абсорбционной спектроскопии с использованием спектрофотометра Perkin-Elmer Lambda 900 (принципиальная блок-схема установки приведена на рис. 3 в) получены характеристики затухания $A(\lambda) = \frac{P_{пад}}{P_{отр}}$ (где $A(\lambda)$ — характеристика затухания сигнала, дБ; $P_{пад}$ — мощ-

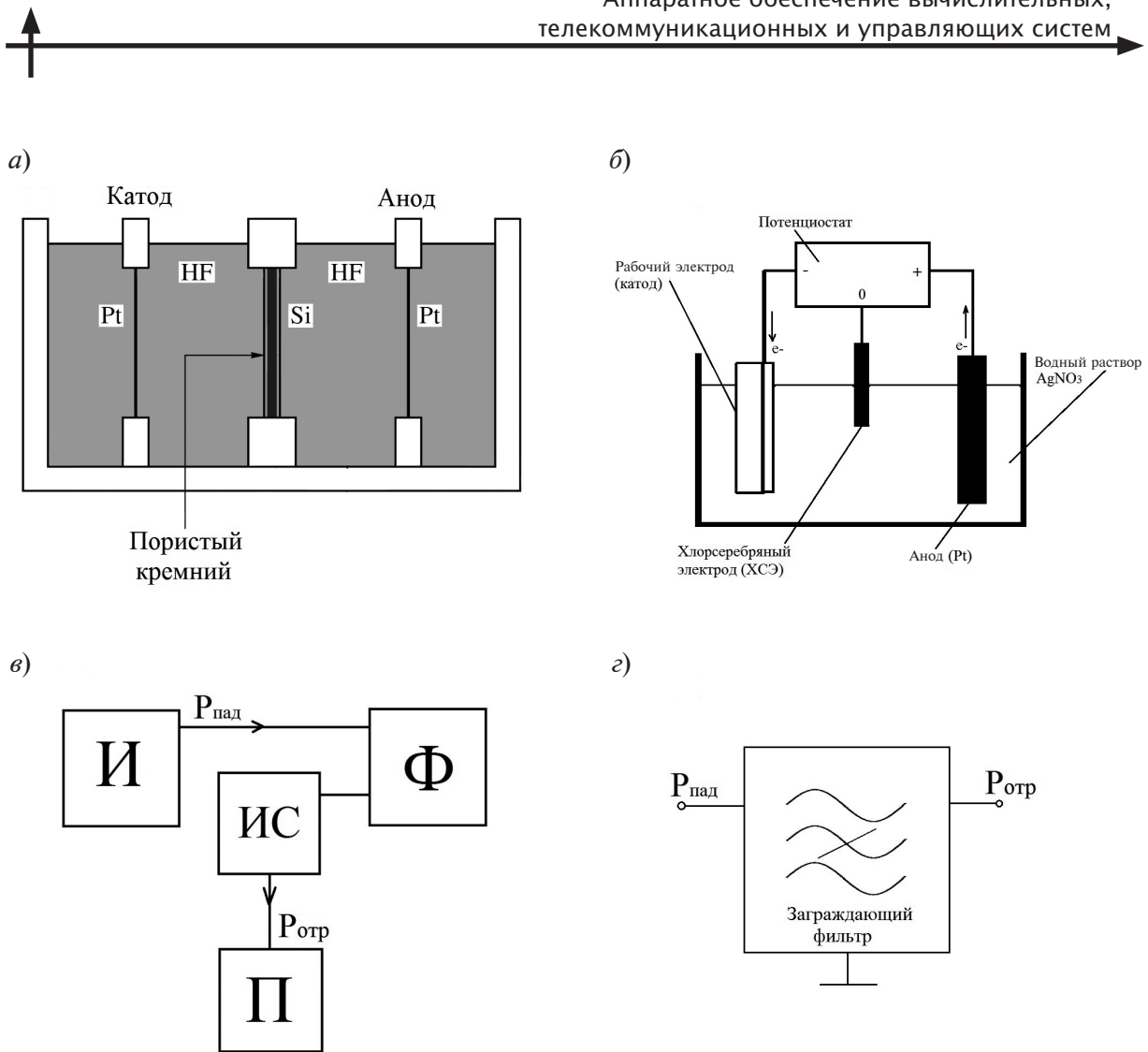


Рис. 3. Технология синтеза фильтра на основе плазмонного резонанса в массиве наночастиц серебра:

а – схематическое изображение ячейки для анодирования, реализующей метод Унно-Имаи; б – схематическое изображение ячейки катодного электрохимического осаждения; в – схема экспериментальной установки; г – схема частотно-избирательной части флуоресцентного микроскопа

ность сигнала, поступающего на фильтр; $P_{отр}$ – мощность отраженного сигнала; λ – длина волны, (нм) прототипов заграждающих фильтров на основе плазмонного резонанса наночастиц серебра.

На рис. 3 г изображена частотно-избирательная часть флуоресцентного микроскопа (отражающий эмиссионный фильтр). Когда серебро поступает на подложку из пористого кремния, распределение поверхностной энергии способствует образованию фрактальных агрегатов. В зависимости от времени анодирования и плотности тока анодирования изменяются параметры образующихся пор (глубина и

разветвленность пористой структуры).

На рис. 4 изображены характеристики затухания прототипов фильтров в зависимости от величины тока анодирования. Отчетливо видна полоса поглощения на длине волны $\lambda_0 = 360$ нм. Существование данной полосы поглощения согласуется с теоретическими результатами, полученными в [7] и обусловлено наличием пика поверхностного плазмонного резонанса наночастиц серебра. Интенсивность поглощения на данной длине волны растет с увеличением плотности тока анодирования с 2 до 30 мА/см², что свидетельствует о росте концентрации на поверхности

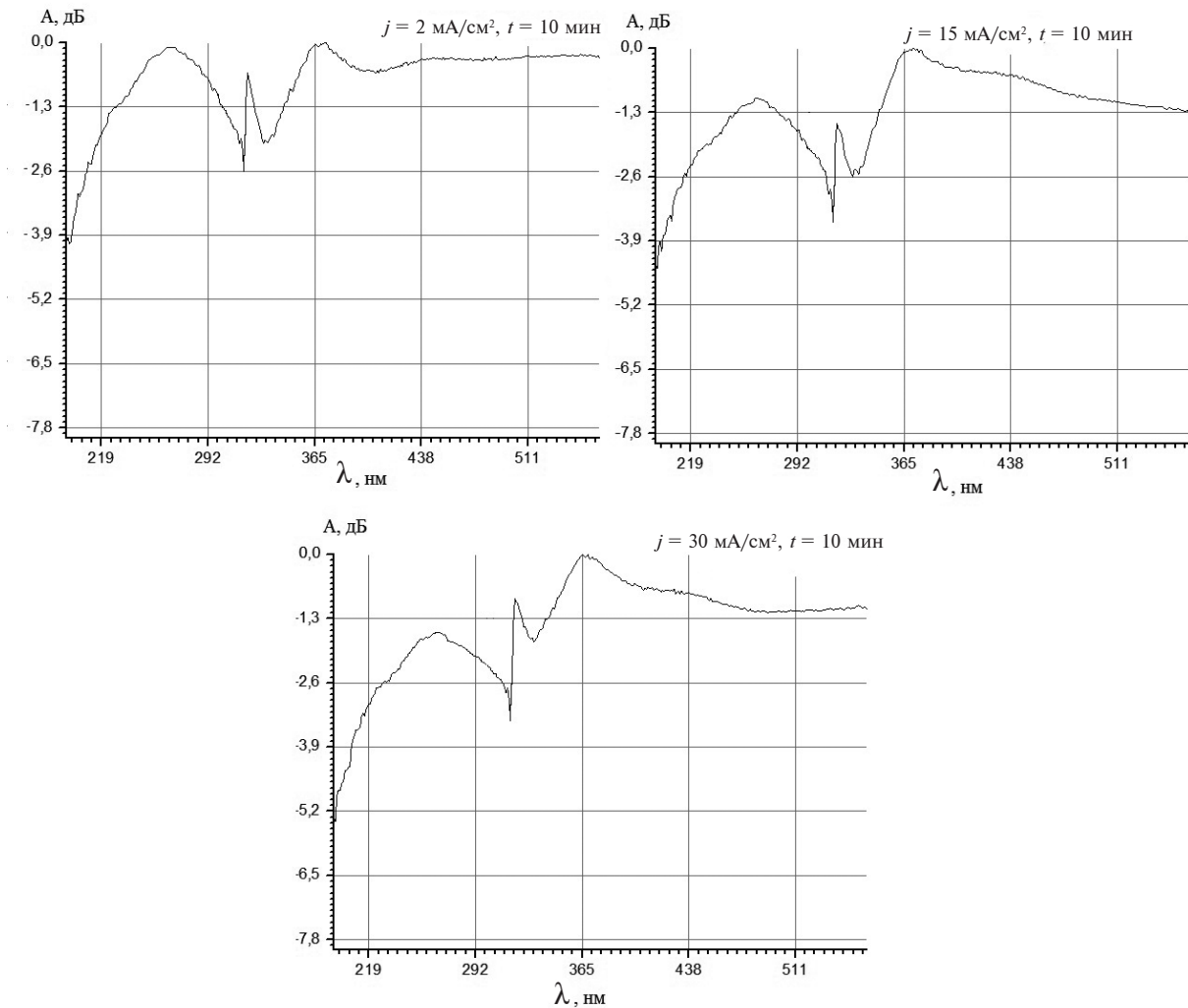


Рис. 4. Характеристики затухания прототипов на основе плазмонного резонанса в диапазоне от 190 до 600 нм в зависимости от плотности тока анодирования $j = 2, 15, 30 \text{ mA/cm}^2, t = 10 \text{ мин}$

кремниевой матрицы пор сферической формы, в которых образуются наночастицы серебра формы, близкой к сферической на поверхности пористой кремниевой матрицы.

На рис. 5 изображены спектры оптического поглощения прототипов фильтров в зависимости от времени анодирования. Помимо полосы поглощения положением $\lambda_0 = 360 \text{ нм}$, в спектре наблюдается широкая полоса (60 нм) в ультрафиолетовом диапазоне ($\lambda_0 = 265 \text{ нм}$). Ее существование связано с образованием разветвленных фрактальных агрегатов серебра Ag на по-

верхности пористой матрицы [8].

Уровень подавления оптического сигнала в полосе выше 3 дБ (до 40 дБ) может быть достигнут путем синтеза массива плазмонных наночастиц, обладающих меньшим разбросом по размерам и фрактальностью [8]. Увеличение плотности тока анодирования кремниевой матрицы [9] позволит сократить неравномерность в полосе поглощения до 0,1 дБ. В то же время, это приведет к значительному сокращению ширины полосы поглощения $\Delta\lambda$ (с 60 до 10 нм), что позволит приблизиться по данному показателю к современным

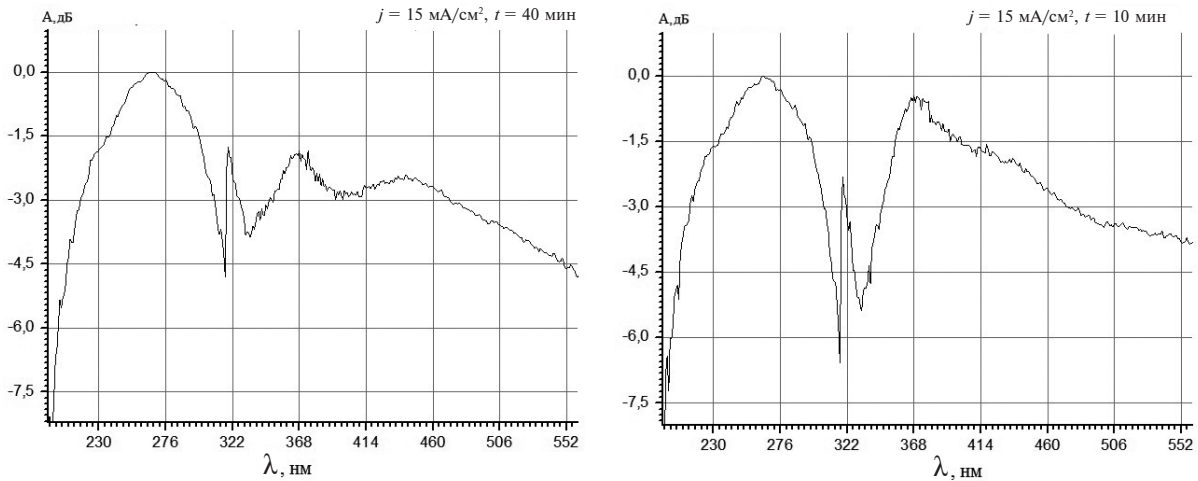


Рис. 5. Характеристики затухания прототипов на основе плазмонного резонанса в диапазоне от 190 до 600 нм в зависимости от времени анодирования $j = 15 \text{ мА/см}^2$, $t = 10 \text{ мин}$

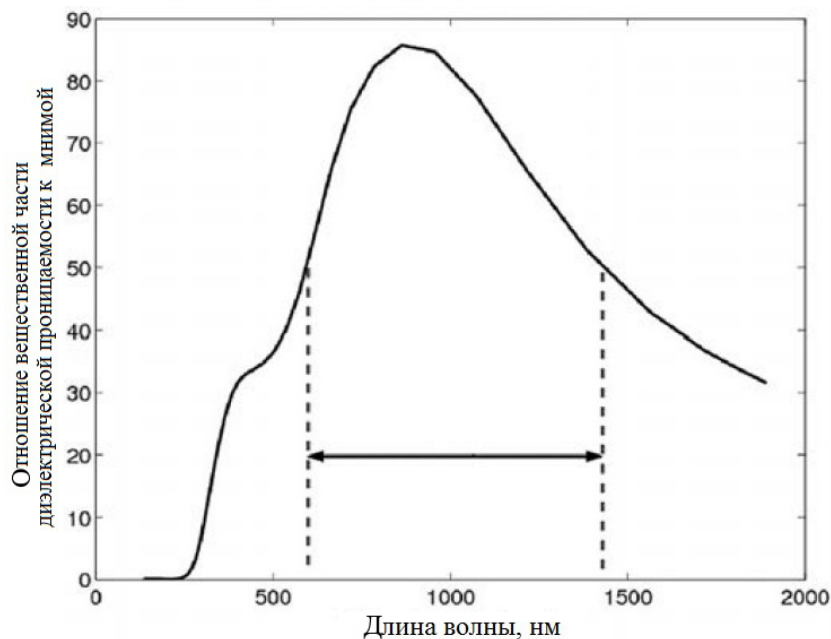


Рис. 6. Диапазон эффективного возбуждения поверхностного плазмонного резонанса в серебре [5]

тонкопленочным интерференционным фильтрам [10].

Изложенное выше позволяет сделать вывод о возможности обеспечения достаточного уровня подавления возбуждающего сигнала флуоресцентного микроскопа для набора контрастирующих агентов в широком диапазоне оптического спектра (λ_0

от 200 до 1600 нм) [11], изменяя условия синтеза кремниевой пористой матрицы. При этом также существует возможность регулирования ширины полосы поглощения в пределах 200–1600 нм (рис. 6) путем синтеза композиционных массивов наночастиц различных форм и материалов (Ag, Au, Ni) [5, 12].

Разработана принципиально новая технология синтеза плазмонного фильтра на основе массива наночастиц серебра, не требующая жидкостного травления металлического слоя на обратной поверхности кремния. Реализован прототип фильтра на основе плазмонного резонанса в массиве наночастиц серебра с двумя полосами поглощения 260 и 360 нм. При увеличении плотности тока анодирования подавление в полосе 260 нм снижается на 1,5 дБ. Исследованы возможности регулировки параметров фильтра по ширине полосы поглощения (10–70 нм), по величине подавления в полосе (до 40 дБ), по положению полосы поглощения (200–1600 нм), по неравномерности подавления в полосе поглощения (до 0,1 дБ).

Таким образом, реализованный прототип фильтра на основе плазмонного резонанса в массиве наночастиц серебра обладает следующими преимуществами по сравнению с современными интерференционными фильтрами: более широкий спектральный диапазон, полоса пропускания перестраивается за счет изменения геометрических параметров и материалов наночастиц, отсутствие паразитных полос пропускания в рабочем диапазоне длин волн (в отличие от цепочечных волновых фильтров [1]). Фильтр способен функционировать в насыщенных влагой средах, таких как химические и биологические растворы, в которых реакции между органическими растворами и металлическими наночастицами не проходят.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лапшин Б.А.** Оптические гетероструктуры. Новая теория и расчет. СПб.: БХВ-Петербург, 2012, 480 с.
2. **Ploem J., Tanke J.** Introduction to fluorescence microscopy. New York: Oxford University Press, 1987. 576 p.
3. **Bibette J.** Monodisperse ferrofluid emulsions // J. Magn. Magn. Mater. 1993. Vol. 122. No. 2. Pp. 37–42.
4. **Unno H., Imai K., Muramoto S.** Dissolution Reaction Effect on Porous-Silicon Density // J. of the Electrochemical Society. 1987. Vol. 243. No. 24. Pp. 358–362.
5. **Mayergoyz I.D.** Plasmon Resonances in Nanoparticles. Singapore: World Scientific Publishing Co Pte. Ltd., 2013. 325 p.
6. **Fu Y.Q., Zhu S.L., Zhou X.L., Zhao W.** Rhombic silver nanoparticles array-based plasmonic filter // International J. of Modern Physics B. 2011. Vol. 25. No. 19. Pp. 2557–2566.
7. **Ghauharali R.I., Brakenhoff G.J.** Fluorescence photobleaching-based image standardization for fluorescence microscopy // J. of Microscopy. 2001. Vol. 198. No. 2. Pp. 88–100.
8. **Moshnikov V.A., Gracheva I.E., Pshchelko**

- N.S., Anchkov M.G., Levine K.L.** Investigating Properties of Gas-Sensitive Nanocomposites Obtained via Hierarchical Self-Assembly // Smart Nanoobjects: Synthesis and Characterization. New York: Nova Science Publishers, 1999. 569 p.
9. **Moshnikov V.A., Gracheva I.E., Lenshin A.S., Spivak Y.M., Anchkova M.G., Kuznetsov V.V., Olchowik J.M.** Porous silicon with embedded metal oxides for gas sensing applications // J. of Non-Crystalline Solids. 2012. Vol. 358. No. 3. Pp. 590–595.
10. **Liu Y.J., Si G.Y., Leong E.S.P.** Optically tunable plasmonic color filters. Applied Physics A. 2012. Vol. 107. No. 1. Pp. 49–54.
11. **Liu Y.J., Leong E.S.P., Wang B. et al.** Optical transmission enhancement and tuning by overlying liquid crystals on a gold film with patterned nanoholes // Plasmonics. 2011. Vol. 6. No. 4. Pp. 659–664.
12. **Jing L., Haoyuan C., Kai T., Lingqi K.** Plasmonic Filters Based on Lithographically Patterned Hexagonally Arranged Triangular Silver Nanoparticles Array // Advances in Materials Science and Engineering. 2015. Vol. 7. No. 21. Pp. 367–376.

REFERENCES

1. **Lapshin B.A.** *Opticheskie geterostruktury. Novaya teoriya i raschet* [Optical heterostructures. Novel theory and calculations]. St. Petersburg:

- BKhV-Petersburg Publ., 2012, 480 p. (rus)
2. **Ploem J., Tanke J.** *Introduction to fluorescence microscopy*, New York, Oxford University Press,

1987, 576 p.

3. **Bibette J.** Monodisperse ferrofluid emulsions. *Journal Magn. Magn. Mater.*, 1993, Vol. 122, No. 2, Pp. 37–42.

4. **Unno H., Imai K., Muramoto S.** Dissolution Reaction Effect on Porous-Silicon Density. *Journal of the Electrochemical Society*, 1987, Vol. 243, No. 24, Pp. 358–362.

5. **Mayergoyz I.D.** *Plasmon Resonances in Nanoparticles*. Singapore: World Scientific Publishing Co Pte. Ltd., 2013, 325 p.

6. **Fu Y.Q., Zhu S.L., Zhou X.L., Zhao W.** Rhombic silver nanoparticles array-based plasmonic filter. *International Journal of Modern Physics B*, 2011, Vol. 25, No. 19, Pp. 2557–2566.

7. **Ghauharali R.I., Brakenhoff G.J.** Fluorescence photobleaching-based image standardization for fluorescence microscopy. *Journal of Microscopy*, 2001, Vol. 198, No. 2, Pp. 88–100.

8. **Moshnikov V.A., Gracheva I.E., Pshchelko N.S., Anchkov M.G., Levine K.L.** Investigating Properties of Gas-Sensitive Nanocomposites Obtained via Hierarchical Self-Assembly in book:

Smart Nanoobjects: Synthesis and Characterization. New York: Nova Science Publishers, 1999, 569 p.

9. **Moshnikov V.A., Gracheva I.E., Lenshin A.S., Spivak Y.M., Anchkova M.G., Kuznetsov V.V., Olchowik J.M.** Porous silicon with embedded metal oxides for gas sensing applications. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2012, Vol. 358, No. 3, Pp. 590–595.

10. **Liu Y.J., Si G.Y., Leong E.S.P.** Optically tunable plasmonic color filters. *Applied Physics A*, 2012, Vol.107, No. 1, Pp. 49–54.

11. **Liu Y.J., Leong E.S.P., Wang B. et al.** Optical transmission enhancement and tuning by overlying liquid crystals on a gold film with patterned nanoholes. *Plasmonics*, 2011, Vol. 6, No. 4, Pp. 659–664.

12. **Jing L., Haoyuan C., Kai T., Lingqi K.** Plasmonic Filters Based on Lithographically Patterned Hexagonally Arranged Triangular Silver Nanoparticles Array. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, Vol. 7, No. 21, Pp. 367–376.

СМЕРДОВ Ростислав Сергеевич – аспирант кафедры общей и технической физики факультета фундаментальных и гуманитарных дисциплин Национального минерально-сырьевого университета «Горный».

199106, Россия, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2.

E-mail: rostofan@gmail.com

SMERDOV Rostislav S. *National Mineral Resources University.*

199106, 2, line 21 V.O., St. Petersburg, Russia.

E-mail: rostofan@gmail.com

ЛОБОДА Вера Владимировна – доцент кафедры интегральной электроники Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, кандидат физико-математических наук.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: vera_loboda@mail.ru

LOBODA Vera V. *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

E-mail: vera_loboda@mail.ru

СПИВАК Юлия Михайловна – доцент кафедры микро- и нанoeлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина), кандидат физико-математических наук.

197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д. 5.

E-mail: ymkangeeva@yandex.ru

SPIVAK Yulia M. *St. Petersburg Electrotechnical University “LETI”.*

197376, Professora Popova Str. 5, St. Petersburg, Russia.

E-mail: ymkangeeva@yandex.ru

МОШНИКОВ Вячеслав Алексеевич – профессор кафедры микро- и нанoeлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина), доктор физико-математических наук.


197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д. 5.

E-mail: vamoshnikov@mail.ru

MOSHNIKOV Vyacheslav A. St. Petersburg Electrotechnical University “LETI”.

197376, Professora Popova Str. 5, St. Petersburg, Russia.

E-mail: vamoshnikov@mail.ru



Моделирование вычислительных,
телекоммуникационных, управляющих
и социально-экономических систем

DOI: 10.5862/JCSTCS.247.3

УДК 621.0:519.873

В.Я. Копп, М.В. Загорёнов, Ю.Е. Обжерин, М.Ю. Ларин

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ТРАЕКТОРИЙ
ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ПОЛУМАРКОВСКОЙ МОДЕЛИ СТРУКТУРЫ
«ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЯЧЕЙКА – НАКОПИТЕЛЬ»**

V.Ya. Kopp, M.V. Zamoryonov, Yu.E. Objerin, M.Yu. Larin

**USING THE METHOD OF TRAJECTORIES FOR CONSTRUCTING
A SEMI-MARKOV MODEL OF A ‘TECHNOLOGICAL CELL – STORAGE
DEVICE’ STRUCTURE**

Приведена и доказана теорема о функциях распределения времени пребывания системы в состояниях с учетом повторных попаданий. Доказательство теоремы базируется на теореме о математическом ожидании времени пребывания системы в заданном подмножестве состояний. Теорема может использоваться только для дискретных систем. В случае системы с непрерывным фазовым пространством состояний необходимо воспользоваться алгоритмом фазового укрупнения для приведения системы к дискретному виду. Приведен метод траекторий, позволяющий определять функцию распределения времени пребывания системы в подмножестве состояний. Данный метод позволяет не приближенно, а точно находить вид функции распределения времени пребывания системы в подмножестве состояний в области изображений по Лапласу. На конкретном примере функционирования структуры «технологическая ячейка – накопитель» с учетом надежности как ячейки, так и накопителя приведено сравнение метода траекторий и классического метода, использующего интегральные уравнения марковского восстановления.

ПОЛУМАРКОВСКАЯ СИСТЕМА; МЕТОД ТРАЕКТОРИЙ; ПОВТОРНЫЕ ПОПАДАНИЯ.

The article presents and proves a theorem about the distribution functions for the times that the system spends in specific states taking into account the repeated enterings. The proof is based on the theorem of the mathematical expectation of the time the system spends in a given subset of states. The theorem can be used only for discrete systems. In the case of a system with a continuous phase space of states it is necessary to use the algorithm phase consolidation in order to bring the system to a discrete form. The trajectories method that allows to determine the distribution function for the time the system spends in a subset of states is presented. The current method gives the opportunity to not approximately but exactly determine the form of the distribution function for the time the system spends in a subset of states in the area of Laplace images. The trajectories method is compared to the classical method using integral Markov renewal equations on a specific example of the ‘technological cell – storage device’ structure with regard to the reliability of both the cell and the storage drive.

SEMI-MARKOV SYSTEM; METHOD OF TRAJECTORIES; REPEATED ENTERINGS.

В настоящее время аппарат полумарковских систем является мощным сред-

ством моделирования стохастических объектов, позволяющим учесть последствие

в случайных процессах. Однако при необходимости определения функции распределения (ФР) времени пребывания системы в заданном подмножестве состояний получить точное решение не удастся, т. к. для решения этой задачи используются уравнения марковского восстановления (УМВ), система которых представляет собой уравнения Вольтера второго рода с полустационарным ядром [1–9]. Эти уравнения решаются, как правило, методом последовательных приближений, получить их точное решение сложно. Поэтому практически не разработан аппарат определения ФР времени пребывания системы в состояниях с учетом повторных попаданий за время их пребывания в заданном подмножестве.

Цель статьи – построение полумарковской модели структуры «технологическая ячейка – накопитель» на основе метода траекторий, позволяющей точно определять ФР времени пребывания системы в подмножестве работоспособных состояний.

Рассмотрим полумарковскую (ПМ) систему с общим фазовым пространством состояний M . Выделим в фазовом пространстве состояний M ПМ процесса два подмножества M_+ и M_- , таких, что $M_+ \cup M_- = M$. В дальнейшем будем говорить только про подмножество M_+ , так как все сказанное будет верно и для подмножества M_- . Время однократного пребывания в состояниях $S_i \in M_+$ является случайной величиной (СВ) α_i , имеющей математические ожидания m_i , функции $F_i(t)$ и плотности $f_i(t)$ распределения, с изображениями в комплексной области $F_i(s)$ и $f_i(s)$ соответственно. СВ θ_Σ – время пребывания системы в подмножестве M_+ , имеющая математическое ожидание T_+ . Время многократного пребывания системы в состоянии $S_i \in M_+$ за счет повторных попаданий в них за время θ_Σ является СВ θ_i , имеющей математические ожидания m_i^0 , функции $F_i^0(t)$ и плотности $f_i^0(t)$ распределения, с изображениями в комплексной области $F_i^0(s)$ и $f_i^0(s)$ соответственно. Описываемому ПМ процессу соответствует распределение вложенной цепи Маркова (ВЦМ), характеризующееся удельными частотами ρ_i попадания в каждое из состояний $S_i \in M$, и вероятностями

переходов P_{ij} из состояний $S_i \in M$ в состояния $S_j \in M$. Прямой переход из M_+ в M_- могут иметь не все состояния $S_i \in M_+$, тогда целесообразно выделить подмножество $E \subset M_+$ состояний $S_e \in E$ множества M_+ , из которых возможен прямой переход во множество M_- .

Введем определение:

Траектория – множество состояний, в которых система должна побывать, чтобы выйти из подмножества M_+ в M_- (или наоборот), причем $M_+ \cup M_- = M$, где M – все фазовое пространство состояний.

Траектория пребывания системы в подмножестве M_+ начинается в состоянии, в которое есть прямой переход из подмножества M_- . Заканчивается такая траектория состоянием, из которого существует один или несколько прямых переходов в подмножество M_- .

Траектория выхода системы из подмножества M_+ начинается в любом состоянии этого подмножества и заканчивается состоянием, из которого есть один или несколько прямых переходов в подмножество M_- .

При решении поставленной задачи используется теорема о ФР времени пребывания системы в состояниях с учетом повторных попаданий при условии, что система попадает в исследуемое состояние не менее одного раза.

Теорема о ФР времени пребывания системы в состояниях с учетом повторных попаданий. Если в дискретной регенерирующей эргодической ПМ системе с известным стационарным распределением с состояниями $S_i \in M_+$ известны функции $F_i(t)$ и плотности $f_i(t)$ распределения, то функции $F_i^0(s)$ и плотности $f_i^0(s)$ распределения времени θ_i пребывания системы в состояниях S_i этой системы с учетом повторных попаданий в него при условии, что система попадает в это состояние не менее одного раза, в области изображений равны:

$$F_i^0(s) = \frac{F_i(s)}{c_i - (c_i - 1)f_i(s)},$$

$$f_i^0(s) = \frac{f_i(s)}{c_i - (c_i - 1)f_i(s)},$$
(1)

а в области оригинала они имеют вид:

$$\begin{aligned} F_i^0(t) &= \frac{1}{c_i} F_i(t) + \frac{1}{c_i} \sum_{m=1}^{\infty} \left(1 - \frac{1}{c_i}\right)^m F_i^{(*)m}(t), \\ f_i^0(t) &= \frac{1}{c_i} \cdot f_i(t) + \frac{1}{c_i} \sum_{m=1}^{\infty} \left(1 - \frac{1}{c_i}\right)^m f_i^{(*)m+1}(t), \end{aligned} \quad (2)$$

где * – знак операции свертки; $c_i = \frac{m_i^0}{m_i}$ – коэффициент увеличения времени пребывания системы в состояниях $S_i \in M_+$ за счет повторных попаданий в него; m_i – математическое ожидание пребывания системы в состоянии S_i при однократном попадании в него; m_i^0 – математическое ожидание пребывания системы в состоянии S_i с учетом повторных попаданий в него, определяемое на основании теоремы [1]:

$$m_i^0 = m_i \cdot \frac{\rho_i}{\sum_{e \in E \subset M_+} \sum_{j \in M_-} P_{ej} \rho_e}.$$

Доказательство. Время пребывания системы в состояниях ($S_i \in M_+$) увеличивается за счет повторных попаданий системы с какой-то вероятностью в эти состояния за время пребывания всей системы в подмножестве M_+ , и больше ни за счет чего оно увеличиться не может, что очевидно. Но это означает, что число попаданий системы подчиняется геометрическому закону распределения с вероятностью P_i того, что система выйдет из этого состояния, а вероятность того, что останется в нем $1 - P_i$. При этом граф, описывающий поведение системы в данном состоянии при известной ФР $F_i(t)$ времени пребывания в данном состоянии S_i , имеет вид, представленный на рис. 1.

Приняты следующие условные обозначения: $S_{i,0}$ – мгновенное состояние соответствует выходу системы из состояния S_i ;

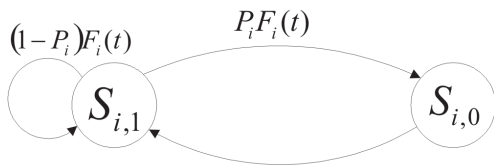


Рис. 1. Граф состояний, соответствующих геометрическому распределению

$S_{i,1}$ – исследуемое состояние S_i , суммарное время пребывания в котором определяется; P_i – вероятность перехода системы из $S_{i,1}$ в $S_{i,0}$; $(1 - P_i)$ – вероятность повторного попадания системы в состояние $S_{i,1}$; $F_i(t)$ – ФР СВ α_i , имеющей м.о. m_i .

По данному графу составляем УМВ:

$$F_i^0(t) = (1 - P_i) \int_0^t f_i(t-s) F_i^0(s) ds + P_i F_i(t). \quad (3)$$

Итерируя полученное уравнение (3), имеем [10, 11]:

$$\begin{aligned} F_i^0(t) &= P_i \cdot F_i(t) + P_i \sum_{m=1}^{\infty} (1 - P_i)^m F_i^{(*)m}(t) = \\ &= P_i F_i(t) + P_i \sum_{m=1}^{\infty} (1 - P_i)^m f_i^{(*)m}(t) * F_i(t). \end{aligned} \quad (4)$$

Плотность распределения $f_i^k(t)$ имеет вид:

$$f_i^0(t) = P_i \cdot f_i(t) + P_i \sum_{m=1}^{\infty} (1 - P_i)^m f_i^{(*)m+1}(t).$$

Здесь неизвестной величиной, которую необходимо определить, является P_i . Известно, что при геометрическом законе распределения $m_i^0 = \frac{m_i}{P_i}$, откуда следует:

$$P_i = \frac{m_i}{m_i^0}. \quad (5)$$

Найдем m_i^0 . По известной теореме [1] можно точно определить T_+ . Для дискретных состояний формула имеет вид:

$$T_+ = \frac{\sum_{i \in M_+} m_i \rho_i}{\sum_{e \in E \subset M_+} \sum_{j \in M_-} P_{ej} \rho_e} = \sum_{e \in M_+} m_i \frac{\rho_i}{\sum_{e \in E \subset M_+} \sum_{j \in M_-} P_{ej} \rho_e}.$$

Тогда

$$m_i^0 = m_i \cdot \frac{\rho_i}{\sum_{e \in E \subset M_+} \sum_{j \in M_-} P_{ej} \rho_e}. \quad (6)$$

Введем коэффициент c_i увеличения времени пребывания системы в состояниях S_i , равный

$$c_i = \frac{\rho_i}{\sum_{e \in E \subset M_+} \sum_{j \in M_-} P_{ej} \rho_e}.$$

Тогда $m_i^0 = m_i \cdot c_i$, а вероятность P_i определяется из условия обеспечения уве-

личения m_i до величины m_i^0 , откуда следует, что искомая вероятность P_i , исходя из (5), равна

$$P_i = \frac{m_i}{m_i^0} = \frac{1}{c_i}. \quad (7)$$

Подставляя (7) в (4), получаем (2).

Применяя к формуле (4) преобразование Лапласа, получим:

$$\begin{aligned} F_i^0(s) &= P_i F(s) + P_i \sum_{m=1}^{\infty} (1 - P_i)^m f_i^m(s) F(s) = \\ &= P_i F(s) + P_i F(s) \sum_{m=1}^{\infty} (1 - P_i)^m f_i^m(s) = \quad (8) \\ &= P_i F_i(s) \sum_{m=0}^{\infty} (1 - P_i)^m f_i^m(s). \end{aligned}$$

Полученное выражение представляет собой бесконечно убывающую геометрическую прогрессию. Возьмем предел выражения $\sum_{m=0}^{\infty} (1 - P_i)^m f_i^m(s)$:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{m=0}^n (1 - P_i)^m f_i^m(s) = \frac{1}{1 - (1 - P_i) f_i(s)}.$$

Тогда выражение (8) будет иметь вид:

$$F_i^0(s) = \frac{P_i F_i(s)}{1 - (1 - P_i) f_i(s)}. \quad (9)$$

Соответственно изображение ПР $f_i^0(t)$ будет иметь вид:

$$f_i^0(s) = \frac{s P_i F_i(s)}{1 - (1 - P_i) f_i(s)} = \frac{P_i f_i(s)}{1 - (1 - P_i) f_i(s)}. \quad (10)$$

Подставляя (7) в (9) и (10), получим:

$$F_i^0(s) = \frac{\frac{1}{c_i} F_i(s)}{1 - \left(1 - \frac{1}{c_i}\right) f_i(s)} = \frac{F_i(s)}{c_i - (c_i - 1) f_i(s)},$$

$$f_i^0(s) = \frac{\frac{1}{c_i} f_i(s)}{1 - \left(1 - \frac{1}{c_i}\right) f_i(s)} = \frac{f_i(s)}{c_i - (c_i - 1) f_i(s)}.$$

Теорема доказана.

Следствие 1. В случае, когда система при попадании в подмножество M_+ может не попадать в состояние $S_i \in M_+$, коэффициент c_i увеличения времени пребывания

системы в состояниях S_i будет равен:

$$c_i = \frac{m_i^0}{P_i \cdot m_i},$$

где P_i – вероятность попадания системы в состояние S_i , за время пребывания в подмножестве M_+ .

Следствие 2. Время θ_k^T пребывания системы в траектории равно сумме всех СВ θ_i , $\theta_k^T = \sum_1^n \theta_i$, а значит, ФР F_k^T времени θ_k^T – пребывания системы в траектории, равно последовательной свертке всех ФР F_i^0 :

$$F_k^T = F_0^0 * F_1^0 * F_2^0 * \dots * F_i^0 * \dots * F_n^0,$$

где n – число состояний, входящих в траекторию.

Следствие 3. На основании формулы полной вероятности выражение для определения ФР θ_Σ времени пребывания системы в подмножестве M_+ имеет вид:

$$\begin{aligned} F_\Sigma^T &= P_1^T \cdot F_1^T + P_2^T \cdot F_2^T + P_3^T \cdot F_3^T + \dots \\ &+ P_i^T \cdot F_i^T + \dots + P_n^T \cdot F_n^T, \end{aligned}$$

где P_i^T – вероятность реализации i -й траектории; F_i^T – ФР времени пребывания системы в i -й траектории.

Следствие 4. Исходя из следствия 3 данной теоремы, взвешенная сумма всех ФР времени пребывания системы в траекториях выхода из состояния $S_i \in M_+$ является ФР времени пребывания системы в подмножестве M_+ с начальным состоянием S_i , а значит, представляет собой решение уравнения марковского восстановления для этого состояния.

В работах [12, 13] предложен метод траекторий для определения ФР времени пребывания системы в подмножестве состояний с учетом повторных попаданий в них. Метод базируется на теореме о времени пребывания системы в состояниях подмножества с учетом повторных попаданий в них при условии, что система попадает в исследуемое состояние заданного подмножества хотя бы один раз при каждом попадании в это подмножество.

Метод траекторий

Шаг 1. Переход от системы с непре-

рывными состояниями к системе с дискретными состояниями $S_i \in M_+$ на основании алгоритма фазового укрупнения [2]. При этом определяются ФР F_i^t времени пребывания системы в новых дискретных состояниях, вероятности перехода P_{ij} из этих состояний в другие состояния (переходные вероятности) удельные частоты ρ_i попадания в состояния (стационарное распределение ВЦМ) и стационарные вероятности пребывания в состояниях (стационарное распределение ПМ процесса). Процедура проводится известными методами моделирования ПМ систем.

Шаг 2. Выделение всех возможных траекторий перехода системы из подмножества M_+ в подмножество M_- . Причем каждое состояние системы входит в одну или несколько траекторий сразу.

Шаг 3. Определяются вероятности P_i попадания в состояния $S_i \in M_+$ хотя бы один раз за время пребывания системы в подмножестве M_+ .

Шаг 4. На основании изложенной выше теоремы заменяется время пребывания в состояниях α_i на θ_i : для них определяются плотности и ФР времени пребывания системы в состояниях $S_i \in M_+$ с учетом повторных возвратов в соответствии с приведенной теоремой, для чего определяются коэффициенты c_i увеличения времени пребывания системы в состояниях.

Шаг 5. Выделяются траектории. В соответствии с теоремой о полной вероятности [14], определяются вероятности P_k^T реализации каждой из траекторий, на основании переходных вероятностей вложенной цепи Маркова.

Шаг 6. В соответствии со следствием 2 приведенной выше теоремы, находим ФР времени пребывания системы в каждой из траекторий.

Шаг 7. Находим ФР времени пребывания в M_+ вне зависимости от начального состояния, которая определяется, как взвешенная сумма (смесь) ФР каждой из траекторий. Коэффициентами смеси служат найденные на пятом шаге вероятности P_k^T реализации траекторий.

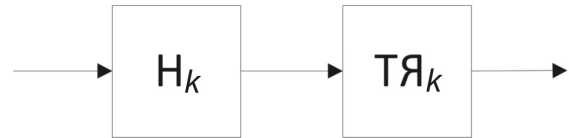


Рис. 2. Структура Н-ТЯ, работающая на прием продукции

Рассмотрим на конкретном примере реализацию предлагаемого метода моделирования.

Формализуем постановку задачи, для чего рассмотрим структуру «технологическая ячейка – накопитель» [15–17] с учетом отказов не только ячейки, но и накопителя (рис. 2).

Пусть известны ФР $F_{01}(t)$ и $F_{10}(t)$ случайных величин ξ_1 и η_1 , которыми являются время наработки на отказ и восстановления ТЯ соответственно, а также ФР $F_{03}(t)$ и $F_{30}(t)$ случайных величин ξ_3 и η_3 , являющихся временем наработки на отказ и восстановления накопителя. Кроме этого, известна ФР $F_{12}(t)$ случайной величины ξ_2 , являющейся временем резерва.

Введены допущения: вероятностью одновременного отказа ячейки и накопителя пренебрегаем ввиду малой вероятности этого события; ФР $F_{01}(t)$ и $F_{03}(t)$ считаются распределенными экспоненциально. Необходимо определить ФР времени наработки на отказ и восстановления участка в целом, т. е. эквивалентно заменить его простейшим элементом, имеющим два факторных состояния.

Решение поставленной задачи с использованием приведенной теоремы осуществляется в следующей последовательности.

1. Построим граф состояний исследуемой системы (рис. 3), учитывая, что она является полумарковской системой с непрерывными состояниями.

Состояния системы: S_0 – ТЯ исправна, накопитель исправен, временной задел в накопителе ξ_2 , состояние работоспособное; S_1 – ТЯ отказала, накопитель исправен, временной задел в накопителе ξ_2 , состояние работоспособное; S_{2x} – ТЯ в отказе, накопитель исправен, резерв времени израсходован, поскольку запас продукции в

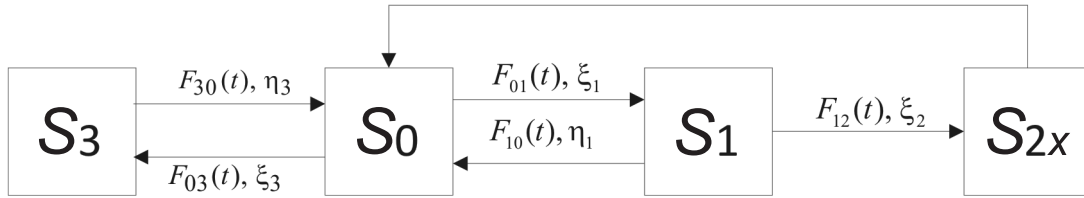


Рис. 3. Граф состояний системы

накопителе исчерпан ($\xi_2 = 0$), состояние не работоспособное; S_3 – ТЯ исправна, накопитель отказал, состояние не работоспособное.

2. Определим время пребывания системы в состояниях и ФР времени пребывания системы в состояниях.

Время пребывания в состояниях S_0 , S_1 , S_{2x} и S_3 определим из выражений:

$$\theta_0 = (\xi_1 \wedge \xi_3); \theta_1 = (\eta_1 \wedge \xi_2);$$

$$\theta_{2x} = x; \theta_3 = \eta_2,$$

где \wedge – знак, обозначающий минимум случайных величин.

Тогда функции распределения времени пребывания в состояниях имеют следующий вид:

$$\text{для состояния } S_0: \bar{F}_0(t) = \bar{F}_{01}(t) \cdot \bar{F}_{03}(t);$$

$$\text{для состояния } S_1: \bar{F}_1(t) = \bar{F}_{10}(t) \cdot \bar{F}_{12}(t);$$

$$\text{для состояния } S_{2x}: F_{2x}(t) = 1_x(t),$$

$$\text{где } 1_x(t) = \begin{cases} 0, & t < x; \\ 1, & t \geq x. \end{cases}$$

$$\text{для состояния } S_3: F_3(t) = F_{30}(t).$$

3. Найдем вероятности перехода ВЦМ:

$$\begin{cases} P_0^1 \{ \xi_1 < \xi_3 \} = \int_0^\infty F_{01}(z) f_{03}(z) dz \\ P_0^3 \{ \xi_1 > \xi_3 \} = \int_0^\infty F_{03}(t) f_{01}(t) dt \\ P_1^0 = \int_0^\infty F_{10}(t) f_{12}(t) dt \\ P_1^{2x} = \int_0^\infty f_{10}(x+t) f_{12}(t) dt \\ P_{2x}^0 = 1 \\ P_3^0 = 1 \end{cases} \quad (11)$$

4. Определим стационарное распреде-

ление ВЦМ, позволяющее при необходимости найти стационарное распределение полумарковских процессов (ПМП).

Стационарное распределение $\rho(x)$ вложенной цепи Маркова определяется по формуле $\rho(x) = \int p(x, y) \rho(y) dy$, где $p(x, y)$ – плотность вероятности перехода вложенной цепи Маркова.

Используя систему (11), запишем систему уравнений для определения стационарного распределения вложенной $\rho(x)$ цепи Маркова:

$$\begin{cases} \rho_0 = \int_0^\infty \rho_{2x} \cdot 1_x(t) dx + \rho_3 \cdot 1 + \\ + \rho_1 \int_0^\infty F_{10}(w) f_{12}(w) dw \\ \rho_1 = \rho_0 \int_0^\infty F_{01}(z) f_{03}(z) dz = \rho_0 P \{ \xi_1 < \xi_3 \}. \\ \rho_{2x} = \rho_1 \int_0^\infty f_{10}(x+t) f_{12}(t) dt \\ \rho_3 = \rho_0 \int_0^\infty F_{03}(u) f_{01}(u) du \end{cases} \quad (12)$$

Условие нормировки:

$$\begin{aligned} & \int_0^\infty \rho_{2x} dx + \rho_3 + \rho_1 \int_0^\infty F_{10}(w) f_{12}(w) dw + \\ & + \rho_0 \int_0^\infty F_{01}(z) f_{03}(z) dz + \\ & + \int_0^\infty \rho_1 \int_0^\infty f_{10}(x+t) f_{12}(t) dt dx + \\ & + \rho_0 \int_0^\infty F_{03}(u) f_{01}(u) du = 1. \end{aligned} \quad (13)$$

Выразим ρ_{2x} через ρ_0 , ρ_1 и ρ_3 :

$$\rho_{2x} = \rho_1 \int_0^\infty f_{10}(x+t) f_{12}(t) dt =$$

$$= \rho_0 \int_0^{\infty} F_{01}(z) f_{03}(z) dz \int_0^{\infty} f_{10}(x+t) f_{12}(t) dt.$$

Тогда условие нормировки (13) примет вид:

$$\begin{aligned} & \int_0^{\infty} \rho_0 \int_0^{\infty} F_{01}(z) f_{03}(z) dz \int_0^{\infty} f_{10}(x+t) f_{12}(t) dt dx + \\ & \quad + \rho_0 \int_0^{\infty} F_{03}(u) f_{01}(u) du + \\ & \quad + \rho_0 \int_0^{\infty} F_{01}(z) f_{03}(z) dz \int_0^{\infty} F_{10}(w) f_{12}(w) dw + \\ & \quad + \rho_0 \int_0^{\infty} F_{01}(z) f_{03}(z) dz + \\ & + \int_0^{\infty} \rho_0 \int_0^{\infty} F_{01}(z) f_{03}(z) dz \int_0^{\infty} f_{10}(x+t) f_{12}(t) dt dx + \\ & \quad + \rho_0 \int_0^{\infty} F_{03}(u) f_{01}(u) du = 1. \end{aligned}$$

Решая (12), получим:

$$\left\{ \begin{aligned} \rho_0 &= \frac{1}{2 + \int_0^{\infty} F_{01}(z) f_{03}(z) dz \int_0^{\infty} f_{12}(t) \bar{F}_{10}(t) dt}; \\ \rho_1 &= \frac{\int_0^{\infty} F_{01}(z) f_{03}(z) dz}{2 + \int_0^{\infty} F_{01}(z) f_{03}(z) dz \int_0^{\infty} f_{12}(t) \bar{F}_{10}(t) dt}; \\ \rho_{2x} &= \frac{\int_0^{\infty} F_{01}(z) f_{03}(z) dz \int_0^{\infty} f_{10}(x+t) f_{12}(t) dt}{2 + \int_0^{\infty} F_{01}(z) f_{03}(z) dz \int_0^{\infty} f_{12}(t) \bar{F}_{10}(t) dt}; \\ \rho_3 &= \frac{\int_0^{\infty} \bar{F}_{01}(z) f_{03}(z) dz}{2 + \int_0^{\infty} F_{01}(z) f_{03}(z) dz \int_0^{\infty} f_{12}(t) \bar{F}_{10}(t) dt}. \end{aligned} \right.$$

Можно выразить значения ρ_2 , ρ_1 , и ρ_3 через ρ_0 :

$$\begin{aligned} \rho_1 &= \rho_0 \int_0^{\infty} F_{01}(z) f_{03}(z) dz, \\ \rho_2 &= \rho_0 \int_0^{\infty} F_{01}(z) f_{03}(z) dz \int_0^{\infty} f_{10}(x+t) f_{12}(t) dt, \\ \rho_3 &= \rho_0 \int_0^{\infty} F_{03}(u) f_{01}(u) du. \end{aligned}$$

5. Используя алгоритм фазового укрупнения [2] перейдем от системы с непрерывными состояниями к системе с дискретными состояниями.

Для нахождения функции распределения времени наработки на отказ (времени непрерывной работы системы) необходимо воспользоваться стационарным алгоритмом фазового укрупнения устойчивых состояний [2] для того, чтобы перейти от системы с непрерывными состояниями к системе с дискретными состояниями.

Сначала найдем стационарное распределение ВЦМ $\hat{\rho}_2$ для укрупненного состояния S_2 :

$$\begin{aligned} \hat{\rho}_2 &= \int_0^{\infty} \rho_{2x} dx = \\ &= \frac{\int_0^{\infty} \int_0^{\infty} F_{01}(z) f_{03}(z) dz \int_0^{\infty} f_{10}(x+t) f_{12}(t) dt dx}{2 + \int_0^{\infty} F_{01}(z) f_{03}(z) dz \int_0^{\infty} f_{12}(t) \bar{F}_{10}(t) dt} = \\ &= \frac{\int_0^{\infty} F_{01}(z) f_{03}(z) dz \int_0^{\infty} \bar{F}_{10}(t) f_{12}(t) dt}{2 + \int_0^{\infty} F_{01}(z) f_{03}(z) dz \int_0^{\infty} f_{12}(t) \bar{F}_{10}(t) dt}. \end{aligned}$$

Тогда стационарное распределение ВЦМ примет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} \rho_0 &= \frac{1}{2 + \int_0^{\infty} F_{01}(z) f_{03}(z) dz \int_0^{\infty} f_{12}(t) \bar{F}_{10}(t) dt}; \\ \rho_1 &= \frac{\int_0^{\infty} F_{01}(z) f_{03}(z) dz}{2 + \int_0^{\infty} F_{01}(z) f_{03}(z) dz \int_0^{\infty} f_{12}(t) \bar{F}_{10}(t) dt}; \\ \rho_2 &= \frac{\int_0^{\infty} F_{01}(z) f_{03}(z) dz \int_0^{\infty} f_{12}(t) \bar{F}_{10}(t) dt}{2 + \int_0^{\infty} F_{01}(z) f_{03}(z) dz \int_0^{\infty} f_{12}(t) \bar{F}_{10}(t) dt}; \\ \rho_3 &= \frac{\int_0^{\infty} \bar{F}_{01}(z) f_{03}(z) dz}{2 + \int_0^{\infty} F_{01}(z) f_{03}(z) dz \int_0^{\infty} f_{12}(t) \bar{F}_{10}(t) dt}. \end{aligned} \right.$$

Следующим шагом является определе-

ние вероятностей переходов укрупненной системы:

$$\hat{P}_1^2 = \frac{\int_0^{\infty} p_1^{2x} \rho_1 dx}{\rho_1} = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} f_{10}(x+t) f_{12}(t) dt dx = \int_0^{\infty} \bar{F}_{10}(t) f_{12}(t) dt.$$

Тогда вероятности переходов примут вид:

$$\begin{cases} P_0^1 \{ \xi_1 < \xi_3 \} = \int_0^{\infty} f_{01}(z) \bar{F}_{03}(z) dz; \\ P_0^3 \{ \xi_1 > \xi_3 \} = \int_0^{\infty} \bar{F}_{01}(t) f_{03}(t) dt; \\ P_1^0 = \int_0^{\infty} f_{10}(t) \bar{F}_{12}(t) dt; \\ P_1^2 = \int_0^{\infty} \bar{F}_{10}(x) f_{12}(t) dt; \\ P_2^0 = 1; \\ P_3^0 = 1. \end{cases}$$

Найдем ФР времени пребывания системы в укрупненном дискретном состоянии S_2 :

$$\begin{aligned} \hat{F}_2(t) &= \frac{\int_0^{\infty} F_{2x}(t) \rho_{2x} dx}{\rho_2} = \\ &= \frac{\int_0^{\infty} 1_x(t) \int_0^{\infty} F_{01}(z) f_{03}(z) dz \int_0^{\infty} f_{10}(x+y) f_{12}(y) dy dx}{\int_0^{\infty} F_{01}(z) f_{03}(z) dz \int_0^{\infty} \bar{F}_{10}(y) f_{12}(y) dy} = \\ &= \frac{\int_0^{\infty} F_{01}(z) f_{03}(z) dz \int_0^{\infty} [\bar{F}_{10}(t) - \bar{F}_{10}(t+y)] f_{12}(y) dy}{\int_0^{\infty} F_{01}(z) f_{03}(z) dz \int_0^{\infty} \bar{F}_{10}(y) f_{12}(y) dy}. \end{aligned}$$

ФР времени пребывания системы в укрупненном дискретном состоянии S_2 имеет вид:

$$\hat{F}_2(t) = 1 - \frac{\int_0^{\infty} F_{01}(z) f_{03}(z) dz \int_0^{\infty} \bar{F}_{10}(t+y) f_{12}(y) dy}{\int_0^{\infty} F_{01}(z) f_{03}(z) dz \int_0^{\infty} \bar{F}_{10}(y) f_{12}(y) dy}.$$

6. Определим вероятности P_i попадания системы в состояния S_i на основании вероятностей перехода ВЦМ подмножества M_+

$$P_0 = 1; P_1 = P_0^1.$$

7. Используя приведенную выше теорему о ФР времени пребывания системы в состояниях с учетом повторных попаданий, определим ФР $F_0^0(t)$ и $F_1^0(t)$ времени пребывания в состояниях S_0 и S_1 с учетом повторных попаданий в них за время пребывания в подмножестве M_+ , при условии, что система хотя бы один раз попадает в них:

$$F_0^0(s) = \frac{F_0(s)}{c_0 - (c_0 - 1)f_0(s)};$$

$$F_1^0(s) = \frac{F_1(s)}{c_1 - (c_1 - 1)f_1(s)},$$

где

$$c_0 = \frac{m_0^0}{P_0 m_0}, \quad c_1 = \frac{m_1^0}{P_1 m_1}.$$

8. Выделим траектории. В соответствии с теоремой о полной вероятности, определим вероятности P_k^T реализации каждой из траекторий на основании переходных вероятностей вложенной цепи Маркова:

$$T_1 = \{S_0\}; T_2 = \{S_0, S_1\};$$

$$P_1^T = P_0^3; P_2^T = P_0^1.$$

9. Определим ФР времени пребывания системы в траекториях:

$$F_1^T = F_0^0; F_2^T = F_0^0 * F_1^0.$$

10. Найдем ФР времени пребывания в M_+ вне зависимости от начального состояния:

$$F_2 = P_1^T \cdot F_1^T + P_2^T \cdot F_2^T.$$

Рассмотрим пример моделирования такой системы с известными параметрами распределения случайных величин.

Исходными данными для моделирования служат функции распределения $F_{01}(t)$, $F_{03}(t)$, $F_{10}(t)$ и $F_{12}(t)$; они распределены по обобщенному закону Эрланга второго порядка с параметрами λ_{01} , λ_{03} ; μ_1 , μ_2 ; ν_1 , ν_2 соответственно, причем

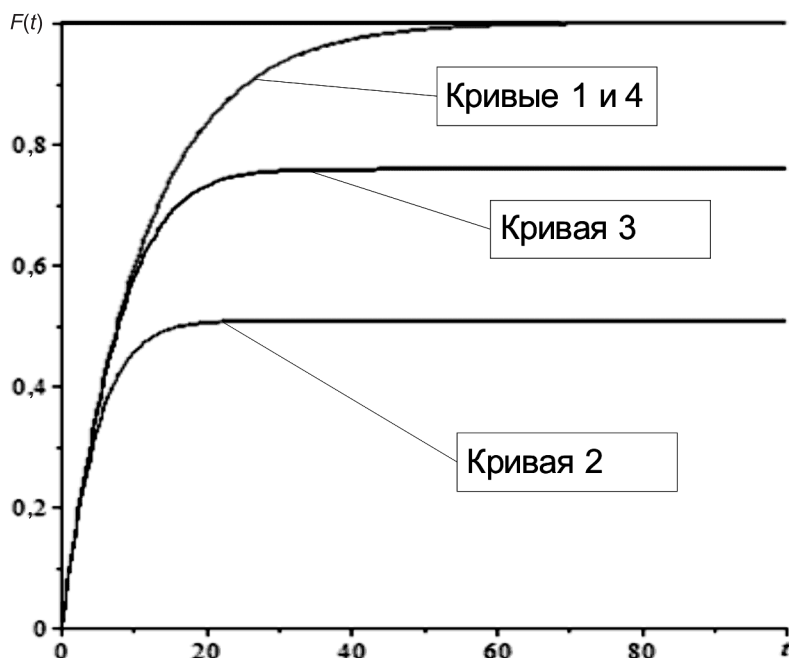


Рис. 4. Вид функций распределения
 кривая 1 – $F_{\Sigma}(t)$; кривая 2 – $\varphi_0(t)$ при одной свертке; кривая 3 – $\varphi_0(t)$ при
 трех свертках; кривая 4 – $\varphi_0(t)$ при 15 свертках

$$f_{01}(t) = \lambda_{01} e^{-\lambda_{01}t},$$

где $\lambda_{01} = 0,1250 \text{ ч}^{-1}$;

$$f_{03}(t) = \lambda_{03} e^{-\lambda_{03}t},$$

где $\lambda_{03} = 0,0625 \text{ ч}^{-1}$;

$$f_{10}(t) = \frac{\mu_1 \mu_2 (e^{-\mu_1 t} - e^{-\mu_2 t})}{\mu_2 - \mu_1},$$

где $\mu_1 = 0,3333 \text{ ч}^{-1}$, $\mu_2 = 1,000 \text{ ч}^{-1}$;

$$f_{12}(t) = \frac{\nu_1 \nu_2 (e^{-\nu_1 t} - e^{-\nu_2 t})}{\nu_2 - \nu_1},$$

где $\nu_1 = 1,1 \text{ ч}^{-1}$, $\nu_2 = 10,9 \text{ ч}^{-1}$.

Необходимо определить ФР F_{Σ} времени пребывания системы в подмножестве M_+ работоспособных состояний.

В работах [18] приведено решение для ФР времени пребывания системы в подмножестве M_+ , полученной на основании метода, использующего уравнения марковского восстановления:

$$\varphi_0(t) = \Phi(t) + \int_0^t h(t-x)\Phi(x)dx,$$

где $h(x) = \sum_{n=1}^{\infty} [(f_{01} \bar{F}_{03}) * (f_{10} \bar{F}_{12})]^{(*)n}(x)$; * – знак

операции свертки; $\Phi(t) = \int_0^t \bar{F}_{10}(y) f_{12}(y) dy \times$
 $\times \int_0^{t-y} f_{01}(x) \bar{F}_{03}(x) dx + \int_0^t \bar{F}_{01}(x) f_{03}(x) dx.$

На рис. 4 приведена функция распределения, полученная в данной статье (кривая 1), а также ФР, полученные на основании известного метода, использующего интегральные уравнения марковского восстановления.

Как видно из графика, в зависимости от количества членов ряда (кривые 2, 3, 4), эти решения стремятся к полученному точному решению.

Сравним значения математического ожидания полученной нами функции и математического ожидания, определяемого с помощью выражения [1]:

$$T_+ = \frac{\sum_{i \in M_+} m_i \rho_i}{\sum_{e \in E \subset M_+} \sum_{j \in M_-} P_{ej} \rho_j}. \quad (14)$$

Математическое ожидание полученной нами функции распределения составляет

11,2166744856 ч, тогда как определяемое с помощью выражения (14) составляет 11,2166744856 ч.

Нетрудно констатировать, что математические ожидания совпадают.

Полученные результаты подтверждают правильность предложенного метода траекторий, предназначенного для определения ФР времени пребывания системы в подмножестве состояний. В дальнейшем пла-

нируется исследовать применение метода для моделирования систем контроля и технического обслуживания в автоматизированном производстве.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по базовой части государственного задания № 2014/702 проект № 3858 и при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 15-01-05840.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Королюк В.С., Турбин А.Ф.** Процессы марковского восстановления в задачах надежности систем. Киев: Наук. думка, 1982. 236 с.

2. **Королюк В.С.** Стохастические модели систем. Киев: Наук. думка, 1989. 208 с.

3. **Obzherin Yu.E., Boyko E.G.** Semi-Markov Models. Control of Restorable Systems with Latent Failures. USA, Elsevier: Academic Press, 2015. 214 p.

4. **Peschansky A.I.** Semi-Markov Models of One-Server Loss Queues with Recurrent Input. Germany: LAP LAMPERT Academic Publishing, 2013. 138 p.

5. **Копп В.Я., Обжерин Ю.Е., Песчанский А.И.** Моделирование автоматизированных линий. Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2006. 240 с.

6. **Копп В.Я., Обжерин Ю.Е., Песчанский А.И.** Стохастические модели автоматизированных производственных систем с временным резервированием. Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2000. 284 с.

7. **Байхельт Ф., Франкен П.** Надежность и техническое обслуживание. Математический подход. Пер. с нем. М.: Радио и связь, 1988. 392 с.

8. **Райншке К., Ушаков И.А.** Оценка надежности систем с использованием графов. М.: Радио и связь, 1988. 208 с.

9. **Броди С.М., Власенко О.Н., Марченко Б.Г.** Расчет и планирование испытаний систем на надежность. Киев: Наук. думка, 1970. 192 с.

10. **Михлин С.Г.** Интегральные уравнения и их приложения к некоторым проблемам механики, математической физики и техники. М.: Гостехиздат, 1949. 380 с.

11. **Забрейко П.П., Кошелев А.И., Крас-**

носельский М.А., Михлин С.Г., Раковщик Л.С., Стеценко В.Я. Интегральные уравнения. М.: Наука, Гл. ред. Физматлит, 1968. 448 стр.

12. **Копп В.Я., Заморенов М.В., Обжерин Ю.Е., Филипович О.В.** Методы моделирования полумарковских систем // Адаптивні системи автоматичного управління: Міжвідомчий науково-технічний збірник. Дніпропетровськ, 2015. Вип. №1(26). С. 208–221.

13. **Заморёнов М.В., Копп В.Я., Обжерин Ю.Е., Заморёнова Д.В.** Апробация метода траекторий на примере моделирования процесса функционирования производственного элемента с обесценивающими отказами // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. Вып. 8. Ч. 1. С. 57–71.

14. **Вентцель Е.С.** Теория вероятностей: Учеб. для вузов. 6-е изд., стер. М.: Высш. школа, 1999. 576 с.

15. **Черкесов Г.Н.** Надежность технических систем с временной избыточностью. М.: Сов. радио, 1974. 296 с.

16. **Черкесов Г.Н.** Современное состояние теории и практики надежности многофазных систем с накопителями // Надежность и контроль качества. 1986. № 10. С. 3–7.

17. **Ганин Н.М., Катковник В.Я.** Сетевые модели функционирования ГПС с ограниченными накопителями // Машиностроение. 1988. № 2. С. 26–32.

18. **Копп В.Я., Карташов А.Л., Заморёнов М.В., Клюкин В.Ю.** Полумарковская модель структуры «технологическая ячейка – накопитель». Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2016. № 1(237). С. 16–28.

REFERENCES

1. **Korolyuk V.S., Turbin A.F.** *Protsessy markovskogo vosstanovleniya v zadachakh nadezhnosti sistem* [Markov renewal processes in systems reliability

problems]. Kiyev: Nauk. Dumka Publ., 1982, 236 p. (rus)

2. **Korolyuk V.S.** *Stokhasticheskiye modeli sistem*

[*Stochastic models of systems*]. Kiyev: Nauk. Dumka Publ., 1989, 208 p. (rus)

3. **Obzherin Yu.E., Boyko E.G.** *Semi-Markov Models. Control of Restorable Systems with Latent Failures*. USA, Elsevier: Academic Press, 2015, 214 p.

4. **Peschansky A.I.** *Semi-Markov Models of One-Server Loss Queues with Recurrent Input*. Germany: LAP LAMPERT Academic Publishing, 2013. 138 p.

5. **Kopp V.Ya., Obzherin Yu.Ye., Peschanskiy A.I.** *Modelirovaniye avtomatizirovannykh liniy [Simulation of automated production lines]*. Sevastopol: SevNTU Publ., 2006, 240 p. (rus)

6. **Kopp V.Ya., Obzherin Yu.Ye., Peschanskiy A.I.** *Stokhasticheskiye modeli avtomatizirovannykh proizvodstvennykh sistem svremennym rezervirovaniyem [Stochastic models of automated production systems to reservation time]*. Sevastopol: SevNTU Publ., 2000, 284 p. (rus)

7. **Baykhelt F., Franken P.** *Nadezhnost i tekhnicheskoye obsluzhivaniye. Matematicheskii podkhod [Reliability and Maintenance. The mathematical approach]*. Per. s nem. Moscow: Radio i svyaz Publ., 1988, 392 p. (rus)

8. **Raynshke K., Ushakov I.A.** *Otsenka nadezhnosti sistem s ispolzovaniyem grafov [Evaluation of reliability of systems using graphs]*. Moscow: Radio i svyaz Publ., 1988. 208 p. (rus)

9. **Brodi S.M., Vlasenko O.N., Marchenko B.G.** *Raschet i planirovaniye ispytaniy sistem na nadezhnost [Calculation and planning reliability tests systems]*. Kiyev: Naukova dumka Publ., 1970, 192 p. (rus)

10. **Mikhlin S.G.** *Integralnyye uravneniya i ikh prilozheniya k nekotorym problemam mekhaniki, matematicheskoy fiziki i tekhniki [Integral equations and their applications to some problems of mechanics, mathematical physics and engineering]*. Moscow: Gostekhizdat Publ., 1949, 380 p. (rus)

11. **Zabreyko P.P., Koshelev A.I., Krasnoselskiy M.A., Mikhlin S.G., Rakovshchik L.S., Stetsenko V.Ya.** *Integralnyye uravneniya [Integral equations]*. Moscow: Nauka Publ., 1968, 448 p. (rus)

12. **Kopp V.Ya., Zamorenov M.V., Obzherin**

Yu.Ye., Filipovich O.V. *Metody modelirovaniya polumarkovskikh system [Simulation methods of semi-Markov Systems]*. *Adaptivni sistemi avtomatichnogo upravlinnya*. Dnipropetrovsk, 2015, Vol. 1(26), Pp. 208–221. (ukr)

13. **Zamorenov M.V., Kopp V.Ya., Obzherin Yu.Ye., Zamorenova D.V.** *Aprobatsiya metoda trayektoriy na primere modelirovaniya protsessa funktsionirovaniya proizvodstvennogo elementa s obestslenivayushchimi otkazami [Approbation of the trajectories method by the example of the modeling of the functioning process of the production element with depreciative failures]*. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskkiye nauki*. Tula: TulGU Publ., 2015, Vol. 8, Part 1, Pp. 57–71. (rus)

14. **Venttsel Ye.S.** *Teoriya veroyatnostey [Theory of chances]*. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1999, 576 p. (rus)

15. **Cherkesov G.N.** *Nadezhnost tekhnicheskikh sistem s vremennoy izbytochnostyu [Reliability of technical systems with time redundancy]*. Moscow: Sovetskoye radio Publ., 1974, 296 p. (rus)

16. **Cherkesov G.N.** *Sovremennoye sostoyaniye teorii i praktiki nadezhnosti mnogofaznykh sistem s nakopityami [The current state of theory and practice of the reliability of multiphase systems with hard drives]*. *Nadezhnost i kontrol kachestva [Reliability and Quality Control]*, 1986, No. 10, Pp. 3–7. (rus)

17. **Ganin N.M., Katkovnik V.Ya.** *Setevyye modeli funktsionirovaniya GPS s ogranichennymi nakopityami [Network models of GPS operation with limited storage devices]*. *Mashinostroyeniye*, 1988, No. 2, Pp. 26–32. (rus)

18. **Kopp V.Ya., Kartashov A.L., Zamorenov M.V., Klyukin V.Yu.** *Polumarkovskaya model struktury tekhnologicheskaya yacheyka – nakopitel [The semi-markov model for the ‘technological module – storage device’ structure]*. *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGPU. Fiziko-matematicheskkiye nauki [St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics]*, 2016, No. 1(237), Pp. 16–28. (rus)

КОПП Вадим Яковлевич – профессор кафедры приборных систем и автоматизации технологических процессов Севастопольского государственного университета, доктор технических наук.

299053, Россия, г. Севастополь, ул. Университетская, д. 33.

E-mail: volkov-and@yandex.ru

KOPP Vadim Ya. *Sevastopol State University.*

299053, Universitetskaya Str. 33, Sevastopol, Russia.

E-mail: volkov-and@yandex.ru

ЗАМОРЕНОВ Михаил Владимович — доцент кафедры приборных систем и автоматизации технологических процессов Севастопольского государственного университета, кандидат технических наук.

299053, Россия, г. Севастополь, ул. Университетская, д. 33.

E-mail: zamoryonoff@gmail.com

ZAMORYONOV Mikhail V. *Sevastopol state university.*

299053, Universitetskaja Str. 33, Sevastopol, Russia.

E-mail: zamoryonoff@gmail.com

ОБЖЕРИН Юрий Евгеньевич — заведующий кафедрой высшей математики Севастопольского государственного университета, доктор технических наук.

299053, Россия, г. Севастополь, ул. Университетская, д. 33.

E-mail: objsev@mail.ru

OBJERIN Yuriy E. *Sevastopolskii gosydarstvennii universitet.*

299053, Universitetskaja Str. 33, Sevastopol, Russia.

E-mail: objsev@mail.ru

ЛАРИН Михаил Юрьевич — младший научный сотрудник кафедры «Автоматы» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

E-mail: kai-desu@mail.ru

LARIN Mikhail Yu. *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

E-mail: kai-desu@mail.ru



DOI: 10.5862/JCSTCS.247.4

УДК 517.4+004.942

С.А. Горожанкин, А.А. Шитов, Н.В. Савенков

МЕТОДИКИ ДЛЯ АППРОКСИМАЦИИ ЗАВИСИМОСТЕЙ НЕСКОЛЬКИХ ПЕРЕМЕННЫХ В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ MS EXCEL И MATHCAD

S.A. Gorozhankin, A.A. Shitov, N.V. Savenkov

PROCEDURES FOR APPROXIMATING DEPENDENCES OF SEVERAL VARIABLES IN MS EXCEL AND MATHCAD SOFTWARE ENVIRONMENT

Предложены методики аппроксимации дискретных данных непрерывными гладкими функциями нескольких переменных при выполнении экспериментальной части научного исследования. Приведенный материал базируется на применении таких относительно распространенных программных продуктов, как MS Excel и Mathcad, может быть реализован в аналогичных по структуре и назначению компьютерных программах, содержит результаты практического применения на примере аппроксимации функциями нескольких переменных различного вида характеристик современного автомобильного двигателя внутреннего сгорания. Даны рекомендации по рациональному применению предлагаемых методик, описаны возможные сопутствующие сложности при их реализации в рассматриваемых программных оболочках. Представленные теоретический материал и практические примеры процедур аппроксимации отличаются множеством настроек, гибкостью применения к различному виду представления исходных данных, а также относительной простотой использования, так как построены по принципу «от простого к сложному».

АППРОКСИМАЦИЯ; ЗАВИСИМОСТЬ; ФУНКЦИЯ НЕСКОЛЬКИХ ПЕРЕМЕННЫХ; АРГУМЕНТ; ИССЛЕДОВАНИЕ; ЭКСПЕРИМЕНТ; ДИСКРЕТНОЕ МНОЖЕСТВО; КОМПЬЮТЕРНАЯ ПРОГРАММА; СПЛАЙН; АЛГОРИТМ.

The article suggests a technique for approximating the original data via continuous smooth functions of several variables when performing the experimental part of a scientific study. The material is based on using such relatively common software like MS Excel and Mathcad, it can be implemented in structurally and functionally similar computer programs, and also provides results of practical application on the example of approximating the characteristics of a modern automobile internal combustion engine via functions of several variables of different kinds. In addition, the paper presents recommendations for rational use of the suggested methods and possible related difficulties in their implementation in the considered software shells. Theoretical material and practical examples of the approximation procedures prepared by the authors are distinguished by a lot of options, flexibility of application to different types of representation of the original data, as well as the relative ease of use, because they are based on a simple-to-complex basis.

APPROXIMATION; DEPENDENT; FUNCTION OF SEVERAL VARIABLES; ARGUMENT; STUDY; EXPERIMENT; DISCRETE DATA; COMPUTER PROGRAM; SPLINE; ALGORITHM.

В настоящей статье предлагаются методики аппроксимации многофакторных зависимостей на примере таких относительно распространенных, а также имеющих простой пользовательский интерфейс, программных продуктов, как табличный

процессор Microsoft Excel и система компьютерной алгебры Mathcad.

Предлагаемые методики отличаются от традиционного использования рассматриваемых программ возможностью поэтапного выполнения процедуры аппроксимации

при комбинированном применении элементарных и кусочно-заданных функций различного вида, а также относительно более широким набором настраиваемых параметров; это позволяет повысить достоверность разрабатываемых математических моделей.

Новизна предлагаемых методик относительно известных общих рекомендаций, изложенных в работах [1–5], заключается в построении многофакторных зависимостей средствами программных продуктов, предназначенных главным образом для выполнения однофакторной аппроксимации. Такой подход позволяет: индивидуально подбирать для каждой переменной такой тип аппроксимирующей функции, при котором обеспечивается минимальное значение величин численного отклонения, и при этом не нарушается физический смысл рассматриваемого объекта либо процесса; применять в пределах одной аппроксимирующей функции нескольких переменных зависимости различных типов (например, кусочно-заданные и элементарные); отказаться от необходимости структурирования исходного дискретного множества в виде сетки с заданным шагом значений аргументов – предлагаемые методики, фактически, позволяют работать непосредственно с результатами экспериментальных исследований.

Приведенный в статье материал отобран и систематизирован нами с целью разработки некоторых общих рекомендаций и готовых практических решений, позволяющих облегчить процесс обработки результатов экспериментальных исследований.

Ввиду своей относительной сложности для некоторых нелинейных зависимостей, автоматическая аппроксимация исходных дискретных множеств может быть осуществлена с помощью:

- элементарных функций, представленных уравнениями, которые могут применяться для практических инженерных расчетов, а также экспортироваться в другие программные продукты (например, в *Mathcad* или в *Maple*) для последующей обработки и анализа;
- кусочно-заданных аналитических

зависимостей, под которыми подразумеваются такие фрагментные зависимости, которые содержат логические операторы (например, сплайн-функции). Эти зависимости применены для описания физических процессов, аппроксимация которых с помощью элементарных функций сопряжена с большей величиной численного отклонения и на некоторых интервалах противоречит физическому смыслу изучаемого процесса [2].

Для автоматизированного создания аппроксимирующих зависимостей, представленных элементарными функциями, может быть применено множество программных продуктов, например – *Microsoft Excel* или *CurveExpert*. Работа с кусочно-заданными функциями в настоящей статье рассмотрена на примере системы компьютерной алгебры *Mathcad*; вычислительные комплексы, подобные последнему, обычно не позволяют получить аппроксимирующие уравнения в аналитическом виде (что объясняется громоздким представлением и ограниченными возможностями самих программ). Поэтому дальнейшая работа с полученными условными функциями выполняется, как правило, в среде соответствующего программного продукта.

Приведенные принципы автоматической аппроксимации обусловлены формой исходного дискретного множества и числом его аргументов. Статья посвящена построению функций нескольких переменных, однако для иллюстрации возможностей предлагаемых методик, рассмотрим в первую очередь особенности создания зависимостей одной переменной.

Однофакторная модель

Аппроксимация зависимости одной переменной вида $y = f(x)$ с помощью как элементарной, так и кусочно-заданной функций выполняется *в один этап* и приведена на примере внешней скоростной характеристики эффективной мощности автомобильного двигателя внутреннего сгорания (ДВС). На рис. 1 *a* показано исходное дискретное множество (результаты измерений на лабораторном стенде) и соответствующие аппроксимирующие функции.

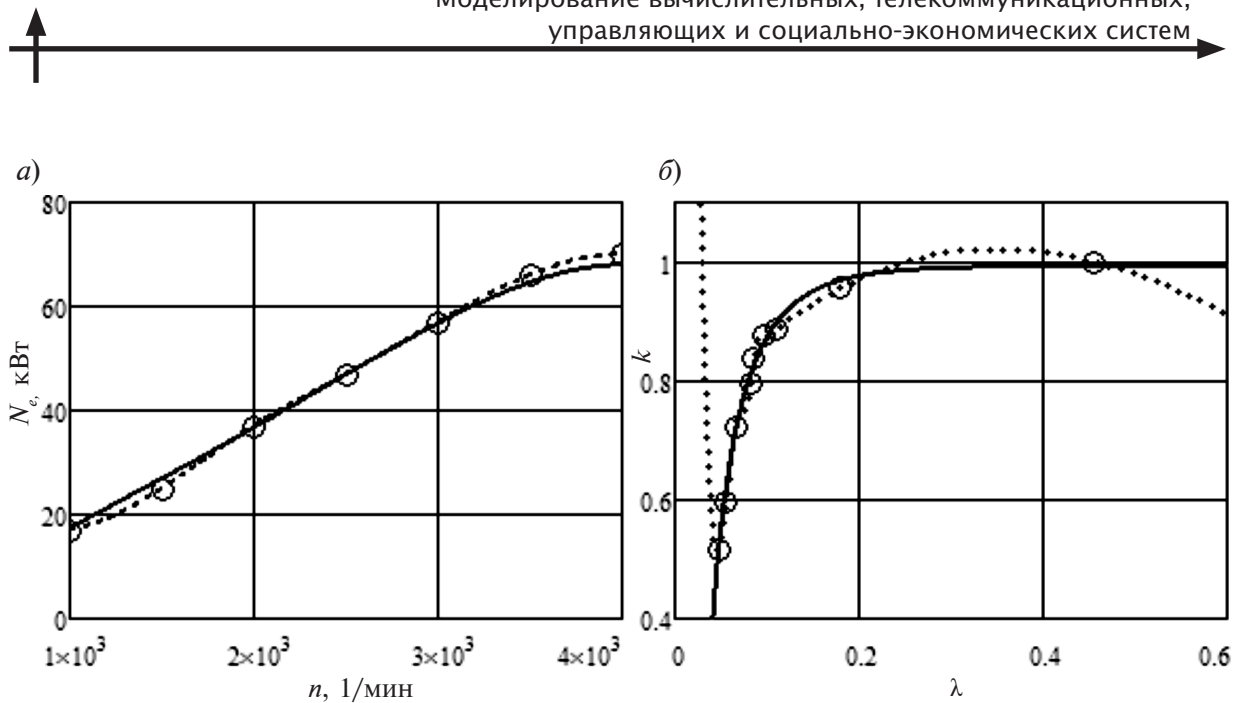


Рис. 1. Пример графического построения средствами Mathcad различных аппроксимирующих функций для зависимостей одной переменной:

- a* – эффективной мощности N_e ДВС от частоты вращения коленчатого вала n ;
- б* – зависимости коэффициента использования мощности k от коэффициента нагрузки λ
- (\circ) – результаты экспериментов; (—) – аппроксимация элементарной функцией;
- (.....) – аппроксимация кусочно-заданной функцией

Для автоматической аппроксимации элементарной функцией применен табличный процессор Microsoft Excel (команда «Добавить линию тренда» [3]). Исходному множеству (при значении коэффициента коллинеарности $R = 0,9997$) удовлетворяет полином 4-й степени:

$$N_e = f(n) = a_e + b_e n + c_e n^2 + d_e n^3 + e_e n^4, \quad (1)$$

где a_e, b_e, c_e, d_e, e_e – полиномиальные коэффициенты, равные соответственно: $-5,6032$; $0,0297$; $-1,0379 \cdot 10^{-5}$; $4,2 \cdot 10^{-9}$; $-5,78910^{-13}$.

Эту аппроксимацию можно осуществить и с помощью других программных пакетов. Например, применение всесторонней системы подбора кривых CurveExpert позволяет получить аналогичный результат.

В общем виде алгоритм для аппроксимации исходного множества кусочно-заданной функцией кубического интерполяционного сплайна в системе компьютерной алгебры Mathcad представлен следующими зависимостями:

$$X := (x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dots \ x_n)^T, \quad (2)$$

$$Y := (y_1 \ y_2 \ y_3 \ \dots \ y_n)^T, \quad (3)$$

а кусочно-заданной линейной функцией

зависимостями [4]:

$$y(x) := \text{interp}(\text{cspline}(X, Y), X, Y, x), \quad (4)$$

$$y(x) := \text{linterp}(X, Y, x), \quad (5)$$

где X – массив аргументов дискретного множества; Y – массив соответствующих значений дискретного множества; $x_1 \dots x_n, y_1 \dots y_n$ – соответственно аргументы и значения дискретного множества, полученные в результате выполнения эксперимента (рис. 1 *a*) [6].

Для рассматриваемого примера однофакторной зависимости соответствующий листинг будет представлен выражениями:

$$X := (1000 \ 1500 \ 2000 \ 2500 \ 3000 \ 3500 \ 4000)^T, \quad (6)$$

$$Y := (17 \ 25 \ 37 \ 47 \ 57 \ 66 \ 70)^T, \quad (7)$$

$$N_e(n) := \text{interp}(\text{cspline}(X, Y), X, Y, n). \quad (8)$$

Вместо команды кубического сплайна «cspline» для некоторых функций, в соответствии с их видом, может быть применена команда аппроксимации параболическим сплайном «pspline» или линейным «lspline».

Приведенные алгоритмы Mathcad также позволяют получать значения исследуемой зависимости и за пределами исходной дискретной области – в экстраполяции.

При работе с программными оболочками могут получиться и противоречивые результаты. Например, несмотря на высокое значение коэффициента коллинеарности ($R = 1$), кусочно-заданные сплайн-функции не всегда могут быть применены для аппроксимации исходного физического процесса. На рис. 1 б приведены результаты экспериментальных исследований зависимости коэффициента использования мощности автомобильного бензинового двигателя от коэффициента нагрузки, а также соответствующие аппроксимирующие функции. Как показано на графике, наилучшим вариантом является аппроксимация элементарной экспоненциальной (Вейбула) функцией:

$$k_{(n)} = f(\lambda) = a_k - b_k \cdot \exp(-c_k \cdot \lambda^{d_k}), \quad (9)$$

где a_k, b_k, c_k, d_k – коэффициенты: 0,992; 7,36; 14,92; 0,56.

Приведенная функция получена в программной среде CurveExpert с помощью команды «Apply Fit».

Использование для описания дискретных множеств кусочно-заданных сплайн-функций в ряде случаев на некоторых интервалах может противоречить исходному физическому процессу, как это показано на рис. 1 б, где по своему определению величина λ не может принимать значения, превышающие единицу. В основном образование так называемых «возмущений» между опорными точками объясняется недостаточной плотностью их расположения на координатных плоскостях [7].

Двухфакторная модель

Аналогичным образом зависимости двух переменных могут быть аппроксимированы непрерывными функциями рассматриваемых типов вида $z = f(x, y)$ в один либо в два этапа.

Исходные дискретные множества, в соответствии с особенностями планирования конкретного эксперимента (подразумеваются особенности как самой методики про-

ведения опыта, так и применяемого оборудования, приборов, а также специфики исследуемого физического процесса), могут быть представлены в двух различных вариантах. Первый – в виде математической матрицы, в которой каждому значению (x_{nm} или y_n) одноименного аргумента (X или Y) соответствует одинаковое количество значений функции (z_{nm}), табл. 1. Вторым вариант – в виде семейства зависимостей вида $Z_m = f(X_m)$, каждая из которых справедлива для конкретного значения y_m аргумента Y ; при этом каждому значению y_m может соответствовать различное количество значений функции z_{nm} , табл. 2 [8].

В таблицах приведена запись исходных дискретных данных как в общем виде для обоих вариантов, так и в виде конкретных примеров двухфакторных зависимостей – удельного расхода топлива ДВС $g_e = f(n, k)$ (табл. 1) и объемного расхода воздуха ДВС $Q_0 = f(P, n)$ (табл. 2), где P – давление воздуха в ресивере впускной системы ДВС. Данные получены в ГОУ ВПО «ДонНАСА» при стендовых испытаниях двигателя УМЗ-4216 [9, 10].

Наиболее сложный случай представления дискретной двухфакторной зависимости вида $z = f(x, y)$, в котором каждому ее значению соответствует своя пара значений аргументов, в данной статье не рассмотрен.

Процедура аппроксимации двухфакторной зависимости, которая задана квадратной матрицей (табл. 1), с помощью кусочно-заданной функции может быть выполнена в Mathcad за один этап на основании приведенного алгоритма [11]:

$$X := (x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dots \ x_n)^T, \quad (10)$$

$$Y := (y_1 \ y_2 \ y_3 \ \dots \ y_n)^T, \quad (11)$$

$$XY^{0\cdot} := X \quad XY^{1\cdot} := Y, \quad (12)$$

$$Z := \begin{pmatrix} z_{11} & z_{12} & z_{13} & \dots & z_{n1} \\ z_{21} & z_{22} & z_{23} & \dots & z_{n2} \\ z_{31} & z_{32} & z_{33} & \dots & z_{n3} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ z_{1m} & z_{2m} & z_{3m} & \dots & z_{nm} \end{pmatrix}, \quad (13)$$

Таблица 1

Зависимость двух переменных, представленная математической матрицей

		Y					n	k				
		y ₁	y ₂	y ₃	...	y _n		0,6	0,7	0,8	0,9	1
X	x ₁	z ₁₁	z ₂₁	z ₃₁	...	z _{n1}	1000	342	324	302	279	300
	x ₂	z ₁₂	z ₂₂	z ₃₂	...	z _{n2}	1500	316	298	281	272	274
	x ₃	z ₁₃	z ₂₃	z ₃₃	...	z _{n3}	2000	342	313	296	283	286
	...	...	...	...	...	...	2500	346	315	293	283	288
	x _m	z _{1m}	z _{2m}	z _{3m}	...	z _{nm}	3000	358	326	303	292	294

Таблица 2

Зависимость двух переменных в виде семейства однофакторных зависимостей

Y	y ₁	X ₁	x ₁₁	x ₂₁	...	x _{m1}	n	1500	P ₍₁₎	555	598	658	724
		Z ₁	z ₁₁	z ₂₁	...	z _{m1}			Q _{O(1)}	56,7	65,2	69,5	90,1
y ₂	X ₂	x ₁₂	x ₂₂	...	x _{m2}	2000	P ₍₂₎	628	650	711	730		
	Z ₂	z ₁₂	z ₂₂	...	z _{m2}		Q _{O(2)}	97	102,8	115,6	118		
...	...	...	...	...	...	2500	P ₍₃₎	496	569	671	708
	...	...	...	...	...		Q _{O(3)}	96,8	108,1	132	140,3
y _n	X _n	x _{1n}	x _{2n}	...	x _{mn}	3000	P ₍₄₎	464	607	641	703		
	Z _n	z _{1n}	z _{2n}	...	z _{mn}		Q _{O(4)}	102,6	144,3	155,5	169,2		

$$z(x, y) := \text{interp} \left[\text{cspline}(XY, Z), \begin{matrix} X \\ Y \end{matrix}, \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \right]. \quad (14)$$

Зависимость $g_e = f(n, k)$, аппроксимированная с помощью представленного алгоритма, приведена графически на рис. 2 а. По аналогии с (4), кроме кубического сплайна может применяться параболический либо линейный.

Если исходные данные представлены в виде семейства однофакторных зависимостей (табл. 2, а также в случае прямоугольной матрицы – при $n \neq m$), то необходимо привести их к квадратной матрице. Таким образом, процедура аппроксимации будет выполняться в два этапа.

Этап 1. В соответствии с (2)–(4), создается n -е количество функций вида $z_n = f(x_n)$,

каждая из которых справедлива для конкретного значения y_n .

Этап 2. Создается квадратная матрица значений, и в соответствии с (10)–(14) выполняется аппроксимация.

Также на примере функции $Q_0 = f(P, n)$ рассмотрим применение упрощенной методики.

Этап 1

$$P_1 := (555 \ 598 \ 658 \ 724)^T; \quad (15)$$

$$P_2 := (628 \ 650 \ 711 \ 730)^T; \quad (16)$$

$$P_3 := (496 \ 569 \ 671 \ 708)^T; \quad (17)$$

$$P_4 := (464 \ 607 \ 641 \ 703)^T; \quad (18)$$

$$Q_{0(1)} := (56,7 \ 65,2 \ 69,5 \ 90,1)^T; \quad (19)$$

$$Q_{0(2)} := (97 \ 102,8 \ 115,6 \ 118)^T; \quad (20)$$

$$Q_{0(3)} := (96,8 \ 108,1 \ 132 \ 140,3)^T; \quad (21)$$

$$Q_{0(4)} := (102,6 \ 144,3 \ 155,5 \ 169,2)^T; \quad (22)$$

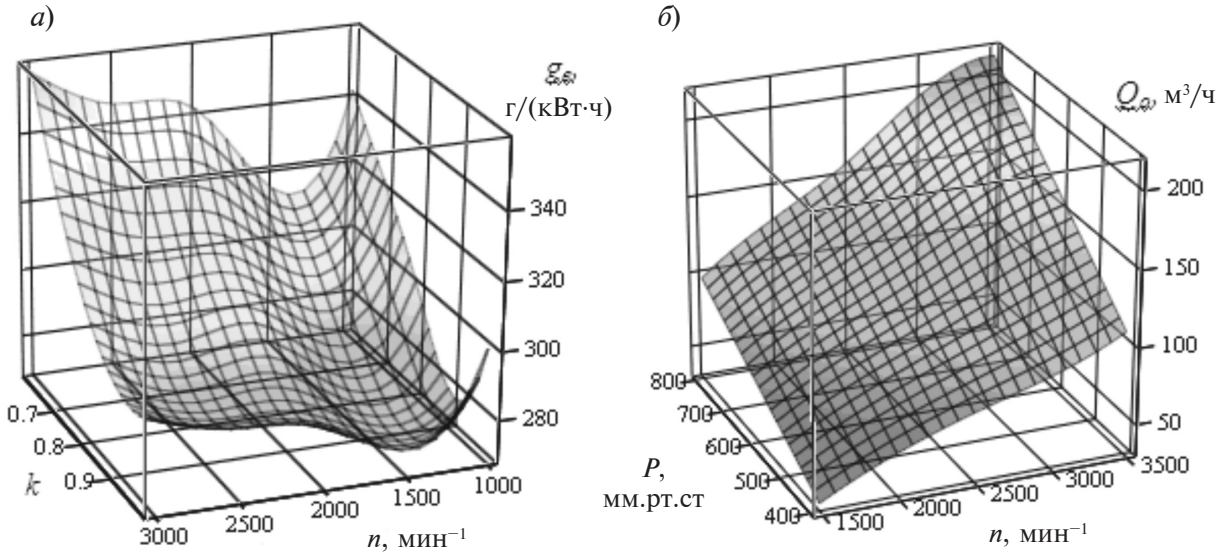


Рис. 2. Пример графического построения средствами Mathcad аппроксимирующих функций двухфакторных зависимостей:

a – удельного расхода топлива ДВС с помощью функции кубического сплайна; *б* – объемного расхода воздуха ДВС с помощью линейных функций по переменной *P* и полиномиальных 4-й степени по переменной *n*

$$Q_{0(1)}(P) := \text{interp}(\text{cspline}(P_1, Q_{0(1)}), P_1, Q_{0(1)}, P); \quad (23)$$

$$Q_{0(2)}(P) := \text{interp}(\text{cspline}(P_2, Q_{0(2)}), P_2, Q_{0(2)}, P); \quad (24)$$

$$Q_{0(3)}(P) := \text{interp}(\text{cspline}(P_3, Q_{0(3)}), P_3, Q_{0(3)}, P); \quad (25)$$

$$Q_{0(4)}(P) := \text{interp}(\text{cspline}(P_4, Q_{0(4)}), P_4, Q_{0(4)}, P); \quad (26)$$

Этап 2:

$$N := (1500 \ 2000 \ 2500 \ 3000)^T; \quad (27)$$

$$Q(P) := (Q_{0(1)}(P) \ Q_{0(2)}(P) \ Q_{0(3)}(P) \ Q_{0(4)}(P))^T; \quad (28)$$

$$Q_0(P, n) := \text{interp}(\text{cspline}(N, Q(P)), N, Q(P), n). \quad (29)$$

Полученная функция $Q_0(P, n)$ в графическом виде приведена на рис. 2 б. Данная зависимость может быть также задана и комбинированно – все либо некоторые

выражения первого этапа аппроксимации ($Q_{0(1)}(P) \dots Q_{0(4)}(P)$) могут иметь отличный от выражения второго этапа аппроксимации (29) тип сплайна (например, параболический или линейный).

Процедура аппроксимации двухфакторной зависимости элементарной функцией выполняется в два этапа.

Этап 1.

Исходные данные, в случае если они заданы математической матрицей, приводятся к виду, представленному в табл. 2. В итоге будет получено *n*-е число зависимостей одной переменной.

Первый этап начинается с выбора наиболее подходящего типа и размера аппроксимирующей элементарной функции, одинаковых для всех зависимостей $Z_n = f(X_n)$. Рассмотрим это на примере данных, приведенных в табл. 2. Для всех четырех дискретных множеств достаточную достоверность обеспечивает применение линейной функции:

$$Q_0 = f(P, n) = \begin{cases} Q_{0(1)}(P) = a_{B(1)}P + b_{B(1)} = 0,158P - 28,976 & \text{для } n = 1500 \\ Q_{0(2)}(P) = a_{B(2)}P + b_{B(2)} = 0,181P - 15,362 & \text{для } n = 2000 \\ Q_{0(3)}(P) = a_{B(3)}P + b_{B(3)} = 0,213P - 10,858 & \text{для } n = 2500 \\ Q_{0(4)}(P) = a_{B(4)}P + b_{B(4)} = 0,269P - 18,989 & \text{для } n = 3000 \end{cases} \quad (30)$$

где $a_{B(1)} \dots a_{B(4)}$, $b_{B(1)} \dots b_{B(4)}$ – коэффициенты аппроксимации, полученные в рассматриваемом примере в программной среде Microsoft Excel.

В итоге получено семейство зависимостей, каждая из которых справедлива для определенного значения аргумента n . Приведенная функция (30) имеет гладкую зависимость по переменной P и дискретную по переменной n .

В том случае, когда особенность исследуемого физического процесса связана с проблематичностью подбора типа аппроксимирующей элементарной функции (для $Z_n = f(X_n)$), а дискретное множество задано квадратной либо прямоугольной математической матрицей, то целесообразно проверить возможность выполнения первого этапа аппроксимации по другой переменной – $Z_n = f(Y_n)$. В некоторых случаях это позволяет обойти рассматриваемую сложность.

Этап 2.

Второй этап направлен на получение гладкой зависимости также и по второй переменной – в рассматриваемом случае по n . В соответствии с (30) искомая аппроксимирующая двухфакторная функция в общем виде представлена уравнением:

$$Q_{0(n)}(P, n) = a_B(n)P + b_B(n), \quad (31)$$

где $a_B(n)$ и $b_B(n)$ – аппроксимирующие функции для коэффициентов.

Значения коэффициентов каждой строки выражения (30) зависят от аргумента n :

$$a_B = f(n) = \begin{cases} 0,158 & \text{для } n = 1500 \\ 0,181 & \text{для } n = 2000 \\ 0,213 & \text{для } n = 2500 \\ 0,269 & \text{для } n = 3000 \end{cases}, \quad (32)$$

$$b_B = f(n) = \begin{cases} -28,976 & \text{для } n = 1500 \\ -15,362 & \text{для } n = 2000 \\ -10,858 & \text{для } n = 2500 \\ -18,989 & \text{для } n = 3000 \end{cases}. \quad (33)$$

В ходе второго этапа выполняется создание элементарных аппроксимирующих однофакторных функций для зависимостей коэффициентов – выбирается наиболее подходящий их тип и размер. При этом аргументами являются числа вторых столбцов

систем выражений (32) и (33) – (1500; 2000; 2500; 3000), а значениями – числа первых столбцов. Для рассматриваемого примера, аппроксимация функций коэффициентов выполнена в программной среде Microsoft Excel с помощью полинома 4-й степени:

$$a_B = f(n) = -1,599 + 3,23 \cdot 10^{-3} \cdot n - 2,189 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 + 6,486 \cdot 10^{-10} \cdot n^3 - 6,953 \cdot 10^{-14} \cdot n^4; \quad (34)$$

$$b_B = f(n) = 615,37 - 1,303 \cdot n + 9,416 \cdot 10^{-4} \cdot n^2 - 2,865 \cdot 10^{-7} \cdot n^3 + 3,132 \cdot 10^{-11} \cdot n^4. \quad (35)$$

Таким образом, искомая аппроксимирующая функция для исходного дискретного множества (табл. 2) при применении элементарных зависимостей имеет вид (рис. 2 б):

$$Q_0(P, n) = (-1,599 + 3,23 \cdot 10^{-3} \cdot n - 2,189 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 + 6,486 \cdot 10^{-10} \cdot n^3 - 6,953 \cdot 10^{-14} \cdot n^4) \cdot P + (615,37 - 1,303 \cdot n + 9,416 \cdot 10^{-4} \cdot n^2 - 2,865 \cdot 10^{-7} \cdot n^3 + 3,132 \cdot 10^{-11} \cdot n^4). \quad (36)$$

Если на завершающем (втором) этапе возникают трудности с аппроксимацией зависимостей коэффициентов, то для этого может быть применен *комбинированный способ* задания аппроксимирующей функции. Например, первый этап может содержать семейство элементарных аппроксимирующих функций, как это рассмотрено на примере выражения (30), а зависимости коэффициентов (32) и (33) на втором этапе могут быть аппроксимированы кусочно-заданными функциями (например, в программной среде Mathcad с помощью алгоритма (2)–(4)).

Кроме того, результаты первого этапа аппроксимации элементарными функциями позволяют представить исходное дискретное множество (см. табл. 2) в виде квадратной математической матрицы. Это дает возможность выполнения второго этапа с помощью алгоритма (10)–(14).

Таким образом, *комбинированный способ* формирования аппроксимирующих функции позволяет в некоторой степени сочетать преимущества как элементарных, так и кусочно-заданных функций.

Таблица 3

Трехфакторная зависимость в виде семейства математических матриц

Z	z_1					z_2					z_i				
	X_1					X_2					X_i				
Y_1	x_{11}	x_{21}	...	x_{n1}	Y_2	x_{12}	x_{22}	...	x_{n2}	...	Y_i	x_{1i}	x_{2i}	...	x_{ni}
y_{11}	t_{111}	t_{211}	...	t_{n11}	y_{12}	t_{112}	t_{212}	...	t_{n12}	...	y_{1i}	t_{11i}	t_{21i}	...	t_{n1i}
y_{21}	t_{121}	t_{221}	...	t_{n21}	y_{22}	t_{122}	t_{222}	...	t_{n22}	...	y_{2i}	t_{12i}	t_{22i}	...	t_{n2i}
...
y_{m1}	t_{1m1}	t_{2m1}	...	t_{nm1}	y_{m1}	t_{1m2}	t_{2m2}	...	t_{nm2}	...	y_{mi}	t_{1mi}	t_{2mi}	...	t_{nmi}

Трехфакторная модель

Зависимость трех переменных вида $T = f(X, Y, Z)$, заданную в виде семейства математических матриц (по аналогии с табл. 1) или семейства функций одной переменной (по аналогии с табл. 2), представляющих собой зависимости вида $T_i = f(X_i, Y_i)$, каждая из которых справедлива для определенного значения z_i аргумента Z (табл. 3), также возможно аппроксимировать элементарной либо кусочно-заданной функцией при помощи рассматриваемых в настоящей статье программных продуктов.

Аппроксимация кусочно-заданными сплайн-функциями в программной среде Mathcad выполняется в несколько этапов. Сначала создается i -е число (в соответствии с количеством матриц исходных данных, табл. 3) аппроксимирующих двухфакторных зависимостей вида $t_i = f(x, y)$, каждая из которых будет справедлива для соответствующего значения z_i аргумента Z . Для этого могут быть применены алгоритмы,

$$t = f(x, y, z) = \begin{cases} t_1 = f(x, y) = (a_{a1}y^2 + b_{a1}y + c_{a1})x + (a_{b1}y^2 + b_{b1}y + c_{b1}) & \text{для } z_1 \\ t_2 = f(x, y) = (a_{a2}y^2 + b_{a2}y + c_{a2})x + (a_{b2}y^2 + b_{b2}y + c_{b2}) & \text{для } z_2, \\ t_i = f(x, y) = (a_{ai}y^2 + b_{ai}y + c_{ai})x + (a_{bi}y^2 + b_{bi}y + c_{bi}) & \text{для } z_i \end{cases} \quad (40)$$

где $a_{a(1)} \dots a_{a(i)}$, $b_{a(1)} \dots b_{a(i)}$, $c_{a(1)} \dots c_{a(i)}$, $a_{b(1)} \dots a_{b(i)}$, $b_{b(1)} \dots b_{b(i)}$, $c_{b(1)} \dots c_{b(i)}$ — коэффициенты аппроксимации, которые могут быть получены в программной среде Microsoft Excel, Curve-Expert и подобных продуктов.

Этап 3.

Третий этап является заключительным

использование которых в настоящей статье рассмотрено на примере зависимостей $g_e = f(n, k)$ и $Q_0 = f(P, n)$.

Заключительным этапом аппроксимации является создание искомой функции согласно приведенному листингу:

$$Z := (z_1 \ z_2 \ \dots \ z_i)^T, \quad (37)$$

$$Y(x, y) := (t_1(x, y) \ t_2(x, y) \ \dots \ t_i(x, y))^T, \quad (38)$$

$$t(x, y, z) := \text{interp}(\text{cspline}(Z, Y(x, y)), Z, Y(x, y), z). \quad (39)$$

Аппроксимация элементарными функциями выполняется в три этапа. Первые два этапа направлены на создание i -го количества аппроксимирующих зависимостей вида $t_i = f(x, y)$ — построение каждой из которых осуществляется по аналогии с методикой (30)–(36). Важно, чтобы они имели между собой одинаковый общий вид, допустим, по примеру зависимости (36). Таким образом, результатом выполнения первых двух этапов будет являться система функций:

и направлен на получение гладкой функции также и по третьей переменной — в данном случае по z .

В соответствии с выражением (40), значения коэффициентов каждого уравнения находятся в зависимости от аргумента z :

$$a_a(z) = \begin{cases} a_{a1} & \text{для } z_1 \\ a_{a2} & \text{для } z_2; \\ a_{ai} & \text{для } z_i \end{cases} \quad (41)$$

$$b_a(z) = \begin{cases} b_{a1} & \text{для } z_1 \\ b_{a2} & \text{для } z_2; \\ b_{ai} & \text{для } z_i \end{cases} \quad (42)$$

$$c_a(z) = \begin{cases} c_{a1} & \text{для } z_1 \\ c_{a2} & \text{для } z_2; \\ c_{ai} & \text{для } z_i \end{cases} \quad (43)$$

$$a_b(z) = \begin{cases} a_{b1} & \text{для } z_1 \\ a_{b2} & \text{для } z_2; \\ a_{bi} & \text{для } z_i \end{cases} \quad (44)$$

$$b_b(z) = \begin{cases} b_{b1} & \text{для } z_1 \\ b_{b2} & \text{для } z_2; \\ b_{bi} & \text{для } z_i \end{cases} \quad (45)$$

$$c_b(z) = \begin{cases} c_{b1} & \text{для } z_1 \\ c_{b2} & \text{для } z_2; \\ c_{bi} & \text{для } z_i \end{cases} \quad (46)$$

Таким образом, искомая гладкая трехфакторная функция в общем виде может быть представлена выражением:

$$t = f(x, y, z) = (a_a(z)y^2 + b_a(z)y + c_a(z))x + (a_b(z)y^2 + b_b(z)y + c_b(z)). \quad (47)$$

В ходе третьего этапа выполняется аппроксимация зависимостей $a_a = f(z)$, $b_a = f(z)$, $c_a = f(z)$, $a_b = f(z)$, $b_b = f(z)$, $c_b = f(z)$ на основании данных (41)–(46). В случае, если для описания рассматриваемых функций достаточным будет применение линейных зависимостей, то итоговая аппроксимирующая функция будет иметь вид:

$$t = f(x, y, z) = ((a_{aa}z + b_{aa})y^2 + (a_{ba}z + b_{ba})y + (a_{ca}z + b_{ca}))x + ((a_{ab}z + b_{ab})y^2 + (a_{bb}z + b_{bb})y + (a_{cb}z + b_{cb})). \quad (48)$$

Количество констант в формуле (48) составляет $p \cdot q \cdot s = 2$ (линейная функция) · 3

(полиномиальная 2-й степени) · 2 (линейная функция) = 12, где p, q, s – количество постоянных в функциях каждого этапа аппроксимации.

При описании непрерывными гладкими функциями зависимостей $a_a = f(z) \dots c_b = f(z)$ также могут быть применены сплайн-функции в соответствии с алгоритмом (2)–(4).

Четырехфакторная модель

В табл. 4, в качестве примера, приведена зависимость четырех переменных вида $H = f(X, Y, Z, T)$, заданная в виде семейства математических матриц, представляющих собой зависимости вида $H_{ij} = f(X_{ij}, Y_{ij})$, каждая из которых справедлива для определенного сочетания значений z_i и t_j аргументов Z и T .

Описание четырехфакторной зависимости *кусочно-заданной* функцией с помощью программной среды **Mathcad** осуществляется в несколько этапов.

Этап 1.

В ходе первого этапа создается $i \times j$ количество (в соответствии с числом матриц исходных данных, табл. 4) аппроксимирующих двухфакторных зависимостей вида $h_{ij} = f(x, y)$, каждая из которых будет справедлива для определенного сочетания значений z_i и t_j аргументов Z и T соответственно. Для создания функций $h_{ij} = f(x, y)$ могут быть применены алгоритмы, использование которых в настоящей статье рассмотрено на примере зависимостей $g_e = f(n, k)$ и $Q_0 = f(P, n)$.

Далее, если $i = j$, то аппроксимация может быть выполнена по упрощенному алгоритму (по аналогии с (10)–(14)). При этом второй этап будет являться завершающим.

Этап 2.

$$Z := (z_1 \ z_2 \ z_3 \ \dots \ z_n)^T; \quad (49)$$

$$T := (t_1 \ t_2 \ t_3 \ \dots \ t_n)^T; \quad (50)$$

$$ZT^{0\circ} := Z \quad ZT^{1\circ} := T; \quad (51)$$

$$H(x, y) := \begin{pmatrix} h_{11}(x, y) & h_{21}(x, y) & \dots & h_{i1}(x, y) \\ h_{12}(x, y) & h_{22}(x, y) & \dots & h_{i2}(x, y) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{1j}(x, y) & h_{2j}(x, y) & \dots & h_{ij}(x, y) \end{pmatrix}; \quad (52)$$

Таблица 4

Зависимость четырех переменных в виде семейства математических матриц

		Z									
		z_1					z_2				
		X_{11}					X_{21}				
T	t_1	Y_{11}	x_{111}	x_{211}	...	x_{n11}	Y_{21}	x_{121}	x_{221}	...	x_{n21}
		y_{111}	h_{1111}	h_{2111}	...	h_{n111}	y_{121}	h_{1121}	h_{2121}	...	h_{n121}
		y_{211}	h_{1211}	h_{2211}	...	h_{n211}	y_{221}	h_{1221}	h_{2221}	...	h_{n221}
	
	y_{m11}	h_{1m11}	h_{2m11}	...	h_{nm11}	y_{m11}	h_{1m21}	h_{2m21}	...	h_{nm21}	
	t_2	Y_{12}	x_{112}	x_{212}	...	x_{n12}	Y_{22}	x_{122}	x_{222}	...	x_{n22}
		y_{112}	h_{1112}	h_{2112}	...	h_{n112}	y_{122}	h_{1122}	h_{2122}	...	h_{n122}
		y_{212}	h_{1212}	h_{2212}	...	h_{n212}	y_{222}	h_{1222}	h_{2222}	...	h_{n222}
	
	y_{m12}	h_{1m12}	h_{2m12}	...	h_{nm12}	y_{m12}	h_{1m22}	h_{2m22}	...	h_{nm22}	
t_j	Y_{1j}	x_{11j}	x_{21j}	...	x_{n1j}	Y_{2j}	x_{12j}	x_{22j}	...	x_{n2j}	
	y_{11j}	h_{111j}	h_{211j}	...	h_{n11j}	y_{12j}	h_{112j}	h_{212j}	...	h_{n12j}	
	y_{21j}	h_{121j}	h_{221j}	...	h_{n21j}	y_{22j}	h_{122j}	h_{222j}	...	h_{n22j}	
	
y_{mj}	h_{1mj}	h_{2mj}	...	h_{nmj}	y_{mj}	h_{1m2j}	h_{2m2j}	...	h_{nm2j}		

$$h(x, y, z, t) := \text{interp} \left[\text{cspline}(ZT, H(x, y)), ZT, H(x, y), \begin{pmatrix} z \\ t \end{pmatrix} \right]. \quad (53)$$

Если $i \neq j$ или каждому значению аргумента j соответствует разное количество аргументов i , то добавляется третий этап. При этом второй этап имеет вид:

$$Z_1 := (z_1 \ z_2 \ z_3 \ \dots \ z_i)^T; \quad (54)$$

$$\begin{matrix} H_1(x, y) := (h_{11}(x, y) \\ h_{21}(x, y) \ \dots \ h_{i1}(x, y))^T; \end{matrix} \quad (55)$$

$$Z_2 := (z_1 \ z_2 \ z_3 \ \dots \ z_i)^T; \quad (56)$$

$$\begin{matrix} H_1(x, y) := (h_{12}(x, y) \\ h_{22}(x, y) \ \dots \ h_{i2}(x, y))^T; \end{matrix} \quad (57)$$

$$Z_j := (z_1 \ z_2 \ z_3 \ \dots \ z_i)^T; \quad (58)$$

$$\begin{matrix} H_j(x, y) := (h_{1j}(x, y) \\ h_{2j}(x, y) \ \dots \ h_{ij}(x, y))^T; \end{matrix} \quad (59)$$

$$h_1(x, y, z) := \text{interp} (\text{cspline}(Z_1, H_1(x, y)), Z_1, H_1(x, y), z); \quad (60)$$

$$h_2(x, y, z) := \text{interp} (\text{cspline}(Z_2, H_2(x, y)), Z_2, H_2(x, y), z); \quad (61)$$

$$h_j(x, y, z) := \text{interp} (\text{cspline}(Z_j, H_j(x, y)), Z_j, H_j(x, y), z). \quad (62)$$

Этап 3.

Искомая аппроксимирующая функция определяется в соответствии с алгоритмом:

$$T := (t_1 \ t_2 \ \dots \ t_j)^T; \quad (63)$$

$$\begin{matrix} H(x, y, z) := (h_1(x, y, z) \\ h_2(x, y, z) \ \dots \ h_j(x, y, z))^T \end{matrix} \quad (64)$$

$$\begin{matrix} h(x, y, z, t) := \text{interp}(\text{cspline}(T, \\ H(x, y, z)), T, H(x, y, z), t). \end{matrix} \quad (65)$$

Заключительный этап аппроксимации (выражения (63)–(65)) может быть тождественно заменен алгоритмом, выполняющим приведение матрицы исходных значений к квадратному виду:

$$Z := (z_1 \ z_2 \ z_3 \ \dots \ z_i)^T; \quad (66)$$

$$T := (t_1 \ t_2 \ \dots \ t_j)^T; \quad (67)$$

$$ZT^{00} := Z \quad ZT^{11} := T; \quad (68)$$

$$H(x, y) := \begin{pmatrix} h_1(x, y, z_1) & h_1(x, y, z_2) & \dots & h_1(x, y, z_i) \\ h_2(x, y, z_1) & h_2(x, y, z_2) & \dots & h_2(x, y, z_i) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_j(x, y, z_1) & h_j(x, y, z_2) & \dots & h_j(x, y, z_i) \end{pmatrix}; \quad (69)$$

$$h(x, y, z, t) := \text{interp} \left[\text{cspline}(ZT, H(x, y)), ZT, H(x, y), \begin{pmatrix} z \\ t \end{pmatrix} \right]. \quad (70)$$

Аппроксимация четырехфакторной зависимости (табл. 4) *элементарными функциями* выполняется в три этапа.

Этап 1.

Направлен на создание $i \times j$ количества зависимостей $h_{ij} = f(x, y)$ одинакового общего вида (допустим, по примеру выражения (36)).

Этап 2.

Выполняется построение семейства аппроксимирующих зависимостей вида $h_j = f(x, y, z)$, каждая из которых создается по аналогии с выражением (48) и справедлива только для определенного значения t_j аргумента T (см. табл. 4):

$$h = f(x, y, z, t) = \begin{cases} h_1 = f(x, y, z) & \text{для } t_1 \\ h_2 = f(x, y, z) & \text{для } t_2 \\ \dots & \dots \\ h_j = f(x, y, z) & \text{для } t_j \end{cases}. \quad (71)$$

Все функции вида $h_j(x, y, z)$ должны иметь одинаковый вид и, соответственно, идентичный набор разных по своему значению констант, которые в рассматриваемом случае будут являться функциями от значения t_j аргумента T .

Этап 3.

Для аналитического определения рассматриваемой зависимости четырех переменных (табл. 4), необходимо все постоянные

уравнений $h_j(x, y, z)$ представить в виде функций от переменной t . Если в качестве соответствующих аппроксимирующих зависимостей будут выбраны полиномиальные функции 2-й степени, а зависимости $h_j(x, y, z)$ по набору констант будут соответствовать выражению (48), то итоговое количество коэффициентов в искомой зависимости $h = f(x, y, z, t)$ составит $p \cdot q \cdot s \cdot l = 2 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 3 = 36$ (где l – количество постоянных в каждой элементарной функции завершающего этапа процедуры аппроксимации).

В настоящей статье предложены различные методики автоматической аппроксимации дискретных множеств непрерывными гладкими зависимостями нескольких переменных в программной среде таких продуктов, как Microsoft Excel и Mathcad. Приведенные алгоритмы могут быть также реализованы и в аналогичных по назначению программах и их комплексах. Рассмотренные методики, в отличие от рекомендаций, изложенных в [1–5], характеризуются своей относительной гибкостью и позволяют работать с исходными дискретными множествами, представленными в различном виде; кроме того, имеется возможность применять различные типы аппроксимирующих кривых для каждой переменной в пределах создаваемой функции. Пред-

ложенные в статье методики могут быть также применены для создания на их базе алгоритмов для математического описания многофакторных зависимостей, имеющих более четырех аргументов.

В качестве практического примера рассмотрена аппроксимация функциями одной и двух переменных дискретных множеств, которые были получены в ходе проведения серии экспериментальных исследований в лаборатории автомобильных двигателей ГОУ ВПО «ДонНАСА». Полу-

ченные результаты характеризуются хорошей сходимостью с опытными данными ($R = 0,925-1$).

Процедура аппроксимации элементарными функциями рассмотрена на основе линейных зависимостей и многочленов. В соответствии с особенностями изучаемых физических процессов, подобным образом могут применяться и другие типы функций, например: рациональные, показательные, логарифмические, тригонометрические и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация. Пер. с англ. М.: Мир, 1985.
2. Роджерс Д., Адамс Дж. Математические основы машинной графики. М.: Мир, 2001. 604 с.
3. Пашенко И.Г. Excel. Шаг за шагом. М.: Эксмо, 2007. 352 с.
4. Кирьянов Д.В. Mathcad 14. СПб.: БХВ-Петербург, 2007. 704 с.
5. Каленчук-Порханова А.А., Вакал Л.П. Пакет программ аппроксимации функций // Компьютерные средства, сети и системы. 2008. № 7. С. 32–37.
6. Бурдун Г.Д., Макаров Б.Н. Основы метрологии: Учеб. пособие для вузов. Изд. 2-е, доп. М.: Изд-во стандартов, 1975. 366 с.
7. Науменко А.М., Улитенко В.П. Определение погрешностей технических измерений:

Учеб. пособие. Харьков: Харьковский авиационный институт, 1982. 128 с.

8. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. Л.: ЛО Энергоатомиздат, 1985. 248 с.

9. Савенков Н.В. Оптимизация режимов силовой установки автомобиля для повышения его топливной экономичности // Автомобильная промышленность. 2016. № 6. С. 12–18.

10. Савенков Н.В. Определение расхода воздуха бензинового ДВС на неустановившихся режимах работы // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 2. С. 220–224.

11. Савенков Н.В., Горожанкин С.А. Определение расхода топлива бензинового ДВС с рампой тупикового типа при работе на переходных режимах // Вісник СНУ ім. Володимира Даля. 2013. № 15 (204) Ч. 2. С. 268–274.

REFERENCES

1. Gill F., Murrey U., Rayt M. *Prakticheskaya optimizatsiya* [Practical optimization]. Moscow: Mir Publ., 1985. (rus)
2. Rodzhers D., Adams Dzh. *Matematicheskiye osnovy mashinnoy grafiki* [Mathematical foundations of computer graphics]. Moscow: Mir Publ., 2001, 604 p. (rus)
3. Pashchenko I.G. *Excel. Shag za shagom* [Excel. Step by step]. Moscow: Eksmo Publ., 2007, 352 p. (rus)
4. Kiryanov D.V. *Mathcad 14*. St. Petersburg : BKhV-Petersburg Publ., 2007, 704 p. (rus)
5. Kalenchuk-Porkhanova A.A., Vakal L.P. Paket programm approksimatsii funktsiy [Package programs approximation of functions]. *Kompyuternyye sredstva, seti i sistemy*. 2008, No. 7, Pp. 32–37. (rus)
6. Burdun G.D., Makarov B.N. *Osnovy metrologii* [Fundamentals of metrology]. Moscow: Izdatelstvo standartov Publ., 1975, 366 p. (rus)
7. Naumenko A.M., Ulitenko V.P. *Opredeleniye pogreshnostey tekhnicheskikh izmereniy* [Definition

of the technical measurement errors]. Kharkov: Kharkovskiy aviatsionnyy institute Publ., 1982, 128 p. (rus)

8. Novitskiy P.V., Zograf I.A. *Otsenka pogreshnostey rezultatov izmereniy* [Evaluation of errors of measurement results]. Leningrad: Energoatomizdat Publ., 1985, 248 p. (rus)

9. Savenkov N.V. *Optimizatsiya rezhimov silovoy ustanovki avtomobilya dlya povysheniya yego toplivnoy ekonomichnosti* [Optimization of the modes of the vehicle power plant for the increasing its fuel efficiency]. *Avtomobilnaya promyshlennost* [Automotive industry], 2016, No. 6, Pp. 12–18. (rus)

10. Savenkov N.V. *Opredeleniye raskhoda vozdukh benzinovogo DVS na neustanovivshikhnya rezhimakh raboty* [Assessment of air consumption of the internal combustion engine et transient operating modes]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of Civil Engineers], 2016, No. 2, Pp. 220–224. (rus)

11. **Savenkov N.V., Gorozhankin S.A.** *Определение расхода топлива бензинового ДВС с рампой тупикового типа при работе на переходных режимах [Assessment of fuel consumption of the petrol combustion engine with a ramp-type deadlock at work on transients]. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov [Bulletin of Civil Engineers], 2013, No. 15 (204), Part 2, Pp. 268–274. (ukr)*
-

ГОРОЖАНКИН Сергей Андреевич — заведующий кафедрой «Автомобили и автомобильное хозяйство» Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, доктор технических наук.

286123, Донецкая область, г. Макеевка, ул. Державина, д. 2.

E-mail: gormar52@gmail.com

GOROZHANKIN Sergey A. *Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture.*

286123, Derzhavina Str. 2, Makeevka, DPR.

E-mail: gormar52@gmail.com

ШИТОВ Анатолий Анатольевич — доцент кафедры высшей и прикладной математики и информатики Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, кандидат физико-математических наук.

286123, Донецкая область, г. Макеевка, ул. Державина, д. 2.

E-mail: shitov@mail.ru

SHITOV Anatoly A. *Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture.*

286123, Derzhavina Str. 2, Makeevka, DPR.

E-mail: shitov@mail.ru

САВЕНКОВ Никита Владимирович — ассистент кафедры «Автомобили и автомобильное хозяйство» Донбасской национальной академии строительства и архитектуры.

286123, Донецкая область, г. Макеевка, ул. Державина, д. 2.

E-mail: savenkovnv@yandex.ru

SAVENKOV Nikita V. *Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture.*

286123, Derzhavina Str. 2, Makeevka, DPR.

E-mail: savenkovnv@yandex.ru



FEDERATED CONFERENCE ON COMPUTER SCIENCE AND INFORMATION SYSTEMS

Prague, Czech Republic, 4-7 September, 2017

Call for Papers:

The FedCSIS Events provide a platform for bringing together researchers and practitioners to present and discuss ideas, challenges, and new solutions in computer science and information systems. Topics of interest are defined by individual Events, constituting FedCSIS conference and listed on <http://www.fedcsis.org>

The papers should be submitted to the chosen Event by May 10, 2017 using the FedCSIS submission system <http://www.fedcsis.org/hotcrp>.

Important Dates:

- Submission of Event Proposals: **November 2, 2016**
- Paper submission (sharp / no extensions): **May 10, 2017**
- Position Paper Submission: **May 31, 2017**
- Author Notification: **June 14, 2017**
- Final paper submission and registration: **June 28, 2017**
- Conference date: **September 4-7, 2017**



e-mail: secretariat@fedcsis.org
www.fedcsis.org

DOI: 10.5862/JCSTCS.247.5

УДК 004.932.2

Н.И. Лиманова, С.Г. Атаев

АЛГОРИТМ ПРОГРАММНОЙ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ ОБЪЕКТОВ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ И ЕГО ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

N.I. Limanova, S.G. Ataev

COMPUTER-AIDED PARAMETRIZATION ALGORITHM FOR TOMOGRAPHIC OBJECTS AND ITS PRACTICAL REALIZATION

Компьютерная томография используется в медицине для решения широкого спектра диагностических задач. Вместе с развитием средств получения снимков активно ведутся разработки в области создания систем компьютерной диагностики. В настоящее время существует ряд методов улучшения визуализации снимков и реконструкции 3D-моделей изучаемых объектов. Это позволяет упростить чтение изображений, но не приводит к автоматическому вычислению параметров исследуемых объектов. Кроме того, существует класс задач параметризации небольших образований или полостей, которые находятся внутри изучаемых объектов и занимают небольшую часть снимка. Известные способы автоматизированной обработки снимков не позволяют выполнять идентификацию и параметризацию подобных объектов. В статье предложены алгоритм и его программная реализация, дающие возможность проводить визуализацию малых объектов, представленных на снимках компьютерной томографии, программно определять их границы и вычислять параметры данных объектов с высокой точностью, что способствует совершенствованию диагностики заболеваний и сокращению количества повторных томографических исследований.

АНАЛИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ; ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ; КОМПЬЮТЕРНАЯ ТОМОГРАФИЯ; СИСТЕМЫ КОМПЬЮТЕРНОЙ ДИАГНОСТИКИ; ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ; АЛГОРИТМ; ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ.

Nowadays X-ray computed tomography is widely used in medicine for solving various diagnostic problems. At the same time there is a large group of software whose function is to automate diagnostic processes, also known as computer-aided diagnosis software. However, there are still some processes which have not been automated yet. This concerns the parameters for calculating small objects of examination, such as pathological tumors, sinuses and so on, which occupy only a small part of the tomographic image. The known methods of automated image processing do not allow carrying out identification and parametrization of such objects. This study has proposed the algorithm and its software implementation allowing to visualize small objects in tomographic images, detect the boundaries of these objects and calculate their parameters with a high precision. This data can help medical professionals to make the diagnosis more precisely and faster and to reduce the number of repeated tomographic tests.

IMAGE ANALYSIS; IMAGE PROCESSING; X-RAY COMPUTED TOMOGRAPHY; COMPUTER-AIDED DIAGNOSIS; PARAMETER EVALUATION; ALGORITHM; APPLICATION SOFTWARE.

В настоящее время компьютерная томография (КТ) используется в медицине для

решения широкого спектра диагностических задач [1]. Вместе с развитием средств

получения томографических снимков активно ведутся разработки в области создания систем компьютерной диагностики (computer-aided diagnosis), позволяющие повысить скорость и точность диагностического процесса. Врачи-радиологи только начинают применять системы компьютерной диагностики в повседневной практике, однако разработка принципов создания подобных систем – активно развивающаяся сфера исследований [2, 3].

В ряде случаев на практике требуется определять числовые параметры объектов на снимках (например, определять объёмы полостей). Пока подобные подсчеты проводятся вручную с помощью косвенных вычислений, что не может конкурировать по точности с методами программной параметризации объектов.

Изобретение многослойной КТ позволило повысить скорость и информативность медицинских исследований. Набор слоёв многослойного томографического снимка позволяет получить исчерпывающие данные о внутреннем строении объекта в пространстве. На сегодняшний день существует ряд методов улучшения визуализации снимков КТ [4, 5] и реконструкции 3D-моделей изучаемого объекта [6–8]. Это позволяет упростить чтение снимков, но не приводит к автоматическому вычислению параметров исследуемых объектов. Другие известные методы интерпретируют слои снимка по отдельности. Примером такого подхода является классификация лёгочных узлов на доброкачественные и злокачественные [9–11]. Это оправдано в тех случаях, когда выполняется классификация объектов, т. е. определяются их качественные признаки принадлежности к какому-либо типу [12, 13].

Для решения задачи параметризации объекта необходима комплексная информация о его строении, для получения которой требуется анализировать в совокупности все слои, содержащие изображение данного объекта. При автоматизированной обработке снимков лёгких и мозга [14–16] для их сегментации [17] и исследования применяются методы «трешолдинга» (разграничения снимка по принципу яркости

пикселей) и анализа гистограмм [18, 19]. Однако существует класс задач параметризации небольших объектов, которые, в отличие от лёгких и мозга, занимают только малую часть снимка. Для подобных объектов указанные выше способы автоматизированной обработки являются неприменимыми. Как правило, такие объекты имеют ярко выраженные границы, обусловленные разницей плотностей тканей внутри исследуемого объекта и за его пределами.

В настоящем исследовании проводится разработка алгоритма программной параметризации для верхнечелюстных пазух, однако данный алгоритм может применяться и для исследования других объектов, обладающих описанными выше свойствами.

Рассмотрим разработанный алгоритм программной параметризации на примере задачи исследования верхнечелюстных пазух. Параметризация малых объектов компьютерной томографии (в данном случае верхнечелюстных пазух) достигается путём выполнения подзадачи поиска границ целевого объекта на всей совокупности срезов томографического снимка, содержащего объект, с последующим анализом полученных данных для определения необходимого параметра.

Каждый слой проекции томограммы даёт точное значение плотности ткани, отображаемой соответствующими пикселями на снимке, которые имеют градации цвета от светлых до тёмных оттенков серого. Чем светлее оттенок серого, тем плотнее ткань в пределах пикселя [20]. Таким образом, информация совокупности вокселей (воксел – аналог пикселя для трёхмерного пространства: область, проецирующаяся на пиксел томографического среза), относящихся к целевому объекту снимка, даёт исчерпывающие сведения о свойствах объекта в каждой точке пространства и делает возможным их дальнейший анализ и исследование.

Так как разрешающая способность современных мониторов не отображает весь диапазон градаций плотностей исследуемого объекта, каждый томографический снимок имеет свой собственный диапазон плотностей, отображаемый с помощью оттенков, находящихся между чёрным и

белым цветами («шкала Хаунсфилда»). Данный диапазон зависит от специфики исследуемых объектов, и точная информация о плотности тканей за пределами этого диапазона теряется [20]. Границы диапазона задаются двумя значениями: центром диапазона и его шириной. Чисто белому цвету пиксела соответствует ткань, превосходящая по плотности диапазон отображения, чисто чёрному цвету — ткань, менее плотная, чем диапазон отображения. Промежуточные оттенки серого цвета пиксела проецируют значения плотности из интервала отображения и позволяют делать выводы о точном значении плотности ткани, находящейся в конкретной точке пространства. Пример слоя томографического снимка приведен на рис. 1. Значение ST на снимке показывает толщину среза данного томографического снимка.

Показатели W (Width) 90 и C (Center) 40 указывают на то, что центр отображаемого снимком диапазона плотностей — 40 HU (Hounsfield Unit, единица Хаунсфилда), а ширина этого диапазона — 90 HU. Следовательно, ткани, находящиеся в интервале от -5 HU до 85 HU, отображаются на снимке как оттенки серого, и точная информация об их плотности сохраняется [21].

Рассмотрим функционирование пред-

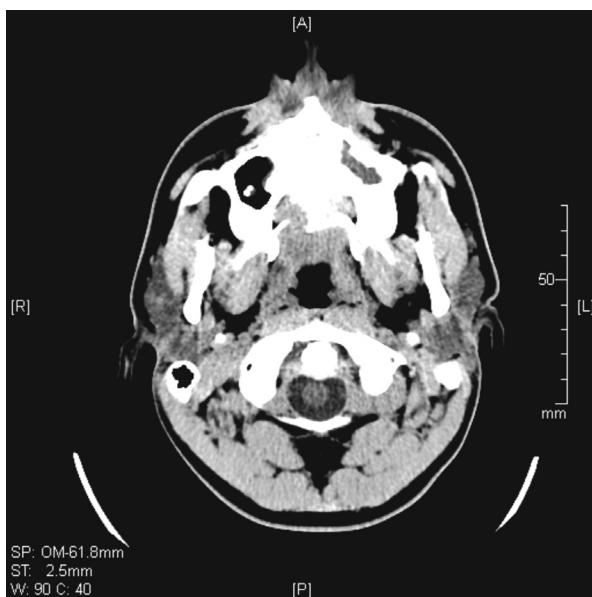


Рис. 1. Пример слоя томографического снимка

ложенного алгоритма определения границ исследуемого объекта на примере исследования верхнечелюстных пазух. Его работа начинается с загрузки в программу пользователем упорядоченных слоёв томографического снимка и идентификации исследуемого объекта. Объем выборки слоёв снимка зависит от размера исследуемого объекта и его специфики. Для черепных образований и полостей оптимальной считается толщина среза от 2 до 3 мм [1]. Следовательно, для анализа исследуемых полостей, линейный размер по оси получения срезов которых не превышает 60 мм, выборка составляет 24 слоя, полученных с шагом 2,5 мм.

В программу вводится также значение толщины среза слоев и указывается граничное значение яркости пикселей в интервале между нулем и единицей (т. е. чёрным и белым цветами, соответственно), которое служит критерием проверки принадлежности пикселей к выбранному объекту в процессе дальнейшей работы алгоритма. В список пикселей на данном слое, относящихся к целевому объекту, добавляется стартовый пиксел. В дальнейшем каждый из пикселей на границе целевой области проверяется на удовлетворение критерию принадлежности исследуемому объекту. В случае удовлетворения критерию проверяемый пиксел пополняет список относящихся к целевой области пикселей. Если пиксел не удовлетворяет значению критерия, он заносится в список пикселей, относящихся к границе исследуемого объекта. Поиск пикселей в рамках стартового слоя заканчивается в момент, когда все граничные пиксели рассмотрены, и дальнейшего расширения исследуемой области не происходит.

Далее следует проверка возможности расширения исследуемой области на соседние слои. Для этого в алгоритме поиск пикселей для каждого нового соседнего слоя проводится повторно. На каждом из этих слоёв процедура поиска начинается с заполнения списка пикселей в соответствии с наличием на соседних слоях граничных пикселей, относящихся к исследуемому объекту, и проходит аналогично соответствующей процедуре на стартовом слое. В тот момент, когда на рассматриваемом

слое не оказывается пикселей, удовлетворяющих критерию принадлежности, расширение области на соседние слои в данном направлении завершается. Как только завершается расширение области на соседние слои в обоих направлениях, поиск новых пикселей объекта заканчивается.

В результате работы алгоритма формируются два множества пикселей, одно из которых относится к исследуемому объекту, а второе состоит из пикселей, составляющих его границы. Толщина границ исследуемого объекта гарантированно не превышает размера одного пиксела.

Анализ совокупности пикселей объекта позволяет определять объём и распределение плотностей содержимого верхнечелюстных пазух. Распределение плотностей исследуемого объекта дает возможность делать выводы о его свойствах.

На рис. 2 изображен интерфейс разработанного программного обеспечения, демонстрирующий результаты определения объёма целевого объекта. Интерфейс позволяет переключаться между слоями снимка, выделять цветом проекции изучаемого объекта на соответствующий слой. Инстру-

ментально переключение между слоями реализуется с помощью строк таблицы, расположенной в левой части формы. Каждая строка таблицы соответствует слою снимка. Программный комплекс позволяет определять параметры выбранного объекта: площади и объемы послойных срезов и объём объекта в целом. Данные характеристики определяются по количеству пикселей, входящих в область исследуемого объекта. Объёмы объекта – послойный и суммарный – определяются как произведение единичного объёма воксела на количество пикселей в слое и в объекте соответственно. А площадь послойного среза определяется как произведение площади одного пиксела на количество пикселей на срезе.

Как видно из рис. 2, в таблице слева приведены послойные характеристики выбранного на снимке малого объекта, в поле «Результат» справа показан вычисленный с помощью программы объём выбранного объекта в целом. В данном случае объём составил 7,77 мл.

Рис. 3 демонстрирует работу алгоритма. На рисунке приведены фрагменты восьми слоёв томографического снимка, на ко-



Рис. 2. Внешний вид интерфейса программного обеспечения

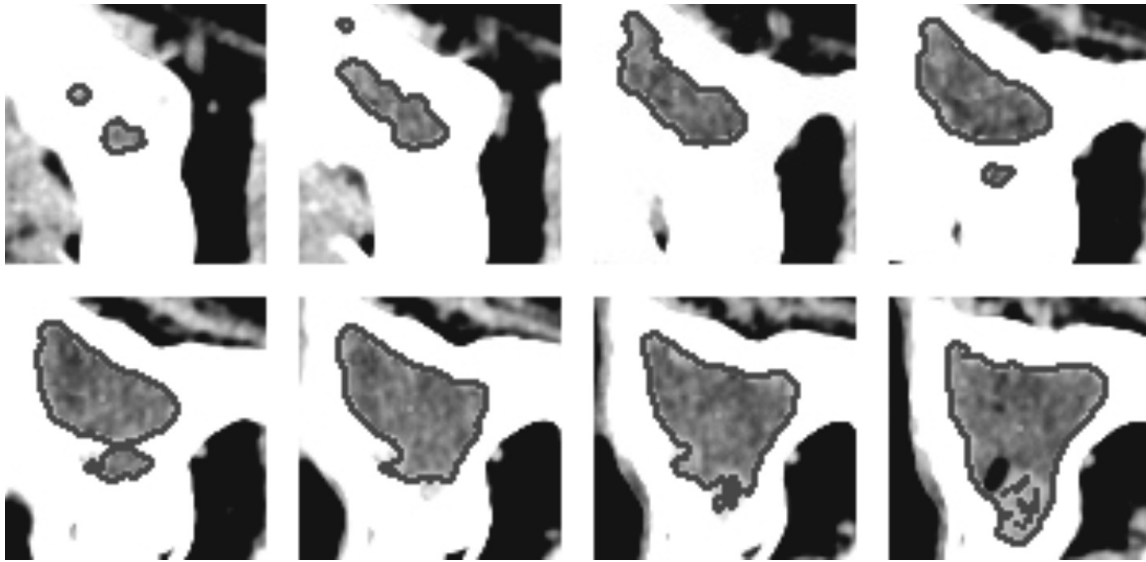


Рис. 3. Зоны исследуемого объекта на слоях томографического снимка

торых показан исследуемый объект. Программная идентификация принадлежащих объекту пикселей на всех слоях позволяет учитывать любые неоднородности его структуры. Причем исследуемый объект может иметь самую сложную конфигурацию. Именно поэтому использование разработанного алгоритма позволяет в десять раз повысить точность исследований по сравнению с косвенными вычислениями.

Потенциальным источником погрешности при вычислении объёма исследуемого объекта предлагаемым методом является дискретность пикселей на слоях томографического снимка. Пиксели, составляющие границу объекта, могут частично относиться к объекту, но не более чем наполовину. Оценим относительную погрешность вычислений как отношение половины количества граничных пикселей к общему количеству пикселей в объекте:

$$\delta_v = \frac{N_b}{2N_o} 100 \%,$$

где δ_v — относительная погрешность, N_b — количество пикселей, составляющих границу объекта, а N_o — количество пикселей, принадлежащих объекту. Относительная погрешность оценивалась на 50 объектах томографических снимков и не превышала 4,2 %. В общем случае отно-

сительная погрешность будет уменьшаться с возрастанием объёма исследуемого объекта.

Алгоритм определения границ объекта, описанный выше, пригоден для выполнения комплексных задач. В качестве примера рассмотрим вариант с комбинацией двух областей захвата, начинающихся из одной точки, с различными значениями критерия граничной яркости. На рис. 4 изображена

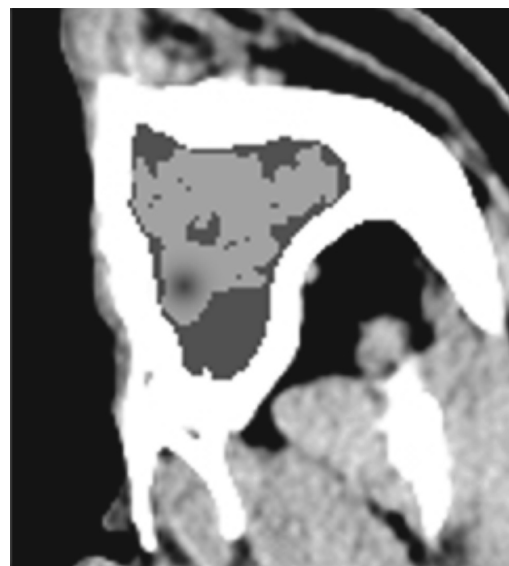


Рис. 4. Зоны исследуемого объекта на слое томографического снимка

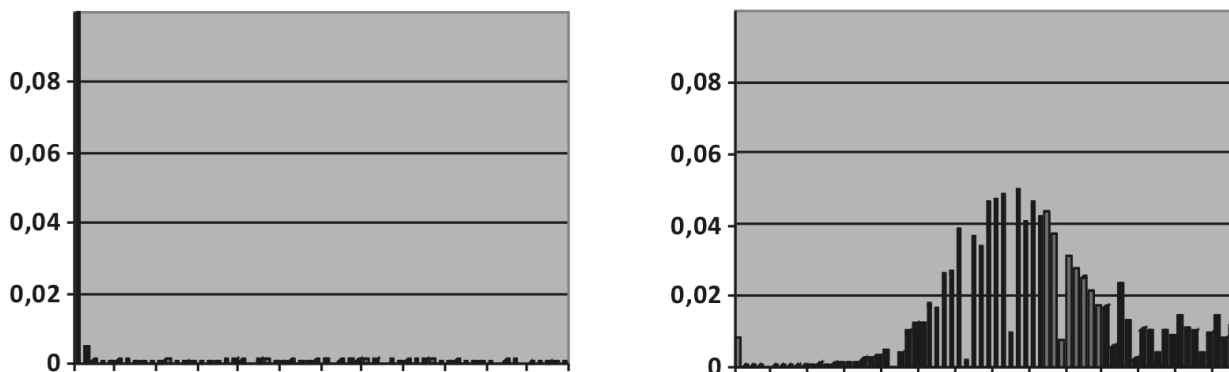


Рис. 5. Гистограммы распределения плотностей для двух верхнечелюстных пазух на интервале от -5HU до 55HU слева – без деформации; справа – деформированная

верхнечелюстная пазуха, определение границ которой было проведено в два этапа из одной и той же стартовой точки с различным значением критерия яркости.

Путем вычитания из множества пикселей первой области множества пикселей второй было получено множество пикселей, описывающих отличные от нормы наросты во внутричерепной полости, плотность ткани которых меньше плотности границ полости, но больше плотности воздуха.

Разработанный алгоритм и его программная реализация дают возможность выполнять визуализацию плотностей исследуемых объектов. На рис. 5 показаны гистограммы распределения плотностей для двух верхнечелюстных пазух. Анализ гистограмм позволяет сделать выводы о свойствах объектов. Разброс значений плотностей содержимого рассматриваемой в статье правой верхнечелюстной пазухи, приведенный на гистограмме, изображенной в правой части рис. 5, свидетельствует о ее неоднородном строении и вероятной деформации. Для сравнения в левой части рисунка изображена гистограмма недеформированной левой верхнечелюстной

пазухи, плотность содержимого которой в основном меньше -5HU , что соответствует чёрному цвету на снимке и крайнему левому столбцу гистограммы (значение в крайнем левом столбце левой гистограммы приближенно равно 0,93).

Применение разработанного алгоритма позволяет автоматизировать процесс анализа послойных снимков компьютерной томографии. Комбинирование зон захвата дает возможность определять границы объектов, имеющих более сложную структуру. Результаты, демонстрируемые разработанным алгоритмом, были оценены докторами Самарской областной клинической больницы имени В.Д. Середавина как достоверные. По мнению заведующего отделением, главного специалиста по детской челюстно-лицевой хирургии Министерства здравоохранения Самарской области А.С. Серегина выполненная работа будет способствовать совершенствованию диагностики стоматологических и оториноларингических заболеваний и сокращению количества повторных томографических исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hofer M. CT Teaching manual: a systematic approach to CT reading. Thieme, 2007. 224 с.
2. Van Ginneken B., Schaefer-Prokop CM., Prokop M. Computer-aided diagnosis: how to move from the laboratory to the clinic // Radiology.

2011. Vol. 261. Iss. 3. Pp. 719–732. doi: 10.1148/radiol.11091710.

3. Doi K. Current status and Future Potential of Computer-Aided Diagnosis in Medical Imaging // The British Journal of Radiology. 2005. Vol. 78.

Рр. 3–19. doi:10.1259/bjr/82933343

4. **Seletchi E., Dului O.** Image Processing and Data Analysis in Computed Tomography // Romanian Journal of Physics. 2007. Vol. 1. Pp. 764–774. [Электронный ресурс] / URL: http://www.nipne.ro/rjp/2007_52_5-6/0667_0667.pdf (Дата обращения: 19.06.2015).

5. **Boussion N., Fayad H., Le Pogam A., Pradier O., Visyikis D.** Image Processing Methods in CT for Radiotherapy Applications // Theory and Applications of CT Imaging and Analysis. InTech. 2011. Pp. 127–142. [Электронный ресурс] / URL: <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/14772.pdf> (Дата обращения: 20.06.2015).

6. **Maher M., Kalra M., Sahani D., Perumpillichira J., Rizzo S., Saini S., Mueller P.** Techniques, Clinical Applications and Limitations of 3D Reconstruction in CT of the Abdomen // Korean Journal of Radiology. 2004. Vol. 5. Iss. 1. Pp. 55–67. doi: 10.3348/kjr.2004.5.1.55

7 **Kim H.C., Park S.H., Park S.I., Shin H.C., Park S.J., Kim H.H., Kim Y.T., Bae W.K., Kim I.Y.** Three-dimensional reconstructed images using multidetector computed tomography in evaluation of the biliary tract // Abdominal Imaging. 2014. Vol. 29. Iss. 4. Pp. 472–478. doi: 10.1007/s00261-003-0123-x

8. **Xu F., Mueller K.** Real-time 3D computed tomographic reconstruction using commodity graphics hardware // Physics in Medicine and Biology. 2007. Vol. 52. Iss. 12. Pp. 3405–3419. doi:10.1088/0031-9155/52/12/006

9. **El-Baz A., Beache G., Gimel'farb G., Suzuki K., Okada K., Elnakib A., Soliman A., Abdollahi B.** Computer-aided diagnosis systems for lung cancer: challenges and methodologies // International Journal of Biomedical Imaging. 2013. Vol. 2013. Pp. 1–46. doi: 10.1155/2013/942353

10. **Chen H., Xu Y., Ma Y., Ma B.** Neural network ensemble-based computer-aided diagnosis for differentiation of lung nodules on CT images: Clinical evaluation // Academic Radiology. 2010. Vol. 17. Iss. 5. Pp. 595–602. doi: 10.1016/j.acra.2009.12.009

11. **Montejo L., Jia J., Kim H., Netz U., Blaschke S., Müller G., Hielscher A.** Computer-aided diagnosis of rheumatoid arthritis with optical tomography, Part1: feature extraction // Journal of biomedical optics. 2013. Vol. 18. Iss. 7. Pp. 123–137. doi: 10.1117/1.JBO.18.7.076001

12. **Montejo L., Jia J., Kim H., Netz U., Blaschke S., Müller G., Hielscher A.** Computer-

aided diagnosis of rheumatoid arthritis with optical tomography. Part 2: Image classification // Journal of biomedical optics. 2013. Vol. 18. Iss. 7. Pp. 138–150. doi: 10.1117/1.JBO.18.7.076002

13. **Chen H., Wang X.H., Ma D.Q., Ma B.R.** Neural network-based computer-aided diagnosis in distinguishing malignant from benign solitary pulmonary nodules by computed tomography // Chinese Medical Journal. 2007. Vol. 120. Iss. 14. Pp. 1211–1215. [Электронный ресурс] / URL: http://124.205.33.103:81/ch/reader/create_pdf.aspx?file_no=200771851284230&2016_id=2007&quarter_id=14&falg=1 (Дата обращения: 20.06.2015).

14. **Hussien R., Supriyanto E., Anati N., Azmira N., Illani N., Mahfooz R.** Digital processing for Computed Tomography Images: Brain Tumor Extraction and Histogram Analysis // Mathematics and Computers in Contemporary Science. WSEAS Press, 2013. Pp. 119–128.

15. **Homma N.** CT Image Based Computer-Aided Lung Cancer Diagnosis // Theory and Applications of CT Imaging and Analysis. In Tech. 2011. Pp. 3–14. [Электронный ресурс] / URL: <http://www.intechopen.com/books/theory-and-applications-of-ct-imaging-and-analysis/ct-image-based-computer-aided-lung-cancer-diagnosis> (Дата обращения: 20.06.2015).

16. **Zhou C., Chan H.-P., Sahiner B.** Computer-aided detection of pulmonary embolism in computed tomographic pulmonary angiography (CTPA): Performance evaluation with independent data sets // Medical Physics. 2009. Vol. 36. Iss. 8. Pp. 3385–3396. doi:10.1118/1.3157102

17. **Gonzalez R., Woods E.** Digital Image Processing. Prentice Hall, 2007. 976 p.

18. **Pratt W.** Digital Image Processing: PIKS Scientific Inside. Wiley-Interscience, 2007. 812 p.

19. **Seletchi E., Sutac V.** Image Analysis in X-ray Computed Tomography // The 1st Internat. Conf. on Virtual Learning. ICVL. 2006. Pp. 187–194. [Электронный ресурс] / URL: http://fmi.unibuc.ro/cniv/2006/disc/icvl/documente/pdf/met/16_seletchi.pdf (Дата обращения: 21.06.2015).

20. **Romans L.** Computed Tomography for Technologists: A Comprehensive Text. LWW, 2010. 400 p.

21. **Kelley L., Petersen C.** Workbook for Sectional Anatomy for Imaging Professionals. Mosby, 2012. 256 p.

REFERENCES

1. **Hofer M.** *CT Teaching manual: a systematic approach to CT reading*. Thieme, 2007, 224 p.
2. **Van Ginneken B., Schaefer-Prokop C.M., Prokop M.** Computer-aided diagnosis: how to move from the laboratory to the clinic, *Radiology*, 2011, Vol. 261, Issue 3, Pp. 719–732. doi: 10.1148/radiol.11091710
3. **Doi K.** Current status and Future Potential of Computer-Aided Diagnosis in Medical Imaging, *The British Journal of Radiology*, 2005, Vol. 78, Pp. 3–19. doi:10.1259/bjr/82933343
4. **Seletchi E., Dulu O.** Image Processing and Data Analysis in Computed Tomography, *Romanian Journal of Physics*, 2007, Vol. 1, Pp. 764–774. Available: http://www.nipne.ro/rjp/2007_52_5-6/0667_0667.pdf (Accessed: 19.06.2015).
5. **Bousson N., Fayad H., Le Pogam A., Pradier O., Visyikis D.** Image Processing Methods in CT for Radiotherapy Applications, *Theory and Applications of CT Imaging and Analysis*, InTech, 2011, Pp. 127–142. Available: <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/14772.pdf> (Accessed: 20.06, 2015).
6. **Maher M., Kalra M., Sahani D., Perumilichira J., Rizzo S., Saini S., Mueller P.** Techniques, Clinical Applications and Limitations of 3D Reconstruction in CT of the Abdomen, *Korean Journal of Radiology*, 2004, Vol. 5, Issue 1, Pp. 55–67. doi: 10.3348/kjr.2004.5.1.55
7. **Kim H.C., Park S.H., Park S.I., Shin H.C., Park S.J., Kim H.H., Kim Y.T., Bae W.K., Kim I.Y.** Three-dimensional reconstructed images using multidetector computed tomography in evaluation of the biliary tract, *Abdominal Imaging*, 2014, Vol. 29, Issue 4, Pp. 472–478. doi: 10.1007/s00261-003-0123-x
8. **Xu F., Mueller K.** Real-time 3D computed tomographic reconstruction using commodity graphics hardware, *Physics in Medicine and Biology*, 2007, Vol. 52, Issue 12, Pp. 3405–3419. doi: 10.1088/0031-9155/52/12/006
9. **El-Baz A., Beache G., Gimel'farb G., Suzuki K., Okada K., Elnakib A., Soliman A., Abdollahi B.** Computer-aided diagnosis systems for lung cancer: challenges and methodologies, *International Journal of Biomedical Imaging*, 2013, Vol. 2013, Pp. 1–46 doi: 10.1155/2013/942353
10. **Chen H., Xu Y., Ma Y., Ma B.** Neural network ensemble-based computer-aided diagnosis for differentiation of lung nodules on CT images: Clinical evaluation, *Academic Radiology*, 2010, Vol. 17, Issue 5, Pp. 595–602. doi: 10.1016/j.acra.2009.12.009
11. **Montejo L., Jia J., Kim H., Netz U., Blaschke S., Müller G., Hielscher A.** Computer-aided diagnosis of rheumatoid arthritis with optical tomography, Part1: feature extraction, *Journal of biomedical optics*, 2013, Vol. 18, Issue 7, Pp. 123–137. doi: 10.1117/1.JBO.18.7.076001
12. **Montejo L., Jia J., Kim H., Netz U., Blaschke S., Müller G., Hielscher A.** Computer-aided diagnosis of rheumatoid arthritis with optical tomography, Part 2: Image classification, *Journal of biomedical optics*, 2013, Vol. 18, Issue 7, Pp. 138–150. doi: 10.1117/1.JBO.18.7.076002
13. **Chen H., Wang X.H., Ma D.Q., Ma B.R.** Neural network-based computer-aided diagnosis in distinguishing malignant from benign solitary pulmonary nodules by computed tomography, *Chinese Medical Journal*, 2007, Vol. 120, Issue 14, Pp. 1211–1215. Available: http://124.205.33.103:81/ch/reader/create_pdf.aspx?file_no=200771851284230&year_id=2007&quarter_id=14&falq=1 (Accessed: 20.06.2015).
14. **Hussien R., Supriyanto E., Anati N., Azmira N., Illani N., Mahfooz R.** Digital processing for Computed Tomography Images: Brain Tumor Extraction and Histogram Analysis, *Mathematics and Computers in Contemporary Science*, WSEAS Press, 2013, Pp. 119–128.
15. **Homma N.** CT Image Based Computer-Aided Lung Cancer Diagnosis, *Theory and Applications of CT Imaging and Analysis. In Tech*, 2011, Pp. 3–14. Available: <http://www.intechopen.com/books/theory-and-applications-of-ct-imaging-and-analysis/ct-image-based-computer-aided-lung-cancer-diagnosis> (Accessed: 20.06.2015).
16. **Zhou C., Chan H.-P., Sahiner B.** Computer-aided detection of pulmonary embolism in computed tomographic pulmonary angiography (CTPA): Performance evaluation with independent data sets, *Medical Physics*, 2009, Vol. 36, Issue 8, Pp. 3385–3396. doi:10.1118/1.3157102
17. **Gonzalez R., Woods E.** *Digital Image Processing*. Prentice Hall, 2007, 976 p.
18. **Pratt W.** *Digital Image Processing: PIKS Scientific Inside*. Wiley-Interscience, 2007, 812 p.
19. **Seletchi E., Sutac V.** Image Analysis in X-ray Computed Tomography, *The 1st International Conference on Virtual Learning. ICVL*, 2006, Pp. 187–194. Available: http://fmi.unibuc.ro/cniv/2006/disc/icvl/documente/pdf/met/16_seletchi.pdf (Accessed: 21.06.2015).
20. **Romans L.** *Computed Tomography for Technologists: A Comprehensive Text. LWW*, 2010, 400 p.
21. **Kelley L., Petersen C.** *Workbook for Sectional Anatomy for Imaging Professionals*. Mosby, 2012, 256 p.

ЛИМАНОВА Наталия Игоревна – профессор кафедры программного обеспечения и управления в технических системах факультета информационных технологий Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, доктор технических наук.

443010, Россия, г. Самара, ул. Л. Толстого, д. 23.

E-mail: Nataliya.I.Limanova@gmail.com

LIMANOVA Nataliia I. *Volga State University of Telecommunications and Informatics.*

443010, Leo Tolstoy Str. 23, Samara, Russia.

E-mail: Nataliya.I.Limanova@gmail.com

АТАЕВ Сергей Геннадьевич – аспирант кафедры программного обеспечения и управления в технических системах факультета информационных технологий Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики.

443010, Россия, г. Самара, ул. Л. Толстого, д. 23.

E-mail: sergeyataev@gmail.com

ATAEV Sergey G. *Volga State University of Telecommunications and Informatics.*

443010, Leo Tolstoy Str. 23, Samara, Russia.

E-mail: sergeyataev@gmail.com

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ
«НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.
ИНФОРМАТИКА. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ. УПРАВЛЕНИЕ»
«ST. PETERSBURG STATE POLYTECHNICAL UNIVERSITY JOURNAL.
COMPUTER SCIENCE. TELECOMMUNICATIONS AND CONTROL SYSTEMS»

№ 3(247) 2016

Учредитель – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-51457 от 19.10.2012 г.

Редакция журнала

д-р техн. наук, профессор *А.С. Коротков* – главный редактор
Е.А. Калинина – литературный редактор, корректор
Г.А. Пышкина – ответственный секретарь, выпускающий редактор

Телефон редакции (812)552-62-16, 297-18-21

E-mail: infocom@spbstu.ru

Компьютерная верстка *А.Н. Смирнов*

Перевод на английский язык *А.С. Колгатина*

Лицензия ЛР № 020593 от 07.08.97

Подписано в печать 21.10.2016. Формат 60×84 1/8. Бум. тип. № 1.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 6,97. Уч.-изд. л. 6,97. Тираж 1000. Заказ

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Издательство Политехнического университета
член Издательско-полиграфической ассоциации университетов России
Адрес университета и издательства: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

УСЛОВИЯ ПУБЛИКАЦИИ СТАТЕЙ

в журнале «Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление»

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Журнал «Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Телекоммуникации. Управление» является периодическим печатным научным рецензируемым изданием. Зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-51457 от 19 октября 2012 г. С 2008 года выпускается в составе сериального периодического издания «Научно-технические ведомости СПбГПУ» (ISSN 1994-2354).

Издание с 2002 года входит в Перечень ведущих научных рецензируемых журналов и изданий (перечень ВАК) и принимает для печати материалы научных исследований, а также статьи для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук и кандидата наук по следующим основным научным направлениям: **ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ, ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**. Научные направления журнала учитываются ВАК Минобрнауки РФ при защите докторских и кандидатских диссертаций в соответствии с Номенклатурой специальностей научных работников.

Сведения о публикациях представлены в РИНЦ, в Реферативном журнале ВИНИТИ РАН, в международной справочной системе «Ulrich's Periodical Directory».

Периодичность выхода журнала – 4 номера в год.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ПРЕДОСТАВЛЯЕМЫМ МАТЕРИАЛАМ

2.1. Оформление материалов

1. Рекомендуемый объем статей для авторов с ученой степенью доктора наук, званием профессора, соискателей ученой степени доктора наук (докторантов) 12–20 страниц формата А-4 с учетом графических вложений. Количество графических вложений (диаграмм, графиков, рисунков, таблиц, фотографий и т. п.) не должно превышать 4.

2. Рекомендуемый объем статей для преподавателей, авторов без ученой степени, соискателей ученой степени кандидата наук – 8–15 страниц формата А-4; аспирантов – 8 страниц формата А-4 с учетом графических вложений. Количество графических вложений (диаграмм, графиков, рисунков, таблиц, фотографий и т. п.) не должно превышать 3.

3. Авторы должны придерживаться следующей обобщенной структуры статьи: вводная часть (0,5–1 стр., актуальность, существующие проблемы); основная часть (постановка и описание задачи, изложение и суть основных результатов); заключительная часть (0,5–1 стр., предложения, выводы), список литературы (оформление по ГОСТ 7.05.-2008).

4. Число авторов статьи не должно превышать трех человек.

5. Набор текста осуществляется в редакторе **MS Word**, формул – в редакторе **MathType**. Таблицы набираются в том же формате, что и основной текст.

6. Шрифт – TNR, размер шрифта основного текста – 14, интервал – 1,5; таблицы большого размера могут быть набраны 12 кеглем. Параметры страницы: поля слева – 3 см, сверху, снизу – 2,5 см, справа – 2 см, текст размещается без переносов. Абзацный отступ – 1 см.

2.2. Предоставление материалов

Вместе с материалами статьи должны быть обязательно предоставлены:

- номер УДК в соответствии с классификатором (в заголовке статьи);
- аннотация на русском и английском языках;
- ключевые слова (5–7) на русском и английском языках;
- сведения об авторах на русском и английском языках: ФИО, место работы, должность, ученое звание, ученая степень, контактные телефоны, e-mail;
- аспиранты представляют документ отдела аспирантуры, заверенный печатью;
- акт экспертизы о возможности опубликования материалов в открытой печати.

С авторами статей заключается издательский лицензионный договор.

Предоставление всех материалов осуществляется в электронном виде через личный кабинет **ЭЛЕКТРОННОЙ РЕДАКЦИИ** по адресу <http://journals.spbstu.ru>

2.3. Рассмотрение материалов

Предоставленные материалы (п. 2.2) первоначально рассматриваются редакционной коллегией и передаются для рецензирования. После одобрения материалов, согласования различных вопросов с автором (при необходимости) редакционная коллегия сообщает автору решение об опубликовании статьи. В случае отказа в публикации статьи редакция направляет автору мотивированный отказ.

При отклонении материалов из-за нарушения сроков подачи, требований по оформлению или как не отвечающих тематике журнала материалы не публикуются и не возвращаются.

Редакционная коллегия не вступает в дискуссию с авторами отклоненных материалов.

Публикация материалов аспирантов очной бюджетной формы обучения осуществляется бесплатно в соответствии с очередностью.

При поступлении в редакцию значительного количества статей их прием в очередной номер может закончиться **ДОСРОЧНО**.

Более подробную информацию можно получить:

на сайте журнала <http://ntv.spbstu.ru>

по телефону редакции +7(812) 552-62-16 с 10⁰⁰ до 18⁰⁰ Галина Александровна

или по e-mail: infocom@spbstu.ru