СИСТЕМЫ АНАЛИЗА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

ISSN 2782-2001

№ 1 (85) **2022**

УДК 681.51(06)
С 409

Учредитель

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

Редакционная коллегия

Главный редактор

Лемешко Борис Юрьевич, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

Заместители главного редактора

Вострецов Алексей Геннадьевич, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск
Шокин Юрий Иванович, академик, д-р физ.-мат. наук, проф., Институт вычислительных технологий СО РАН, г. Новосибирск

Ответственный секретарь

Воевода Александр Александрович, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

Члены редколлегии

Володин Андрей Игоревич, канд. физ.-мат. наук, доктор философии по статистике Университета Регины, проф., Канада
Воронин Владимир Викторович, д-р техн. наук, доцент, ТОГУ, г. Хабаровск
Воропай Николай Иванович, чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., Институт систем энергетики им. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск
Воскобойников Юрий Евгеньевич, д-р физ.-мат. наук, проф., Сибстрин, г. Новосибирск
Гайдук Анатолий Романович, д-р техн. наук, проф., ЮФУ, г. Таганрог
Генералов Владимир Михайлович, д-р техн. наук, ФБУН ГНЦ ВБ «Вектор» Роспотребнадзора, г. Новосибирск
Григорьев Юрий Дмитриевич, д-р техн. наук, проф., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», г. Санкт-Петербург
Гриф Михаил Геннадьевич, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск
Дмитриев Александр Капитонович, д-р физ.-мат. наук, НГТУ, г. Новосибирск
Комаров Андрей Константинович, д-р физ.-мат. наук, проф., Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск
Крюков Андрей Васильевич, д-р техн. наук, проф., ИрГУПС, г. Иркутск
Лисицина Лилия Ивановна, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск
Наумова Елена Николаевна, д-р техн. наук, проф., Университет Тафтса, США
Носек Ярослав, д-р техн. наук, проф., Технический университет Либерец, Чехия
Ронжин Андрей Леонидович, д-р техн. наук, проф., СПИИРАН, г. Санкт-Петербург
Рубан Анатолий Иванович, д-р техн. наук, проф., СФУ, г. Красноярск
Сидоров Денис Николаевич, д-р физ.-мат. наук, проф., Институт систем энергетики им. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск
Уранчимэг Тудевдагва, д-р техн. наук, проф., Хемницкий технический университет, Германия
Фомин Василий Михайлович, д-р физ.-мат. наук, проф., Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, г. Новосибирск
Хабаров Валерий Иванович, д-р техн. наук, проф., СГУПС, г. Новосибирск
Ханова Анна Алексеевна, д-р техн. наук, проф., АГТУ, г. Астрахань
Хлебников Михаил Владимирович, д-р физ.-мат. наук, ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва
Шандаров Станислав Михайлович, д-р физ.-мат. наук, проф., ТУСУР, г. Томск

Адрес редакции и издателя: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, НГТУ
Тел. (383) 346-56-88, тел., факс (383) 344-49-98
E-mail: nauchvest@corp.nstu.ru
Web Site: http://journals.nstu.ru/vestnik/

16+

Индекс: 82962 («РОСПЕЧАТЬ») **УДК 681.51(06)**

© Коллектив авторов, 2022
© Новосибирский государственный технический университет, 2022

СИСТЕМЫ АНАЛИЗА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

ISSN 2782-2001

№ 1 (85) **2022**

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Воевода А.А., Шипагин В.И. Расчет регулятора для многоканального объекта с нестационарными параметрами, содержащего звенья запаздывания 7

Воскобойников Ю.Е., Боева В.А. Идентификация квадратичного ядра уравнения Вольтерра для моделирования нелинейных динамических систем 25

Данилов Г.К., Еделев А.В. Разработка геоинформационной системы для исследования живучести систем энергетики 41

Калытюк И.С., Французова Г.А., Гунько А.В. Заключительные этапы проектирования системы сбора и предиктивного анализа данных социальных медиа 59

Косимов А.А. О распознавании автора текстового фрагмента на основе частотности буквенных биграмм 73

Майстренко А.В., Светлаков А.А. Оценивание параметров дифференциального уравнения, описывающего процессы запуска и останова насосного агрегата 83

Филюшов В.Ю. Полиномиальный метод синтеза регуляторов по задающему и возмущающим воздействиям 93

Шоназаров П.М., Холов Ф.Т., Саидов Б.Б. Метод цифровых водяных символов для совершенствования объектов на базе кластеров и значения восприятия 109

Кручинин Д.В. Методика использования базы знаний производящих функций двух переменных 121

Правила для авторов 140

Корректор *Л.Н. Киншт*
Компьютерная верстка *С.И. Ткачева*

Новосибирский государственный технический университет
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
Издание соответствует коду 95 2000 ОК 005-93 (ОКП)

Журнал зарегистрирован Комитетом РФ по печати. Свидетельство о регистрации
средства массовой информации ПИ № ФС77-76010 от 03 июля 2019 г.
Периодичность издания – 4 номера в год.
Подписано в печать 14.03.2022. Выход в свет 25.03.2022.
Формат 70 × 108 1/16. Бумага офсетная. Тираж 300 экземпляров.
Уч.-изд. л. 12,6. Печатных листов 9,0. Издательский № 17. Заказ № 107
Цена свободная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

ANALYSIS AND DATA PROCESSING SYSTEMS

ISSN 2782-2001

№ 1 (85) **2022**

УДК 681.51(06)
С 409

Journal was established by

Novosibirsk State Technical University

Editorial board

Chief editor

Lemeshko B. Yu., D.Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

Deputy chief editor

Vostretsov A. G., D.Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF
Shokin Yu. I., D.Sc. (Phys.& Math.), Institute of Computational Technologies, Novosibirsk, RF

Executive Secretary

Voevoda A. A., D.Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

The members of the editorial Board

Volodin A. I., D.Sc. (Phys. & Math.), Doctor of Philosophy in Statistics from the University of Regina, Professor of Statistics University of Regina, Canada
Voronin V. V., D.Sc. (Eng.), Pacific national University, Khabarovsk, RF
Voropay N. I., Corresponding Member, Russian Academy of Sciences, D.Sc. (Eng.), Melentiev Energy Systems Institute, Irkutsk, RF
Voskoboinikov Yu. E., D.Sc. (Phys. & Math.), Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Novosibirsk, RF
Gaiduk A. R., D.Sc. (Eng.), Southern Federal University, Taganrog, RF
Generalov V. M., D.Sc. (Eng.), FBUN GNTS VB «Vektor» Rospotrebnadzora, Novosibirsk, RF
Grigor'ev Yu. D., D.Sc. (Eng.), Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint-Petersburg, RF
Grif M. G., D.Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF
Dmitriev A. K., D.Sc. (Phys. & Math.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF
Komarov A. K., D.Sc. (Phys. & Math.), Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, RF
Kryukov A. V., D.Sc. (Eng.), Irkutsk State Transport University, Irkutsk, RF
Lisitcina L. I., D.Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF
Naumova E. N., PhD. (Math.), Tufts University, USA
Nosek J., D.Sc. (Eng.), Technical University of Liberec, Czech Republic
Ronzhin A. L., D.Sc. (Eng.), St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of sciences, Saint-Petersburg, RF
Ruban A. I., D.Sc. (Eng.), Siberian Federal University, Krasnoyarsk, RF
Sidorov D. N., D.Sc. (Phys. & Math.), Melentiev Energy Systems Institute, Irkutsk, RF
Uranchimeg T., D.Sc. (Eng.), Technische Universität Chemnitz, Germany
Fomin V. M., D.Sc. (Phys. & Math.), Khristianovich Institut of theoretical and applied mechanics SB RAS, Novosibirsk, RF
Khabarov V. I., D.Sc. (Eng.), Siberian Transport University, Novosibirsk, RF
Khanova A. A., D.Sc. (Eng.), Astrakhan State Technical University, Astrakhan, RF
Khlebnikov M. V., D.Sc. (Phys. & Math.), Institute of Control Sciences, Moscow, RF
Shandarov S. M., D.Sc. (Phys. & Math.), Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, RF

Editorial Adress: 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation
Tel. (383) 346-56-88, Fax (383) 344-49-98
E-mail: nauchvest@corp.nstu.ru
Web Site: http://journals.nstu.ru/vestnik/

УДК 681.51(06)

© Authors, 2022
© Novosibirsk State Technical University, 2022

ANALYSIS AND DATA PROCESSING SYSTEMS

ISSN 2782-2001

№ 1 (85) **2022**

CONTENTS

INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

Voevoda A.A., Shipagin V.I. Calculation of a controller for a multi-channel object with non-stationary parameters containing delay links 7

Voskoboinikov Yu.E., Boeva V.A. Identification of the quadratic kernel of the Volterra equation for modeling non-linear dynamic systems 25

Danilov G.K., Edelev A.V. Development of a geographic information system to study the resilience of energy systems 41

Kalytyuk I.S., Frantsuzova G.A., Gunko A.V. Final stages of designing a system for collecting and predictive analysis of social media data 59

Kosimov A.A. On the recognition of the author of a text fragment based on the frequency of alphabetic bigrams 73

Maistrenko A.V., Svetlakov A.A. Estimation of parameters of the differential equation describing the processes of starting and stopping the pumping unit 83

Filiushov V.Yu. The polynomial method of controller synthesis based on the reference and disturbing signals 93

Shonazarov P.M., Kholov F.T., Saidov B.B. The method of digital watermarking for improving objects based on clusters and perception values 109

Kruchinin D.V. Methodology for using the knowledge base of generating two-variable functions 121

Rules for authors 140

Editor *L.N. Kinsht*
Computer imposition *S.I. Tkacheva*

Novosibirsk State Technical University
20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Publication frequency – 4 numbers a year.
Signed in print March 14, 2022.
Date of publication March 25, 2022. Format 70 × 108 1/16
Offset Paper. Circulation is 300 copies. Educational-ed. liter. 12,6. Printed pages 9,0.
Publishing number 17. Order number 107

It is printed in printing house of Novosibirsk State Technical University
20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073

ISSN 2782-2001
Системы анализа
и обработки данных
том 85, № 1, 2022, с. 7–24

http://journals.nstu.ru/vestnik
Analysis and data
processing systems
Vol. 85, No. 1, 2022, pp. 7–24

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND MANAGEMENT

УДК 681.5.037.4

DOI: 10.17212/2782-2001-2022-1-7-24

Расчет регулятора для многоканального объекта с нестационарными параметрами, содержащего звенья запаздывания*

А.А. ВОЕВОДА[a], В.И. ШИПАГИН[b]

630073, Новосибирская область, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет

[a] *ucit@ucit.ru* [b] *shipagin@mail.ru*

Нестационарными линейными системами или линейными системами с переменными параметрами называют системы, которые описываются линейными дифференциальными уравнениями с переменными коэффициентами. Рассмотрение задач синтеза регулятора для таких систем может быть продиктовано необходимостью удовлетворения некоторого запаса устойчивости системы автоматического управления к незначительным возмущениям как со стороны датчиков, считывающих состояние системы, так и со стороны изменения параметров самого объекта с течением времени. Кроме того, реальный объект управления по сравнению с его математической моделью довольно часто содержит некоторые неопределенности, которые не должны существенно повлиять на качество управления.

Настоящая работа посвящена рассмотрению примера синтеза многоканального регулятора, который обеспечивал бы хорошее качество управления (запас устойчивости), если объект управления содержит некоторые неопределенности или его математическая модель неизвестна с точностью до определенных параметров. Кроме того, задача управления усложнена звеном запаздывания в структуре объекта (то есть существует некоторый промежуток времени отсутствия реакции со стороны объекта регулирования на управляющее воздействие).

В качестве метода синтеза регулятора выбран модифицированный алгоритм полиномиального матричного разложения матричной передаточной функции системы с учетом сохранений полюсов звена запаздывания. Для наглядности демонстрации работы алгоритма взята линейная модель неустойчивого объекта управления с многоканальной структурой, состоящая из двух входных и двух выходных каналов. Описание объекта используется в виде матричной передаточной функции, которая показывает взаимодействие в многоканальной системе управления и взаимосвязь между каналами. Модель объекта содержит перекрестные связи, представляющие собой прямые связи «вход – выход». Звенья запаздывания присутствуют во всех каналах и аппроксимированы с помощью ряда Паде с ограниченным числом членов. Нестационарные параметры объекта получены благодаря мультипликативной помехе, смоделированной в пакете Simulink Matlab.

* *Статья получена 16 июня 2021 г.*

Необходимо добиться определенных показателей качества выходного векторного процесса при управлении двумя входными воздействиями. Для обеспечения устойчивого переходного процесса от системы потребуем сохранения полюсов звена запаздывания. Затем регулятор, рассчитанный для системы со звеном задержки в виде ряда Паде, используем для системы с «идеальным» запаздыванием.

Ключевые слова: параметрическая система, нестационарная система, система с переменными параметрами, многоканальная система, звено запаздывания, полиномиальный метод синтеза регулятора, система автоматического управления, робастное управление

ВВЕДЕНИЕ

В связи со сложностью современных технических систем для обеспечения заданного уровня регулирования несколькими выходными величинами в них модели технических систем в некоторых случаях представляются в многоканальном виде. При этом в некоторых случаях только многоканальные регуляторы могут обеспечить необходимые качественные характеристики регулирования для многоканального объекта. Вычисление параметров многоканального регулятора – нетривиальная задача, и ее решению посвящено большое количество работ [1–5].

В настоящей работе рассмотрена задача синтеза системы автоматического управления (САУ) с использованием метода полиномиального матричного разложения системы (polynomial matrix fraction decomposition method – метод PMFD). В отличие от предыдущих работ по синтезу многоканальных регуляторов методом PMFD [1, 8–10], в данном случае рассматривается система, содержащая в своей структуре также звенья запаздывания. И, с другой стороны, в работах по синтезу регулятора методом PMFD для систем с запаздыванием рассматриваются только одноканальные системы [11, 12]. Актуальность выбранной темы обусловлена тем, что в реальных технических многоканальных системах учет звеньев запаздывания и неопределенностей бывает необходим, так как это отразится на динамике переходных процессов [13–16].

Полученная САУ проверяется на робастность[1]. При этом наличие неопределенностей может быть связано как с невозможностью точного описания объекта, так и с изменением его свойств вследствие влияния неизмеряемых параметров окружающей среды. Неопределенности могут принимать любые формы, однако наиболее существенными являются шумы, нелинейности и неточности в знании передаточной функции (ПФ) объекта управления [6, 7]. В данной работе осознанно взят случай повышенной сложности для расчета регулятора аналитическим путем для систем с таким типом неопределенностей. В дальнейших работах будет опубликованы результаты повышения диапазона робастной устойчивости для данного примера с помощью САУ, содержащего нейрорегулятор.

[1] В ТАУ [2, с. 172] робастной системой обычно называют такую систему, у которой при малом изменении ее параметров свойство системы качественно не меняется, однако в данной статье для удобства изложения будем иметь ввиду сохранение выходных переменных системы в заданных допустимых пределах несмотря на наличие нестационарных неопределённостей в структуре объекта управления.

Предлагается решать проблему синтеза регулятора для многоканальной системы с запаздыванием в канале управления с помощью метода PMFD, описанного в [8, 9] (в частности, его модификации, описанной в [12]). Данный алгоритм позволяет добиваться необходимой динамики переходных процессов системы путем сохранения полюсов и нулей ПФ звена задержки. При этом математическая модель звена запаздывания будет реализована аппроксимацией звена задержки рядом Паде с ограниченным числом членов (далее – рядом Паде)[2]. Далее сымитируем «неполноту знаний об аналитической структуре уравнений объекта управления», для этого внедрим в его структуру непараметрические мультипликативные неопределенности, изменяющиеся во времени[3]. Применим полученный регулятор для такой системы и выясним границы устойчивости к возмущениям.

В настоящей статье работа алгоритма демонстрируется на линейной модели объекта с числом входов, равным числу выходов. Особенностью рассматриваемого в настоящей работе примера является наличие перекрестных связей внутри объекта и безынерционная связь между некоторыми входами и выходами).

Статья состоит из трех разделов. В первом разделе описывается выбранный многоканальный объект в виде ПФ, а затем и в виде левого полиномиального матричного разложения. Приводится аппроксимированное рядом Паде звено задержки. Определяется постановка задачи синтеза системы регулирования для многоканальной системы с задержкой. Выполняется одно из условий, необходимых для синтеза многоканального регулятора, – приведение матриц «числителя» и «знаменателя» ПФ объекта к взаимно простому виду. Демонстрируется процедура перехода от левого полиномиального разложения к взаимно простому правому.

Во втором разделе статьи приводится ПФ и характеристическая матрица замкнутой системы (ХМЗС), определяется порядок регулятора, выбираются корни диагональных элементов желаемой ХМЗС. После приравнивания ХМЗС к желаемой составляется система уравнений. С помощью модифицированного метода PMFD понижается порядок полученной системы уравнений и «числителя» ПФ регулятора, а значит, уменьшается количество неизвестных параметров ПФ регулятора. Приводятся матричные ПФ полученных регуляторов.

Третий раздел статьи посвящен демонстрации полученных результатов работы многоканальной САУ. При этом вместо звеньев запаздывания, аппроксимированных рядом Паде, используются идеальные задержки. Затем

---

[2] Здесь и в дальнейшем под рядом Паде понимается ряд с ограниченным числом членов, представленный в работе: *Лапето А. В.* Особенности формирования проматриц и синтеза регуляторов для систем с запаздыванием / А. В. Лапето // Труды БГТУ. Минск: БГТУ, 2012. № 6 (153). 2012. С. 122–126.

[3] Сведения о моделировании непараметрических нестационарных неопределенностей взяты из работы: *Целигоров Н. А*. Математические модели неопределенностей систем управления и методы, используемые для их исследования / Н. А. Целигоров, Е. Н. Целигорова, Г. М. Мафура // ИВД. 2012. № 4-2.

в систему вводится динамический мультипликативный шум, имитирующий неопределенности в объекте управления и нестационарность параметров объекта. Выясняются границы устойчивости полученной САУ. В качестве программного обеспечения, реализующего моделирование объекта и блока регулирования, была выбрана программа Matlab с пакетом расширения Simulink. Приведены переходные процессы выхода систем с идеальным запаздыванием, содержащих стационарные и нестационарные параметры.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Многоканальный объект выбран с учетом удобства демонстрации расчетов синтеза САУ с помощью метода PMFD. Подобный пример рассматривался в работе [10] с той разницей, что в данном случае в многоканальный объект включены звенья запаздывания, аппроксимированные рядом Паде. Это значительно усложняет задачу синтеза регулятора.

1.1. ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА РЕГУЛИРОВАНИЯ

Рассмотрим иллюстрированный пример правильного, но не строго правильного неустойчивого объекта с числом выходов $y(s)=\left(y_1(s),\quad y_2(s)\right)^T$, равным числу входов $u(s)=\left(u_1(s),\quad u_2(s)\right)^T$. Объект содержит перекрестные связи, как показано на рис. 1.

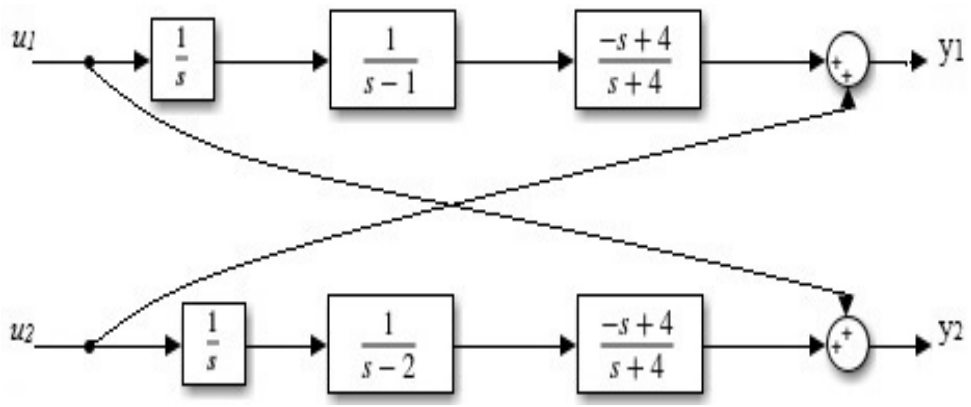


Рис. 1. Структурная схема объекта

Fig. 1. Block diagram of the object

Описание объекта со звеном запаздывания в матричном виде можно представить в виде матричной ПФ:

$$\begin{pmatrix} y_1(s) \\ y_2(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dfrac{4-s}{s(s-1)(s+4)} & 1 \\ 1 & \dfrac{4-s}{s(s-2)(s+4)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1(s) \\ u_2(s) \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Здесь в качестве звена запаздывания используем звено, полученное аппроксимацией рядом Паде по формуле[4]

$$W_{delay}(s) = \frac{\sum_{k=1}^{n} \left(\dfrac{(n+k)!}{k!(n-k)!} (-\tau s)^{n-k} \right)}{\sum_{k=1}^{n} \left(\dfrac{(n+k)!}{k!(n-k)!} (\tau s)^{n-k} \right)},$$

где n – порядок аппроксимации (влияет на качество полученной системы автоматического регулирования); τ – время задержки; s – оператор Лапласа. Тогда звено запаздывания (при времени запаздывания $\tau = 0{,}5$ с), полученное аппроксимацией рядом Паде 1-го порядка, можно выразить следующей формулой:

$$W_{delay}(s) = \frac{4-s}{s+4}. \quad (2)$$

Умножим (1) на наименьшее общее кратное слева:

$$\underbrace{\begin{pmatrix} s(s-1)(s+4) & 0 \\ 0 & s(s-2)(s+4) \end{pmatrix}}_{D_l(s)} \begin{pmatrix} y_1(s) \\ y_2(s) \end{pmatrix} =$$

$$= \underbrace{\begin{pmatrix} 4-s & s(s-1)(s+4) \\ s(s-2)(s+4) & 4-s \end{pmatrix}}_{N_l(s)} \begin{pmatrix} u_1(s) \\ u_2(s) \end{pmatrix} \quad (3)$$

и получим матричные ПФ левого полиномиального разложения объекта (1):

$$W_{plant} = D_l^{-1}(s) N_l(s),$$

[4] Данная формула приведена в работе: *Лапето А. В.* Особенности формирования проматриц и синтеза регуляторов для систем с запаздыванием / А. В. Лапето // Труды БГТУ. Минск: БГТУ, 2012. № 6 (153). 2012. С. 122–126.

где $N_l(s)$, $D_l(s) \in R[s]^{2\times 2}$ – «числитель» и «знаменатель» ПФ объекта, при этом здесь и далее $R[s]^{n\times m}$ – обозначение множества полиномиальных матриц размером $n \times m$ с вещественными коэффициентами (n – число строк, m – число столбцов). В качестве цели регулирования обозначим следующее: с помощью блока регулирования необходимо добиться заданного расположения полюсов замкнутой системы и астатизма по выходам $y_1(s)$, $y_2(s)$. Как было показано в [8], для гарантированного существования решения при синтезе регуляторов предпочтительна работа с взаимно простыми матрицами ПФ объекта.

1.2. ПРОВЕРКА ВЗАИМНОЙ ПРОСТОТЫ МАТРИЦ ПОЛИНОМИАЛЬНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ ОБЪЕКТА

Взаимная простота матриц «числителя» и «знаменателя» объекта необходима для исключения сокращаемых корней системы, лежащих в правой (замкнутой) полуплоскости. Наличие таких корней приводит к появлению внутренней неустойчивости системы даже при достаточно малых изменениях параметров объекта. Для проверки взаимной простоты матриц воспользуемся алгоритмом, приведенным в [17].

Выпишем блочную матрицу $M = \left[D_l \,\vdots\, N_l \right]$:

$$\left[\begin{array}{cc:cc} s(s-1)(s+4) & 0 & 4-s & s(s-1)(s+4) \\ 0 & s(s-2)(s+4) & s(s-2)(s+4) & 4-s \end{array}\right]. \qquad (4)$$

Затем посредством элементарных строчных операций приведем ее к нижнетреугольному виду. Это соответствует умножению матрицы M справа на некоторую унимодальную матрицу W:

$$MW = \left[D_l \,\vdots\, N_l \right] \left[\begin{array}{c:c} V_l & -N_r \\ \hdashline U_l & D_r \end{array}\right] = \left[L \quad 0 \right],$$

где N_r, D_r – взаимно простые матрицы правого полиномиального разложения объекта:

$$N_r = \begin{pmatrix} 4-s & s(s-2)(s+4) \\ s(s-1)(s+4) & 4-s \end{pmatrix}; \quad D_r = \begin{pmatrix} s(s-1)(s+4) & 0 \\ 0 & s(s-2)(s+4) \end{pmatrix}. \qquad (5)$$

Передаточная функция правого полиномиального разложения будет выглядеть следующим образом:

$$W_{ob} = N_r(s) D_r^{-1}(s). \qquad (6)$$

Для удобства расчета представим запись (5) в полиномиальном виде с коэффициентами полинома в виде матриц:

$$N_r = N_1 s + N_0 ;\ D_r = D_1 s + D_0 , \tag{7}$$

где $D_1, D_0, N_1, N_0 \in R^{2\times 2}$. Кроме этого, был получен наибольший общий левый делитель

$$L = \begin{pmatrix} 96 & 0 \\ 0 & 64 \end{pmatrix}.$$

Как видно, матрица L унимодулярная, а значит, левое полиномиальное разложение ПФ объекта (3) взаимно простое. Переход к правому взаимно простому разложению был необходим для решения задачи синтеза регулятора в случае многоканального объекта с запаздыванием. Взаимная простота матриц «числителя» и «знаменателя» ПФ объекта необходима для исключения сокращения общих корней матриц, которые могут привести к внутренней неустойчивости системы.

2. СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА

Прежде чем начать процедуру синтеза блока регулирования объектом с помощью метода PMFD, необходимо выбрать порядок и вид матриц «числителя» и «знаменателя» ПФ регулятора, а также саму желаемую ХМЗС. Затем после приравнивания ХМЗС к желаемой составляется система уравнений с неизвестными – параметрами ПФ регулятора. Решение этой системы позволит найти ПФ регулятора, обеспечивающего необходимые динамические характеристики на выходе системы.

2.1. ПЕРЕДАТОЧНАЯ ФУНКЦИЯ И ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКАЯ МАТРИЦА ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ

Для удобства расчета ХМЗС по формуле, представленной в статьях [10, 18], покажем систему регулирования в виде левого полиномиального представления

$$W_{reg} = Y_l^{-1}(s) X_l(s) ,$$

где $X_l(s), Y_l(s) \in R[s]^{2\times 2}$ – матрицы «числителя» и «знаменателя» ПФ регулятора. Блок регулирования $W_{reg}(s)$ построим таким образом, чтобы по схеме он находился перед объектом $W_{plant}(s)$.

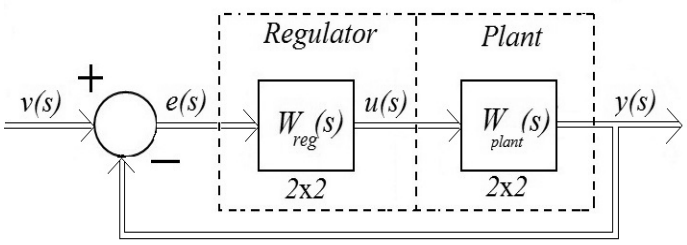


Рис. 2. Структурная схема системы

Fig. 2. Block diagram of the system

Таким образом, на блок регулирования поступает величина ошибки $e(s) \in R[s]^{2\times 1}$ между задающим воздействием $v(s) \in R[s]^{2\times 1}$ и выходом объекта $y(s) \in R[s]^{2\times 1}$. На выходе блока регулирования формируется управляющий сигнал $u(s) \in R[s]^{2\times 1}$. В случае полиномиального матричного разложения ПФ объекта и регулятора система будет выглядеть следующим образом:

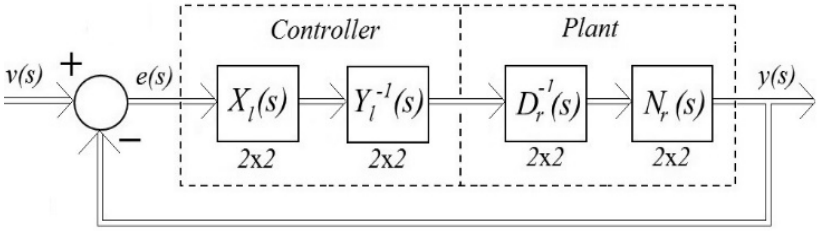


Рис. 3. Структурная схема системы в развернутом виде

Fig. 3. Block diagram of the system in the expanded form

В этом случае согласно [10, 18] ПФ замкнутой системы может быть описана следующим выражением:

$$W_{cl} = N_r(s)\left(Y_l(s)D_r(s) + X_l(s)N_r(s)\right)^{-1} X_l(s).$$

Тогда ХМЗС

$$C(s) = Y_l(s)D_r(s) + X_l(s)N_r(s), \tag{8}$$

где $C(s), Y_l(s), X_l(s) \in R[s]^{2\times 2}$. Далее необходимо определить структуру и порядок матриц «числителя» и «знаменателя» ПФ регулятора.

2.2. ВЫБОР ВИДА ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ РЕГУЛЯТОРА

Для обеспечения астатизма выхода системы и согласно рекомендациям [1] выберем регулятор полного порядка. Так как столбцовые степени матриц «знаменателя» объекта $m_1 = m_2 = m = 3$, согласно алгоритму синтеза

регулятора полного порядка возьмем столбцовые степени матриц «числителя» и «знаменателя» регулятора на единицу меньше: $\mu_1 = \mu_2 = \mu = m - 1 = 2$. В соответствии с этим полиномиальные матрицы «числителя» и «знаменателя» ПФ регулятора соответственно принимают следующий вид:

$$X_l(s) = \begin{pmatrix} x_{11}^2 s^2 + x_{11}^1 s + x_{11}^0 & x_{12}^2 s^2 + x_{12}^1 s + x_{12}^0 \\ x_{21}^2 s^2 + x_{21}^1 s + x_{21}^0 & x_{22}^2 s^2 + x_{22}^1 s + x_{22}^0 \end{pmatrix},$$

$$Y_l(s) = \begin{pmatrix} y_{11}^2 s^2 + y_{11}^1 s + y_{11}^0 & y_{12}^2 s^2 + y_{12}^1 s + y_{12}^0 \\ y_{21}^2 s^2 + y_{21}^1 s + y_{21}^0 & y_{22}^2 s^2 + y_{22}^1 s + y_{22}^0 \end{pmatrix}.$$

Здесь у элементов x_{ij}^k, y_{ij}^k нижние индексы i, j показывают положение элемента в числовой матрице при переходе к полиномиальному виду с элементами полинома в виде числовых матриц (9), а верхний индекс k соответствует порядковому номеру числовой матрицы, являющейся элементом полинома (9). Для удобства расчета запишем матрицы «числителя» и «знаменателя» ПФ регулятора соответственно в виде полинома с элементами в виде числовых матриц:

$$X_l(s) = X_2 s^2 + X_1 s + X_0; \quad Y_l(s) = Y_2 s^2 + Y_1 s + Y_0, \tag{9}$$

где $X_1, X_0, Y_1 \in R^{2\times 2}$. Для обеспечения требуемой динамики переходных процессов на выходе системы (1) необходимо выбрать корни желаемой ХМЗС.

2.3. ВЫБОР ЖЕЛАЕМЫХ КОРНЕЙ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОЙ МАТРИЦЫ ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ

Для выбора полюсов замкнутой системы необходимо определиться с размерностью матрицы желаемой ХМЗС. Размерность желаемой ХМЗС $\overline{C}(s)$ должна совпадать с ХМЗС (8). Таким образом, $\overline{C}(s) \in R[s]^{2\times 2}$. Для удобства в качестве желаемой ХМЗС взята матрица диагонального вида.

Исходя из уравнения (8) порядок желаемой ХМЗС определяется суммой столбцовой степени матрицы «знаменателя» объекта $m = 3$ и столбцовой степени матрицы «знаменателя» регулятора $\mu = 2$. Таким образом, порядок желаемой ХМЗС $m + \mu = 5$.

Необходимо задать желаемые полюса системы, которые будут являться корнями полиномов на главной диагонали желаемой ХМЗС – $\overline{C}(s)$. Они должны удовлетворять следующим условиям:

– один из корней берется равным полюсу ПФ (2) звена запаздывания $W_{delay}(s)$, аппроксимированной рядом Паде.

Обозначим его через полиномиальную матрицу:

$$\overline{C}''(s)=\begin{pmatrix} s+4 & 0 \\ 0 & s+4 \end{pmatrix}; \tag{10}$$

– остальные корни выбираются произвольно с учетом их нахождения в левой полуплоскости (это необходимо для устойчивости всей системы согласно [8, 9]) и несовпадения с полюсами объекта (это необходимо для исключения сокращений, которые приводят к нестабильности управления):

$$\overline{C}'(s)=\begin{pmatrix} (s+1)^4 & 0 \\ 0 & (s+1)^4 \end{pmatrix}.$$

Таким образом, желаемая ХМЗС приобретает следующий вид:

$$\overline{C}(s)=\overline{C}'(s)\overline{C}''(s)=\begin{pmatrix} (s+4)(s+1)^4 & 0 \\ 0 & (s+4)(s+1)^4 \end{pmatrix}. \tag{11}$$

Отсюда получим полиномиальное матричное представление желаемой ХМЗС:

$$\overline{C}(s)=\sum_{i=0}^{5} C_i s^i\,, \tag{12}$$

где $C_i \in R^{2\times 2}$ – числовые матрицы, $i=0,...,5$.

Для нахождения ПФ регулятора приравняем ХМЗС к желаемой и получим систему уравнений с неизвестными в виде параметров ПФ регулятора.

2.4. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОЙ МАТРИЦЫ ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ

Для нахождения параметров регулятора приравняем ХМЗС (8) к желаемой (11):

$$Y_l(s)D_r(s)+X_l(s)N_r(s)=\overline{C}(s)\,. \tag{13}$$

С учетом полиномиального представления ПФ объекта (7), регулятора (9) и желаемой ХПЗС (12) из выражения (13) получим систему уравнений:

$$\Im\cdot\Re^T=\overline{C}(s)\,, \tag{14}$$

где $\Im=\begin{pmatrix} Y_0 & X_0 & Y_1 & X_1 & Y_2 & X_2 \end{pmatrix}$ – вектор с элементами в виде числовых матриц – коэффициентов полиномов «числителя» и «знаменателя» ПФ регулятора из уравнения (9); $\Re$ – матрица Сильвестра с элементами в виде числовых

матриц – коэффициентов полиномов «числителя» и «знаменателя» ПФ объекта из уравнения (7):

$$\Re = \begin{pmatrix} D_0 & N_0 & O & O & O & O \\ D_1 & N_1 & D_0 & N_0 & O & O \\ D_2 & N_2 & D_1 & N_1 & D_0 & N_0 \\ D_3 & N_3 & D_2 & N_2 & D_1 & N_1 \\ O & O & D_3 & N_3 & D_2 & N_2 \\ O & O & O & O & D_3 & N_3 \end{pmatrix},$$

где $O \in R^{2\times 2}$ – нулевая матрица.

С учетом сохранения полюса звена запаздывания в желаемой ХМЗС проведем некоторые преобразования выражения (13) с целью уменьшения размерности и порядка полученной системы уравнений (14). Передаточную функцию объекта (6) можно выразить с учетом нахождения в ней матрицы полюсов звена запаздывания $\overline{C}''(s)$:

$$N_r(s)D_r^{-1}(s) = N_r(s)\left(D_r'(s)C''(s)\right)^{-1},$$

где $D_r'(s)$ – матрица «знаменателя» объекта без полюса звена запаздывания $C''(s)$. А значит,

$$D_r(s) = D_r'(s)\overline{C''}(s). \tag{15}$$

С учетом преобразований (11) и (15) уравнение ХМЗС (8) можно записать в виде

$$Y_l(s)D_r'(s)\overline{C''}(s) + X_l(s)N_r(s) = \overline{C'}(s)\overline{C''}(s). \tag{16}$$

Как видно из выражения (16), в правой и левой части уравнения (в одном из слагаемых) присутствует $\overline{C''}(s)$. Значит, в левой части уравнения (16) во втором слагаемом $X_l(s)N_r(s)$ он также присутствует. Из полинома числителя объекта $N_l(s)$ известно, что элементов $\overline{C''}(s)$ в нем нет. Следовательно, он содержится в $X_r(s)$. Значит, уравнение (4) может быть преобразовано к виду

$$Y_l(s)D_r'(s)\overline{C''}(s) + X_l'(s)\overline{C''}(s)N_r(s) = \overline{C'}(s)\overline{C''}(s). \tag{17}$$

С учетом того, что по двум каналам используется одинаковое звено запаздывания и матрица $\overline{C''}(s)$ диагонального вида (10), можно применить следующее преобразование: $\overline{C''}(s) = \overline{c''}(s)I$, где $I \in R^{2\times 2}$ – единичная матрица,

$\overline{c''}(s) = s + 4$ – полином элемента матрицы (10). С учетом этого преобразования в выражении (17) можно провести сокращения левой и правой части на $\overline{c''}(s)$:

$$Y_l(s)D'_r(s) + X'_l(s)N_r(s) = \overline{C'}(s)\,.$$

Таким образом, система уравнений (14) также может быть преобразована к виду

$$\Im' \cdot \Re'^T = \overline{C'}(s)\,, \tag{18}$$

где $\Im' = \begin{pmatrix} Y'_0 & X'_0 & Y'_1 & X'_1 & Y'_2 \end{pmatrix}$ – вектор с элементами в виде числовых матриц – коэффициентов полиномов «числителя» и «знаменателя» ПФ регулятора, преобразованных с учетом нахождения в матрице «числителя» ПФ регулятора полюса звена запаздывания; $\Re'$ – преобразованная матрица Сильвестра:

$$\Re' = \begin{pmatrix} D_0 & N_0 & O & O & O \\ D_1 & N_1 & D_0 & N_0 & O \\ D_2 & N_2 & D_1 & N_1 & D_0 \\ O & N_3 & D_2 & N_2 & D_1 \\ O & O & O & N_3 & D_2 \end{pmatrix}.$$

Решим эту систему уравнения с помощью умножения левой и правой части уравнения (18) справа на $\left(\Re'^T\right)^{-1}$ и найдем неизвестные параметры вектора $\Im'$, а значит, найдем матрицы «числителя» и «знаменателя» ПФ регулятора:

$$X_l = \begin{pmatrix} 5s^2 + 20s + 0,2 & 0 \\ 0 & 20s^2 + 80s + 1 \end{pmatrix},\ Y_l = \begin{pmatrix} s^2 + 5s + 16 & -5s^2 - 20s - 1 \\ -20s^2 - 80s - 1 & s^2 + 6s + 38 \end{pmatrix}.$$

Для проверки работоспособности полученного регулятора смоделируем полученную систему и покажем получившиеся переходные процессы.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для моделирования полученных результатов использовался программный продукт Matlab с пакетом расширения Simulink. Покажем соответствие построенной системы управления заявленным характеристикам, полюса которой выбраны кратными (например, равными –1). В качестве входных воздействий зададим $\nu_1(s) = 1$, $\nu_2(s) = -1$. Для проверки результатов работы регулятора в объекте используем «транспортное запаздывание» (Transport Delay) вместо звена запаздывания, аппроксимированного рядом Паде (2). Это необходимо для более точного моделирования звена задержки в объекте.

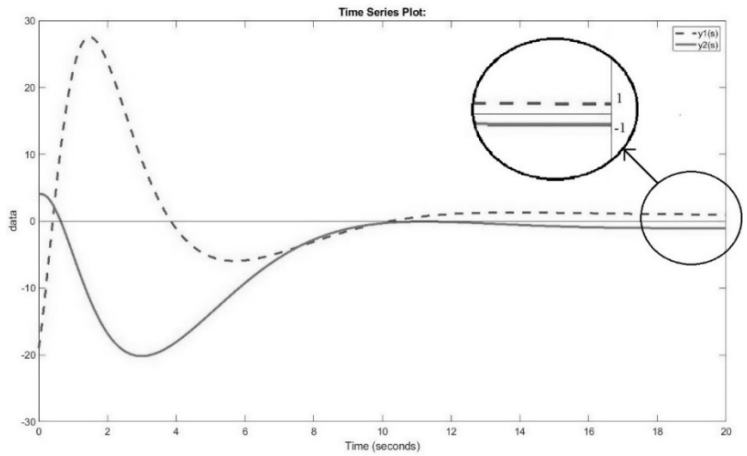


Рис. 4. График переходных процессов системы

Fig. 4. Timeline of the system transients

Как видно из рис. 4, система устойчивая и астатическая. Переходный процесс занимает около 14 с. Для других входных воздействий выход системы также будет астатическим.

С целью апробации работы полученной САУ для объекта с нестационарными непараметрическими неопределенностями в его структуре добавим в систему, представленную на рис. 2, мультипликативную помеху с равномерным законом распределения так, как это показано на рис. 5. Для этих целей в программном пакете Simulink было выбрано звено Uniform Random Number. При этом шум воздействует на оба канала, и на каждом из них он различный. Мультипликативная помеха выбрана с целью удобства определения относительной величины помехи относительно параметров объекта. В качестве величины шума были выбраны различные значения: от ±3 % до ±10 %. Частота обновления сигнала помехи 0,1 с.

Как видно из рис. 5, мультипликативная помеха находится в прямой связи с объектом. Смоделируем полученную систему с регулятором, рассчитанным для системы со стационарными параметрами. Для наглядности в качестве входных воздействий зададим также $\nu_1(s) = 1$, $\nu_2(s) = -1$.

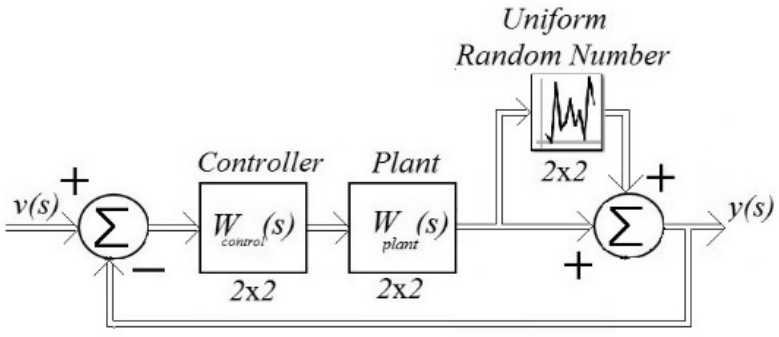
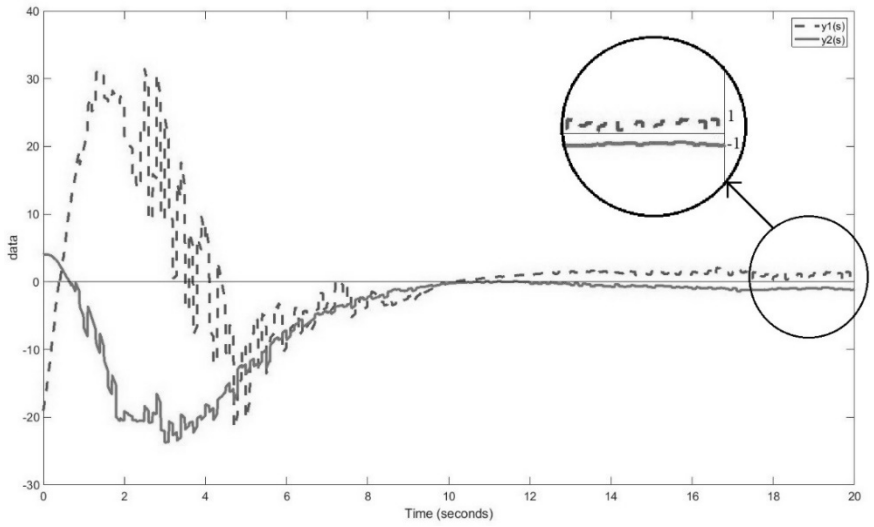
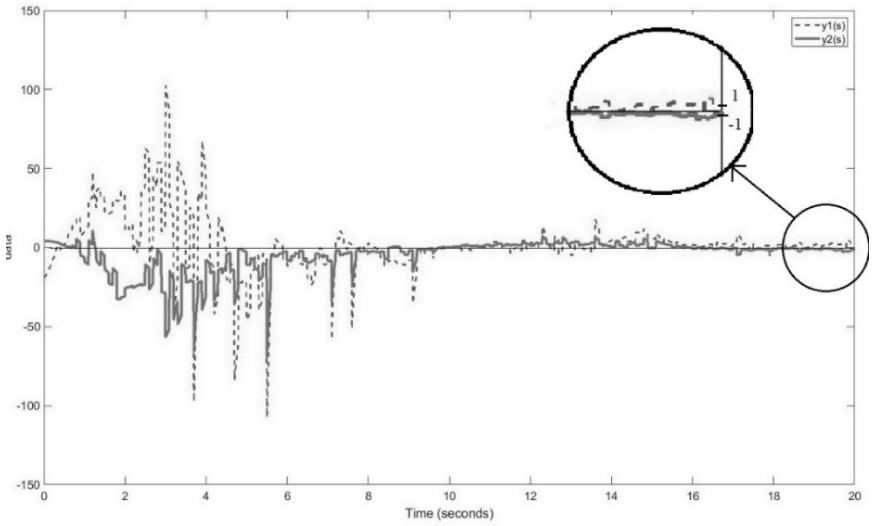


Рис. 5. Структурная схема системы с нестационарными параметрами

Fig. 5. Block diagram of the system with non-stationary parameters



а



б

Рис. 6. Переходные процессы для функции выхода системы с нестационарными параметрами:

а – с 3 %-м шумом; *б* – с 10 %-м шумом

Fig. 6. Transients for the output function of the system with non-stationary parameters:

a is with 3 % noise; *b* is with 10 % noise

Как видно из рис. 6, САУ справляется с наличием в системе помехи, имитирующей нестационарные параметры объекта в виде непараметрических неопределенностей. Продемонстрированные переходные процессы говорят о построении робастной САУ для заданного объекта с нестационарными параметрами. Граница устойчивости для данной системы определена (11 %-я мультипликативная помеха / шум). При дальнейшем увеличении мультипликативного шума переходные процессы системы неустойчивы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках проведенной работы была синтезирована робастная САУ для многоканального объекта, содержащего звенья запаздывания, а именно:

– получены левый и правый взаимно простые разложения матриц «числителя» и «знаменателя» ПФ объекта;

– применен модифицированный алгоритм PMFD для многоканальной системы, содержащей звенья запаздывания. Это позволило уменьшить размерность полученной системы уравнений;

– полученный регулятор применен для системы, содержащей мультипликативные неструктурные неопределенности и идеальные звенья задержки (Transport Delay) вместо аппроксимированных рядом Паде;

– экспериментальные исследования позволили определить границы устойчивости системы с переменными параметрами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бобобеков К.М., Воевода А.А., Шипагин В.И.* Полиномиальный метод синтеза автоматического управления для одноканальных и многоканальных объектов: монография. – Душанбе: ТТУ им. М.С. Осими, 2021. – 192 с.

2. *Ким Д.П.* Теория автоматического управления. Т. 2. Многомерные, нелинейные и оптимальные системы. – М.: Физматлит, 2004. – 464 с.

3. *Симаков Г.М., Филюшов Ю.П., Филюшов В.Ю.* Многомерное управление синхронной машиной электромагнитного возбуждения быстродействующего электропривода // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2018. – Т. 5, № 1. – С. 50–54.

4. *Albertos P., Sala A.* Multivariable control systems: an engineering approach. – London: Springer, 2004. – 340 p.

5. *Costa N., Haykin S.* Multiple-input multiple-output channel models: theory and practice. – New York, NJ: Wiley, 2010. – 230 p.

6. *Блауберг И.В., Юдин Э.Г.* Становление и сущность системного подхода. – М.: Наука, 1973. – 270 с.

7. *Фуртат И.Б.* Адаптивные и робастные системы управления в условиях возмущений и запаздывания: 05.11.16: дис. … д-ра техн. наук. – СПб., 2012. – 297 с.

8. *Chen C.T.* Linear system theory and design. – 2nd ed. –New York: Oxford, 1999. – 334 p.

9. *Antsaklis P.J., Michel A.N.* Linear systems. – Switzerland: Birkhauser, 1997. – 669 p.

10. *Воевода А.А., Шипагин В.И.* Синтез многоканального регулятора для объекта с двумя входными и двумя выходными каналами с использованием полиномиального матричного разложения // Proceedings 2021 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – Sochi, 2021. – P. 823–828. – DOI: 10.1109/RusAutoCon52004.2021.9537350.

11. *Воевода А.А., Шипагин В.И.* Синтез регулятора для систем с запаздыванием // Proceedings of the XV International Scientific and Technical Conference "Actual Problems of Electronic Instrument Engineering" (APEIE). – Novosiblrsk, 2021. – P. 559–563. – DOI: 10.1109/APEIE52976.2021.9647686.

12. *Воевода А.А., Шипагин В.И., Филюшов В.Ю.* Расчет регулятора для объекта с запаздыванием // Безопасность цифровых технологий. – 2021. – № 3 (102). – С. 9–20. – DOI: 10.17212/2782-2230-2021-3-9-20.

13. *Николаев Е.В.* Технологические объекты второго порядка с запаздыванием // Молодой ученый. – 2017. – № 23 (157). – С. 149–152.

14. *Леонов Р.Е.* Объекты управления с переменным транспортным запаздыванием // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2021. – № 1. – С. 122–130. – DOI: 10.21440/0536-1028-2021-1-122-130.

15. *Фуртат И.Б., Нехороших А.Н.* Робастный алгоритм управления линейными объектами с запаздыванием по состоянию // Навигация и управление движением: материалы XVIII конференции молодых ученых с международным участием, Санкт-Петербург, 15–18 марта 2016 года. – СПб.: Электроприбор, 2016. – С. 224–229.

16. *Шариков Ю.В., Шариков Ф.Ю.* Системы управления с использованием математических моделей технологических объектов в контуре управления // Math Designer. – 2016. – № 1. – С. 4–8.

17. *Воевода А.А.* Матричные передаточные функции (основные понятия): конспект лекций по курсу «Проектирование систем управления» для 4–5 курсов АВТФ (спец. 2101). – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1994. – 94 с.

18. *Воевода А.А., Филюшов В.Ю.* Полиномиальное матричное разложение при синтезе неквадратных САУ // Системы анализа и обработки данных. – 2021. – № 1 (81). – С. 21–38. – DOI: 10.17212/2782-2001-2021-1-21-38.

Воевода Александр Александрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – управление многоканальными объектами. Имеет более 300 публикаций. E-mail: ucit@ucit.ru

Шипагин Виктор Игоревич, аспирант кафедры автоматики Новосибирского государственного технического университета. В настоящее время специализируется в области синтеза систем управления техническими системами. E-mail: shipagin@mail.ru

Voevoda Aleksandr A., D.Sc. (Eng.), professor, professor, the automation department, Novosibirsk State Technical University. The main field of his scientific research is the management of multi-channel objects. He has more than 300 publications. E-mail: ucit@ucit.ru

Shipagin Victor I., postgraduate student at the automation department, Novosibirsk State Technical University. Currently he specializes in the field of synthesis of regulators for technical systems. E-mail: shipagin@mail.ru

DOI: 10.17212/2782-2001-2022-1-7-24

*Calculation of a controller for a multi-channel object with non-stationary parameters containing delay links**

A.A. VOEVODA [a], V.I. SHIPAGIN [b]

Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

[a] ucit@ucit.ru [b] shipagin@mail.ru

Abstract

Nonstationary linear systems or linear systems with variable parameters are systems that are described by linear differential equations with variable coefficients. Consideration of the controller synthesis problems for such systems may be dictated by the need to satisfy a certain margin of the automatic control system stability to minor disturbances both from sensors reading the state of the system and from changes in the parameters of the controlled object itself over time. In addition, a real controlled object, in comparison with its mathematical model, quite often contains some uncertainties that should not significantly affect the quality of control.

This work considers an example of synthesizing a multichannel controller that would provide a good control quality (stability margin) if the controlled object contains some uncertainties or if its mathematical model with accuracy up to certain parameters is unknown. In addition, the control task is complicated by a link of delay in the structure of the object (that is, there is a certain period of time when there is no reaction from the regulated object to the control action).

A modified algorithm of polynomial matrix decomposition of the matrix transfer function of the system, taking into account the conservation of the delay link poles, is chosen as a method of controller synthesis. To demonstrate the algorithm operation, a linear model of the unstable controlled object with a multi-channel structure consisting of two input and two output channels is taken. The description of the object is used in the form of the matrix transfer function, which

* *Received 16 June 2021.*

shows the interaction in the multi-channel control system and the relationship between channels. The object model contains cross-links representing direct input-output connections. The delay links are present in all channels and are approximated using the Pade series with a limited number of terms. The non-stationary parameters of the object were obtained due to the multiplicative interference modeled in the Simulink Matlab package.

It is necessary to achieve certain quality indicators of the output vector process when controlling two input influences. To ensure a stable transition process from the system, the poles preservation of the delay link will be necessary. Then the controller calculated for the system with the delay link in the form of the Pade series is applied to the system with an "ideal" delay.

Keywords: parametric system, non-stationary system, system with variable parameters, multi-channel system, delay link, polynomial method of controller synthesis, automatic control system, robust control

REFERENCES

1. Bobobekov K.M., Voevoda A.A., Shipagin V.I. *Polinomial'nyi metod sinteza avtomaticheskogo upravleniya dlya odnokanal'nykh i mnogokanal'nykh ob"ektov* [Polynomial method for the synthesis of automatic control systems for single-channel and multi-channel objects]. Dushanbe, Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi Publ., 2021. 192 p. (In Russian).

2. Kim D.P. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya*. T. 2. *Mnogomernye, nelineinye i optimal'nye sistemy* [Theory of automatic control. Vol. 2. Nonlinear and optimal systems]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004. 464 p.

3. Simakov G.M., Filyushov Yu.P., Filyushov V.Yu. Mnogomernoe upravlenie sinkhronnoi mashinoi elektromagnitnogo vozbuzhdeniya bystrodeistvuyushchego elektroprivoda [Control of the synchronous machine of electromagnetic excitation of electric drive]. *Elektrotekhnika: setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal = Russian Internet Journal of Electrical Engineering*, 2018, vol. 5, no. 1, pp. 50–54.

4. Albertos P., Sala A. *Multivariable control systems: an engineering approach*. London, Springer, 2004. 340 p.

5. Costa N., Haykin S. *Multiple-input multiple-output channel models: theory and practice*. New York, NJ, Wiley, 2010. 230 p.

6. Blauberg I.V., Yudin E.G. *Stanovlenie i sushchnost' sistemnogo podhoda* [Formation and essence of the system approach]. Moscow. Nauka Publ., 1973.

7. Furtat I.B. *Adaptivnye i robastnye sistemy upravleniya v usloviyakh vozmushchenii i zapazdyvaniya*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Adaptive and robust control systems in conditions of disturbances and delays. Dr. eng. sci. diss.]. St. Petersburg, 2012. 297 p.

8. Chen C.T. *Linear system theory and design*. 2nd ed. New York, Oxford, 1999. 334 p.

9. Antsaklis P.J., Michel A.N. *Linear systems*. Switzerland, Birkhauser, 1997. 669 p.

10. Voevoda A., Shipagin V. Synthesis of a multichannel controller for plant with two input and two output channels using polynomial matrix fraction. *Proceedings 2021 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*, Sochi, 2021, pp. 823–828. DOI: 10.1109/RusAutoCon 52004.2021.9537350.

11. Voevoda A.A., Shipagin V.I. Synthesis of a controller for a system with a delay. *Proceedings of the XV International Scientific and Technical Conference "Actual Problems of Electronic Instrument Engineering" (APEIE)*, Novosiblrsk, 2021, pp. 559–563, DOI: 10.1109/APEIE52976.2021.9647686.

12. Voevoda A.A., Shipagin V.I., Filiushov V.Yu. Raschet regulyatora dlya ob"ekta s zapazdyvaniem [Calculation of the regulator for the object with a delay]. *Bezopasnost' tsifrovykh tekhnologii = Digital Technology Security*, 2021, no. 3 (102), pp. 9–20. DOI: 10.17212/2782-2230-2021-3-9-20.

13. Nikolaev E.V. Tekhnologicheskie ob"ekty vtorogo poryadka s zapazdyvaniem [Technological objects of the second order with a delay]. *Molodoi uchenyi = Young Scientist*, 2017, no. 23 (157), pp. 149–152.

14. Leonov R.E. Ob"ekty upravleniya s peremennym transportnym zapazdyvaniem [Control objects with variable transport delay]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2021, no. 1, pp. 122–130. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-1-122-130.

15. Furtat I.B., Nekhoroshikh A.N. Robastnyj algoritm upravleniya linejnymi ob"ektami s zapazdyvaniem po sostoyaniyu [Robust algorithm for controlling linear objects with a delay in the state].

Navigation and traffic control : proceedings of the XVIII Conference of Young Scientists with International participation, Saint-Petersburg, 2016, pp. 224–229. (In Russian).

16. Sharikov Yu.V. Sharikov F.Yu. Sistemy upravleniya s ispol'zovaniem matematicheskikh modelei tekhnologicheskikh ob"ektov v konture upravleniya [Automation control systems with use of mathematical models of technological objects in a control circuit]. *Math Designer*, 2016, no. 1, pp. 4–8. (In Russian).

17. Voevoda A.A. *Matrichnye peredatochnye funktsii (osnovnye ponyatiya): konspekt lektsii po kursu "Proektirovanie sistem upravleniya"* [Matrix transfer functions (Basic concepts): a summary of lectures on the course "Designing of control systems"]. Novosibirsk, NSTU Publ., 1994. 94 p.

18. Voevoda A.A., Filyushov V.Yu. Polinomial'noe matrichnoe razlozhenie pri sinteze nekvadratnykh SAU [Polynomial matrix decomposition for the synthesis of non-square control systems]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2021, no. 1 (81), pp. 21–38. DOI: 10.17212/2782-2001-2021-1-21-38.

Для цитирования:

Воевода А.А., Шипагин В.И. Расчет регулятора для многоканального объекта с нестационарными параметрами, содержащего звенья запаздывания // Системы анализа и обработки данных. – 2022. – № 1 (85). – С. 7–24. – DOI: 10.17212/2782-2001-2022-1-7-24.

For citation:

Voevoda A.A., Shipagin V.I. Raschet regulyatora dlya mnogokanal'nogo ob"ekta s nestacionarnymi parametrami, soderzhashchego zven'ya zapazdyvaniya [Calculation of a controller for a multi-channel object with non-stationary parameters containing delay links]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2022, no. 1 (85), pp. 7–24. DOI: 10.17212/2782-2001-2022-1-7-24.

ISSN 2782-2001
Системы анализа
и обработки данных
том 85, № 1, 2022, с. 25–40

http://journals.nstu.ru/vestnik
Analysis and data
processing systems
Vol. 85, No. 1, 2022, pp. 25–40

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND MANAGEMENT

УДК 681.51:519.6

DOI: 10.17212/2782-2001-2022-1-25-40

Идентификация квадратичного ядра уравнения Вольтерра для моделирования нелинейных динамических систем*

Ю.Е. ВОСКОБОЙНИКОВ[1,2,a], В.А. БОЕВА[1,b]

[1] *630008, РФ, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет*
[2] *630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет*

[a] *voscob@mail.ru* [b] *v.boyeva@sibstrin.ru*

В последние два десятилетия для описания динамики стационарных нелинейных систем используются интегральные модели «вход – выход», в которых ядрами являются члены ряда Вольтерра. Наиболее часто используются линейный член (импульсная переходная функция зависит от одной переменной) и квадратичный член, зависящий от двух переменных. Для выделения в выходном сигнале идентифицируемой системы двух его составляющих – выхода линейной «подсистемы» и выхода «квадратичной» подсистемы – проводят активный эксперимент, в котором на вход системы подается специальная комбинация прямоугольных импульсов. После выделения выхода «квадратичной» подсистемы идентификация квадратичного члена ряда Вольтерра сводится к решению двумерного интегрального уравнения первого рода. В литературе приводятся формулы обращения, в которых функция квадратичного ядра получается в результате арифметических операций с производными второго порядка от выходного сигнала. Дифференцирование функций является некорректно поставленной задачей, когда малые погрешности задания функции (шумы измерения) вызывают большие ошибки в производных (особенно в производных второго порядка). В работе предлагается для устойчивого вычисления производных использовать сглаживающие кубические сплайны. Для вычисления смешанной производной второго порядка строится сплайн с двумя переменными – сглаживающий бикубический сплайн. Основной проблемой, возникающей на практике при обработке данных реального эксперимента, является выбор параметра сглаживания, от величины которого зависит ошибка сглаживания зашумленных данных. Как правило, в эксперименте не известна величина дисперсии шума измерения. Поэтому в работе предлагается для выбора параметра сглаживания в построенных сплайнах (особенно в бикубическом) использовать алгоритм, основанный на методе *L*-кривой, где не требуется задание дисперсии шума измерения. Предлагаемый алгоритм идентификации имеет высокую вычислительную эффективность. Выполненный вычислительный

* *Статья получена 14 июля 2021 г.*

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 22-21-00409.

эксперимент показал маленькую методическую ошибку (порядка 1 %) и хорошую устойчивость к шумам измерений выходных сигналов идентифицируемой системы. Для уменьшения случайной составляющей ошибки идентификации предлагается использовать постобработку локально-пространственным комбинированным фильтром.

Ключевые слова: интегральные модели нелинейных систем, ядра Вольтерра, формулы обращения, дифференцирование зашумленных данных, сглаживающий кубический сплайн, сглаживающий бикубический сплайн, выбор параметра сглаживания, локально-пространственный комбинированный фильтр

1. ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Интегральные представления нелинейных динамических систем в терминах «вход–выход» нашли широкое применение при их моделировании (в частности, интегральные модели Гаммерштейна, Винера – Гаммерштейна [1]). Для идентификации динамических характеристик нелинейной системы в условиях априорной неопределенности о внутренней структуре в последние два десятилетия активно применяется математический аппарат интегростепенных рядов Вольтерра (подробные обзоры см. в [2, 3]). Особенно часто используется ряд, ограниченный квадратичным членом ряда Вольтерра. В этом случае связь между входным сигналом $\varphi(\tau)$ моделируемой стационарной системы и ее выходным сигналом $f(t)$ можно представить следующим интегральным соотношением [4]:

$$f(t)=\int_0^t k_1(\tau)\varphi(t-\tau)d\tau+\int_0^t\int_0^t k_2(\tau,s)\varphi(t-\tau)\varphi(t-s)d\tau ds,\ t\in[0,T]\ , \qquad (1)$$

где $k_1(\tau)$, $k_2(\tau,s)$ – линейное и квадратичное ядра Вольтерра соответственно. Нужно построить метод и алгоритм идентификации этих ядер по измеренным значениям входного и выходного сигналов идентифицируемой системы.

Очевидно, что сигнал $f(t)$ есть сумма двух неизвестных сигналов: $f_1(t)$ и $f_2(t)$ – первое и второе слагаемые в (1), которые можно интерпретировать как выходные сигналы линейной и квадратичной «подсистем». Следовательно, на первом этапе идентификации необходимо из $f(t)$ выделить сигналы $f_1(t)$, $f_2(t)$ по отдельности. Для произвольного входного сигнала такая задача неразрешима. Поэтому обратимся к простой, но достаточно эффективной методике, предложенной в работах [5, 6], которая подразумевает проведение активной идентификации, когда на вход системы подаются сигналы заданной формы и заданной амплитуды.

Обозначим через $\varphi_H(t)$ входной сигнал, являющийся функцией Хэвисайда:

$$\varphi_H(t)=\begin{cases}0,\ t\le 0,\\ 1,\ t>0.\end{cases}$$

Определим следующий набор входных сигналов:

$$\varphi^{\alpha}(t)=\alpha\varphi_H(t),\ \varphi^{-\alpha}(t)=-\alpha\varphi_H(t),\ 0\le t\le T\ , \qquad (2)$$

$$\varphi^{\alpha}(t,v)=\alpha\left(\varphi_H(t)-\varphi_H(t-v)\right),\quad 0\le v\le t\le T\ ;$$
$$\varphi^{-\alpha}(t,v)=-\alpha\left(\varphi_H(t)-\varphi_H(t-v)\right),\quad 0\le v\le t\le T. \tag{3}$$

При подаче на вход системы сигналов (2) имеем следующие выходные сигналы:

$$f^{(\alpha)}(t)=\alpha\int_0^t k_1(\tau)d\tau+\alpha^2\int_0^t\int_0^t k_2(\tau,s)d\tau ds,\quad 0\le t\le T;$$
$$f^{(-\alpha)}(t)=-\alpha\int_0^t k_1(\tau)d\tau+\alpha^2\int_0^t\int_0^t k_2(\tau,s)d\tau ds,\quad 0\le t\le T. \tag{4}$$

При подаче входных сигналов (3) имеем

$$f^{(\alpha)}(t,v)=\alpha\int_{t-v}^t k_1(\tau)d\tau+\alpha^2\int_{t-v}^t\int_{t-v}^t k_2(\tau,s)d\tau ds,\quad 0\le v\le t\le T;$$
$$f^{(-\alpha)}(t,v)=-\alpha\int_{t-v}^t k_1(\tau)d\tau+\alpha^2\int_{t-v}^t\int_{t-v}^t k_2(\tau,s)d\tau ds,\quad 0\le v\le t\le T. \tag{5}$$

Осуществляя операцию вычитания в (4) и операцию сложения в (5), получаем следующие полезные соотношения:

$$\int_0^t k_1(\tau)d\tau=f_1(t)=\frac{f^{(\alpha)}(t)-f^{(-\alpha)}(t)}{2\alpha}; \tag{6}$$

$$\int_{t-v}^t\int_{t-v}^t k_2(\tau,s)d\tau ds=f_2(t,v)=\frac{f^{(\alpha)}(t,v)+f^{(-\alpha)}(t,v)}{2\alpha^2},\quad 0\le v\le t\le T. \tag{7}$$

Из выражения (6) следует формула обращения

$$k_1(t)=f_1'(t),\ t\in[0,T], \tag{8}$$

а из (7) – формула обращения [4, 6]

$$k_2(t-v,t)=\frac{f_{2tv}''(t,v)+f_{2v^2}''(t,v)}{2},\quad 0\le v\le t\le T, \tag{9}$$

где используются следующие обозначения:

$$f_1'(t)=\frac{d}{dt}f_1(t),\ \ f_{2tv}''(t,v)=\frac{\partial^2}{\partial t\partial v}f_2(t,v),\ \ f_{2v^2}''(t,v)=\frac{d^2}{dv^2}f_2(t,v). \tag{10}$$

К сожалению, реализация на практике полученных формул обращения сталкивается с принципиальной трудностью – некорректностью операции

дифференцирования [7]. Одно из проявлений некорректности заключается в больших ошибках вычисления производной даже при очень малых погрешностях задания дифференцируемой функции. Отметим, что операция сложения в (7) погрешностей регистрации двух функций приводит к увеличению дисперсии суммарной погрешности задания функции $f_2(t,v)$. Таким образом, устойчивое дифференцирование зашумленных данных становится актуальной задачей для реализации формулы (9) на практике.

В работе [8] был построен устойчивый алгоритм идентификации на основе формулы (8), где для устойчивого вычисления первой производной использовался сглаживающий кубический сплайн (СКС) с дефектом единица с выбором параметра сглаживания из условия минимума среднеквадратической ошибки сглаживания. В случае идентификации квадратичного ядра $k_2(\tau,s)$ использование сглаживающих сплайнов существенно усложняется. Во-первых, для вычисления смешанной производной второго порядка $f_{2tv}''(t,v)$ нужно строить уже сглаживающий бикубический сплайн (СБС), являющийся функцией двух переменных t,v. Во-вторых, краевые условия задаются уже не в двух крайних точках интервала построения СКС, а на четырех прямых, являющихся границами прямоугольной области построения СБС. В-третьих, из-за разной «гладкости» функции $f_2(t,v)$ по разным переменным необходимо выбрать уже два параметра сглаживания из условия минимума ошибки сглаживания.

Эти затруднения обусловили следующие основные задачи, которые не получили своего решения в соответствующих научных публикациях и которые решаются в настоящей работе:

- разработка алгоритма, позволяющего строить сглаживающий бикубический сплайн с большим числом комбинаций краевых условий на разных границах области построения сплайна;
- раздельный выбор двух параметров сглаживания (по каждой переменной сплайна) из условия минимума ошибки сглаживания на основе метода *L*-кривой;
- исследование устойчивости полученного решения к случайным ошибкам измерения функции $f_2(t,v)$;
- применение алгоритмов постобработки результатов идентификации для повышения ее точности.

2. АЛГОРИТМ ИДЕНТИФИКАЦИИ КВАДРАТИЧНОГО ЯДРА

Обратимся к формуле (7) и предположим, что значения двумерных функций $f^{(\alpha)}(t,v)$, $f^{(-\alpha)}(t,v)$ измеряются при значениях аргументов $t_i,\ i=1\ldots N_t;\ v_j,\ j=1\ldots N_v$, т. е. в узлах прямоугольной сетки $\{t_i,v_j\},\ i=1\ldots N_t,\ j=1\ldots N_v$. Заметим, что узлы t_i и τ_j могут иметь неодинаковый и неравный шаг. Тогда значения функции $f_2(t,v)$ также определяются в узлах этой прямоугольной сетки, и для учета возможных погрешностей

(шумов) измерений принимается следующая модель для зашумленных значений $\tilde{f}_2(t_i, v_j)$:

$$\tilde{f}_2(t_i, v_j) = f_2(t_i, v_j) + \eta_{i,j}, \quad i = 1 \ldots N_t, \quad j = 1 \ldots N_v, \tag{11}$$

где $\eta_{i,j}$ – случайный шум измерения с нулевым средним и дисперсией σ_η^2 (равноточные измерения). Требуется по исходным данным $\left\{\tilde{f}_2(t_i, v_j)\right\}$ вычислить значения производных $f_{2tv}''(t,v)$, $f_{2v^2}''(t,v)$ в заданных узлах.

Для устойчивого вычисления этих производных обратимся к сглаживающим кубическим сплайнам [9], широко используемым при обработке экспериментальных данных [10, 11]. Предположим, что на некотором интервале $[V_1, V_2]$ задано N_v узлов $V_1 = v_1 < v_2 < \ldots < v_{N_v} = V_2$, и в этих узлах измерены значения функции (сигнала) $f(v)$:

$$\tilde{f}_j = f(v_j) + \eta_j, \quad j = 1 \ldots N_v, \tag{12}$$

где η_j – случайный шум измерений с нулевым средним и дисперсией σ_η^2 (равноточные измерения). Сглаживающий кубический сплайн $S_{N_v,\alpha}(v)$ с дефектом единица на каждом отрезке $\left[v_j, v_{j+1}\right)$ можно представить кубическим многочленом вида [10]

$$S_{N_v,\alpha}(v) = a_j + b_j(v - v_j) + c_j(v - v_j)^2 + d_j(v - v_j)^3, \tag{13}$$

причем функция $S_{N_v,\alpha}(v)$ должна быть дважды непрерывно дифференцируема на всем интервале $[V_1, V_2]$. Заметим, что в отличие от интерполяционного сплайна (проходящего через точки $(v_j, \tilde{f}_j)$) сглаживающий кубический сплайн $S_{N_v,\alpha}(v)$ в общем случае не проходит через эти точки, а проходит более «плавно» в некоторой окрестности этих точек, зависящей от величины параметра сглаживания α, обеспечивая тем самым сглаживание (фильтрацию) шума измерений.

Для однозначного вычисления коэффициентов сплайна a_j, b_j, c_j, d_j задают краевые условия в узлах v_1, v_{N_v}. Наиболее часто используются следующие условия [9, 11]:

- условия на нулевые вторые производные сплайна (естественные краевые условия):

$$S''_{N_v,\alpha}(v_1) = 0; \quad S''_{N_v,\alpha}(v_{N_v}) = 0; \tag{14}$$

- условия на первые производные сплайна:

$$S'_{N_v,\alpha}(v_1) = s'_1; \quad S'_{N_v,\alpha}(v_{N_v}) = s'_{N_v}, \tag{15}$$

а также комбинация этих условий (например, слева условие (15), справа – (14)). Показано [9], что СКС, построенный при этих условиях, доставляет минимум функционалу:

$$F_\alpha(S) = \alpha \int_{v_1}^{v_{N_v}} |S''(v)|^2 \, dv + \sum_{j=1}^{N_v} p_j^{-1} (\tilde{f}_j - S(v_j))^2 , \qquad (16)$$

где p_j – весовые множители, отражающие точность j-го измерения $\tilde{f}_j$ (в случае равноточных измерений задаются одинаковыми).

Для вычисления коэффициентов сплайна (при заданном параметре сглаживания) составляется система линейных алгебраических уравнений с пятидиагональной матрицей относительно некоторого вектора (как правило, это значения второй производной сплайна в узлах $\{v_j\}$), через который затем находятся все коэффициента сплайна (подробнее см. [9, 11]).

Параметр сглаживания α «управляет» гладкостью сплайна, и ошибка сглаживания (как и ошибка дифференцирования) существенно зависит от величины этого параметра [11, 12]. Существует значение параметра (назовем его оптимальным), для которого ошибка сглаживания (в принятой норме) минимальна [12]. Временно предположим, что приемлемое (с точки зрения минимума ошибки сглаживания) значение параметра сглаживания может быть найдено (выбор параметра рассматривается в следующем разделе).

Замечание 1. Из вида интеграла (7) следует, что функция $f_2(t,v)$ принимает ненулевые значения для аргументов, удовлетворяющих условию $v \le t$. Для отрицательных значений v, t функция равна нулю в силу условия технической реализуемости системы, т. е.

$$k_2(t,v) \equiv 0 \text{, если } v < 0, \;\; t < 0 .$$

Для уменьшения влияния разрыва первого рода при значениях $v = t$ предлагается дополнить значения функции $f_2(t,v)$ для $v > t$ по правилу

$$f_2(t, t + \Delta v) = f_2(t,t) + (f_2(t,t) - f_2(t, t - \Delta v), \; \Delta v > 0 .$$

Дополненную таким образом функцию будем обозначать как $f_2^*(t,v)$.

Первоначально остановимся на алгоритме вычисления значений производной $f''_{2v^2}(t,v)$, который можно представить следующими шагами.

Шаг 1. Задаются краевые условия, комбинация которых в крайних точках v_1, v_{N_v} интервала построения определяется исходя из имеющейся априорной информации о функции $f_2^*(t,v)$ (при отсутствии такой достоверной информации следует обратиться к естественным условиям (14)).

Шаг 2. Для каждого $i = 1 \ldots N_t$ формируется набор данных

$$\left\{ v_j, \tilde{f}1_j^{(i)} = \tilde{f}_2^*(t_i, v_j), \;\; j = 1 \ldots N_v \right\},$$

выбирается параметр сглаживания $\alpha 1^{(i)}$ и строится СКС $S1^{(i)}_{N_v,\alpha 1^{(i)}}(v)$, по которому затем вычисляется первая производная $\hat{f}'_{2v}(t_i,v_j)=$ $=\dfrac{d}{dv}S1^{(i)}_{N_v,\alpha 1^{(i)}}(v)\big|_{v=v_j}=b1^{(i)}_j$ (оценка производной $f'_{2v}(t_i,v_j)$), где $b1^{(i)}_j$ – коэффициент сплайна $S1^{(i)}_{N_v,\alpha 1^{(i)}}(v)$ в представлении (13).

Шаг 3. Для каждого $i=1\ldots N_t$ формируется набор данных

$$\left\{v_j,\tilde{f}2^{(i)}_j=\hat{f}'_{2v}(t_i,v_j),\ j=1,...,N_v\right\},$$

выбирается параметр сглаживания $\alpha 2^{(i)}$ и строится СКС $S2^{(i)}_{N_v,\alpha 2^{(i)}}(v)$, первая производная которого является оценкой $\hat{f}''_{2v}(t_i,v_j)=\dfrac{d}{dv}S2^{(i)}_{N_v,\alpha 2^{(i)}}(v)\big|_{v=v_j}=$ $=b2^{(i)}_j$ для второй производной $f''_{2v^2}(t_i,v_j)$, где $b2^{(i)}_j$ – коэффициент сплайна $S2^{(i)}_{N_v,\alpha 2^{(i)}}(v)$ в представлении (13).

Таким образом, вычислены оценки $\hat{f}''_{2v^2}(t_i,v_j)$ второй производной $f''_{2v^2}(t_i,v_j)$ в узлах v_j для t_i, $i=1,...,N_t$.

Перейдем к построению бикубического сглаживающего сплайна (следуя методике работы [14]) для вычисления смешанной производной $f''_{2tv}(t_i,v_j)$ в виде следующих шагов.

Шаг 1. Для каждого $j=1\ldots N_v$ формируется набор данных (фиксируется значение v_j):

$$\left\{t_i,\tilde{f}3^{(j)}_i=\tilde{f}^*_2(t_i,v_j),\quad i=1\ldots N_t\right\},$$

выбирается параметр сглаживания $\alpha 3^{(j)}$ и по исходным данным (фиксируется значение v_j) строится СКС $S3^{(j)}_{N_t,\alpha 3^{(j)}}(t)$, по которому затем вычисляется первая производная $\hat{f}'_{2t}(t_i,v_j)=\dfrac{d}{dt}S3^{(j)}_{N_t,\alpha 3^{(j)}}(t)\big|_{t=t_i}=b3^{(j)}_i$ (оценка производной $f'_{2t}(t_i,v_j)$), где $b3^{(j)}_i$ – коэффициент сплайна $S3^{(j)}_{N_t,\alpha 3^{(j)}}(t)$ в представлении (13).

Шаг 2. Для каждого $i=1\ldots N_t$ формируется набор данных (фиксируется значение t_i):

$$\left\{v_j,\tilde{f}4^{(i)}_j=\hat{f}'_{2t}(t_i,v_j),\quad j=1\ldots N_v\right\},$$

выбирается параметр сглаживания $\alpha 4^{(i)}$ и строится СКС $S4^{(i)}_{N_v,\alpha 4^{(i)}}(v)$, первая производная которого является оценкой $\hat{f}''_{2tv}(t_i,v_j)=\dfrac{d}{dv}S4^{(i)}_{N_v,\alpha 4^{(i)}}(v)\big|_{v=v_j}=$ $=b4^{(i)}_j$ для смешанной производной $f''_{2tv}(t_i,v_j)$, где $b4^{(i)}_j$ – коэффициент сплайна $S4^{(i)}_{N_v,\alpha 4^{(i)}}(v)$ в представлении (13).

Шаг 1 повторяется для v_j, $j=1\ldots N_v$, а шаг 2 – для t_i, $i=1\ldots N_t$.

После вычисления оценок $\hat{f}''_{2v}(t_i,v_j)$, $\hat{f}''_{2tv}(t_i,v_j)$ по формуле (9) находится оценка $\hat{k}_2(t_i-v_j,t_i)$ для значений $v_j\le t_i$.

Замечание 2. Формула обращения (9) определяет значение квадратичного ядра $k_2(t,v)$ для аргументов $0\le v\le t\le T$, т. е. для значений аргумента $v\le t$. Прямая $v=t$ является осью симметрии ядра $k_2(t,v)$ (следствие одномерного входного сигнала), и поэтому для определения значений ядра для $v=t+\Delta v>t$, где $\Delta v>0$, предлагается симметричное дополнение значений ядра по формуле $k_2(t,\ t+\Delta v)=k_2(t+\Delta v,t)$.

Замечание 3. Так как построение СКС по переменной *v* требует примерно $C_{oper}\cdot N_v$, арифметических операций [8, с. 345], где $C_{oper}\approx 30$ то предлагаемый алгоритм вычисления производных потребует порядка $C^4_{oper}N_v^3N_t$ операций. Следовательно, предложенные алгоритмы вычисления производных имеют высокую вычислительную эффективность даже при большой размерности сетки (t_i,v_j).

3. ВЫБОР ПАРАМЕТРА СГЛАЖИВАНИЯ

Ранее было отмечено, что величина параметра сглаживания α (см. (16)) существенно влияет на величину ошибки сглаживания СКС. Если бы дисперсия σ^2_η шума измерений (см. (12)) была достоверно известна (хотя бы с точностью 5…8 %), то алгоритм выбора, построенный на основе проверки критерия оптимальности линейного алгоритма фильтрации, позволял бы с приемлемой точностью 5…8 % оценить значения оптимального параметра сглаживания, минимизирующего величину среднеквадратической ошибки сглаживания (см. [11, с. 60–67; 12]). Очевидно, что ситуация, когда дисперсия шума неизвестна, наиболее характерна при решении практических задач идентификации. Поэтому для выбора параметра в этом случае обратимся к методу *L*-кривой, который рассматривается в зарубежных публикациях (например, в [14, 15]) для выбора параметра регуляризации в алгоритмах решения линейных некорректных задач. В работе [16] была сделана следующая модификация метода *L*-кривой для выбора параметра сглаживания. Кратко о сути этого алгоритма выбора.

Введем в рассмотрение следующие функционалы (см. (16)):

$$\rho(\alpha) = \sum_{j=1}^{N_v} p_i^{-1} (\tilde{f}_j - S_{n,\alpha}(v_j))^2 , \quad \gamma(\alpha) = \int_{v_1}^{v_{N_v}} \left| S''_{N_v,\alpha}(v) \right|^2 dv . \qquad (17)$$

Тогда L-кривой (форма которой напоминает начертание латинской буквы L) называется параметрическая кривая с координатами $(\rho(\alpha), \gamma(\alpha))$. Можно показать, что кривизна L-кривой определяется следующей формулой:

$$k_L(\alpha) = 2 \frac{\hat{\rho}'(\alpha)\,\hat{\gamma}''(\alpha) - \hat{\rho}''(\alpha)\,\hat{\gamma}'(\alpha)}{\left[\left(\hat{\rho}'(\alpha)\right)^2 + \left(\hat{\gamma}'(\alpha)\right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}}, \qquad (18)$$

где $\hat{\rho}(\alpha) = \ln \rho(\alpha)$, $\hat{\gamma}(\alpha) = \ln \gamma(\alpha)$. Для эффективного вычисления значения функционала $\gamma(\alpha)$ предлагается следующая формула:

$$\gamma(\alpha) = \sum_{i=1}^{n-1} \left(4c_i^2 h_i + 12 c_i\, d_i h_i^2 + 12 d_i^2 h_i^3 \right),$$

где $h_i = t_{i+1} - t_i$, $i = 1 \ldots n-1$, c_i, d_i – коэффициенты СКС в представлении (13), вычисленные при заданном параметре α. В качестве параметра сглаживания будем принимать величину α_L, для которой кривизна $k_L(\alpha)$ принимает максимальное значение.

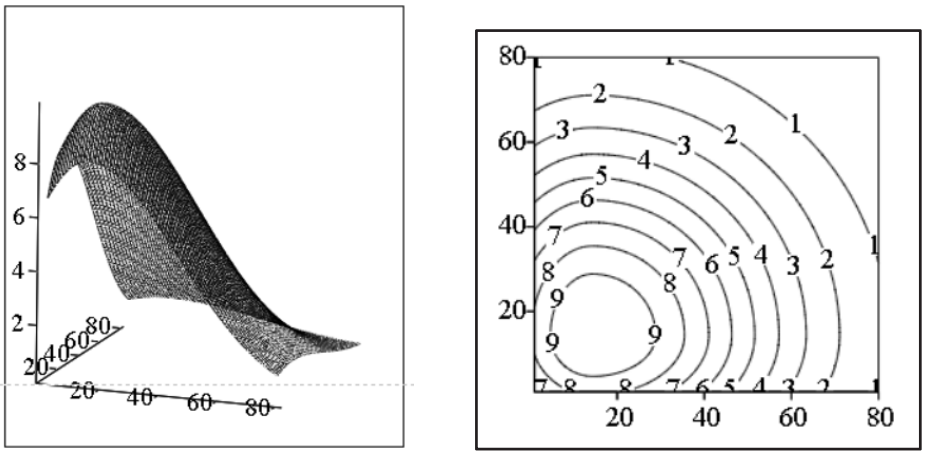
Для вычисления значения α_L можно использовать численные методы одномерной минимизации. При этом для нахождения кривизны по формуле (18) нужны значения производных функционалов $\hat{\rho}(\alpha)$, $\hat{\gamma}(\alpha)$ в заданной точке α. Производные можно вычислить либо с использованием интерполяционных сплайнов $\hat{\rho}(\alpha)$, $\hat{\gamma}(\alpha)$ (подробнее см. в [16]), либо через конечные разности соответствующего порядка.

В работе [16] выполнен обширный вычислительный эксперимент для ответа на вопрос: велик ли проигрыш по ошибке сглаживания при использовании α_L вместо оптимального α_{opt} (который можно определить только в вычислительном эксперименте)? Эксперимент проводился с функциями, являющимися «типовыми» выходными сигналами динамической системы при подаче на вход ступенчатых сигналов. Анализ результатов эксперимента показал, что алгоритм выбора параметра сглаживания на основе метода L-кривой позволяет достаточно хорошо оценить оптимальное значение параметра сглаживания. Увеличение ошибки сглаживания при использовании параметра α_L в среднем не превышает 5…15 % по сравнению с α_{opt}, вычисление которого на практике невозможно.

Таким образом, для вычисления параметров сглаживания $\alpha 1^{(i)}$, $\alpha 2^{(i)}$, $\alpha 3^{(i)}$, $\alpha 4^{(i)}$ предлагается использовать алгоритм выбора параметра сглаживания на основе метода L-кривой.

4. ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АЛГОРИТМА ИДЕНТИФИКАЦИИ

В качестве тестового квадратичного ядра $k_2(\tau, s)$ была взята функция, используемая для описания динамики одного типа теплообменников [6]. Поверхность этой функции показана на рис. 1, *а*, а изолинии – на рис. 1, *б.* Граница временного интервала $T = 1$, количество узлов $N_t = 80, N_v = 80.$



а *б*

Рис. 1. Тестовое квадратичное ядро

Fig. 1. The test quadratic kernel

Первоначально определим методическую ошибку алгоритма идентификации. Для этого вычислялись значения интеграла (7) в узлах t_i, $i = 1 \ldots N_t$, $v_j, j = 1 \ldots N_v$, которые интерпретировались как точные значения функции $f_2(t_i, v_j)$. Эти данные, представленные в виде матрицы **F** размером 80×80 с элементами $F_{i,j} = f_2(t_i, v_j)$, являлись исходными для предлагаемого алгоритма идентификации. Так как эти исходные данные принимались как точные, то вместо СКС строились интерполяционные кубические сплайны (включая бикубический) с краевыми условиями (14). По этим сплайнам вычислялись оценки производных $\hat{f}''_{2v}(t_i, v_j)$, $\hat{f}''_{2tv}(t_i, v_j)$, а затем по формуле (9) строилась оценка для квадратичного ядра (см. замечание 2). На рис. 2 показаны изолинии этой оценки, имеющей относительную ошибку идентификации $\delta_K = \dfrac{\left\| \mathbf{K}_2 - \hat{\mathbf{K}}_2 \right\|}{\left\| \mathbf{K}_2 \right\|} = 0{,}011$, где $\mathbf{K}_2, \hat{\mathbf{K}}_2$ – матрицы, составленные из значений точного ядра $k_2(t_i, v_j)$ и его оценок $\hat{k}_2(t_i, v_j)$ соответственно, $\|\cdot\|$ – евклидова норма матрицы. Примерно такая же ошибка наблюдалась при других размерах сеток по *t*, *v.* Поэтому можно сделать вывод, что предложенный алгоритм идентификации имеет низкую методическую ошибку.

Рассмотрим влияние шумов измерения функции $f_2(t,v)$ на точность идентификации. Для этого все элементы «точной» матрицы **F** искажались нормально распределенным шумом с относительным уровнем $\delta_F = \dfrac{\left\|\mathbf{F}-\tilde{\mathbf{F}}\right\|}{\left\|\mathbf{F}\right\|}$, где $\tilde{\mathbf{F}}$ – матрица с «зашумленными» элементами. Сформированная таким образом матрица $\tilde{\mathbf{F}}$ использовалась в качестве исходных данных для ранее описанного алгоритма идентификации. Задавалось три уровня шума: 0.02, 0.04, 0.06. Параметр сглаживания на всех шагах вычисления производных выбирался описанным выше методом L-кривой. Основная составляющая ошибки идентификации имела случайный характер, и поэтому для ее уменьшения предлагается ввести этап постобработки, который заключается в фильтрации матрицы $\hat{\mathbf{K}}_2$ (результат работы алгоритма идентификации) локально-пространственным комбинированным двумерным фильтром [17], который эффективно удаляет артефакты вейвлет-фильтрации [18]. Результатом работы этого фильтра

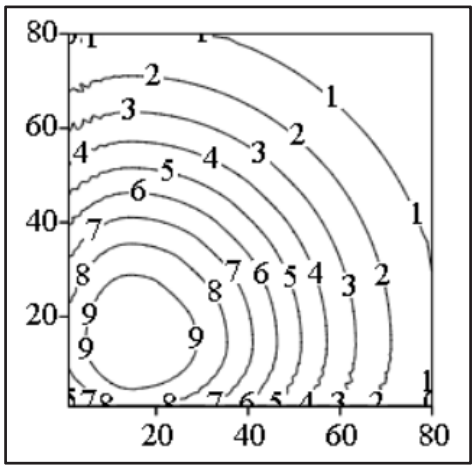


Рис. 2. Оценка ядра $k_2(\tau,s)$, построенная по точным данным

Fig. 2. The Kernel estimation $k_2(\tau,s)$ on accurate data

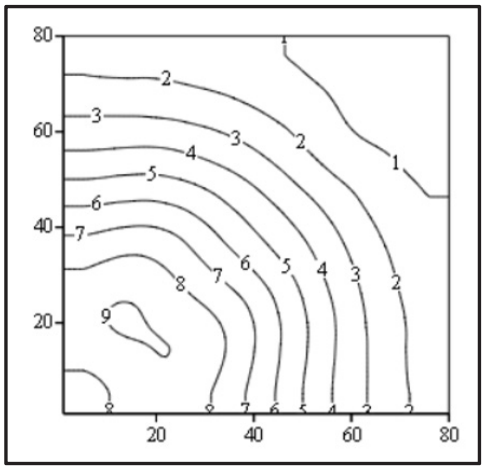


Рис. 3. Оценка ядра $k_2(\tau,s)$ после постобработки

Fig. 3. The Kernel estimation $k_2(\tau,s)$ after post-processing

является матрица $\hat{\mathbf{K}}^{\text{кф}}$, элементы которой определялись следующим соотношением:

$$\hat{K}^{\text{кф}}_{j1,j2} = \underset{i1,i2\in A}{\text{aver}}\left(\hat{K}^{\text{мф}}_{i1,i2} : \left|\hat{K}^{\text{мф}}_{i1,i2} - \hat{K}^{\text{мф}}_{j1,j2}\right| \le \Delta_F\right), \tag{19}$$

т. е. усреднялись только те значения медианного фильтра $\hat{K}^{\text{мф}}_{i1,i2}$, которые попадали в прямоугольную апертуру A фильтра с размерами $K_1 \times K_2$ и удовлетворяли еще дополнительному условию $\left|\hat{K}^{\text{мф}}_{i1,i2} - \hat{K}^{\text{мф}}_{j1,j2}\right| \le \Delta_K$,

что предотвращало сглаживание контрастных деталей изображения при правильном выборе порога Δ_K. Результат медианной фильтрации $\hat{K}^{\text{мф}}_{j1,j2}$ определялся выражением

$$\hat{K}^{\text{мф}}_{j1,j2} = \underset{i1,i2\in B}{\text{med}}\left(\hat{K}_{2i1,i2}\right). \tag{20}$$

Операция $\underset{i1,i2\in B}{\text{med}}\left(\hat{K}_{2i1,i2}\right)$ означала вычисление медианы для элементов матрицы $\hat{\mathbf{K}}_2$, равных значениям оценки $\hat{k}_2(t_i,v_j)$ квадратичного ядра и попавших в прямоугольную апертуру B фильтра с размерами $L_1\times L_2$. Применение в данном вычислительном эксперименте комбинированного фильтра с размерами 7×7 (med), 7×7 (Aver) и $\Delta_K=3$ на этапе постобработки позволило в 2…2,5 раза уменьшить величину относительной ошибки идентификации. Относительная ошибка идентификации $\delta^{\text{кф}}_K=\dfrac{\left\|\mathbf{K}_2-\hat{\mathbf{K}}^{\text{кф}}\right\|}{\left\|\mathbf{K}_2\right\|}$ для измерения уровня шума 0,02 была равна 0,042 (без фильтрации 0,082), для уровня шума 0,04 относительная ошибка равна 0,068 (без фильтрации 0,133), для уровня шума 0,06 относительная ошибка равна 0,098 (без фильтрации 0,186). Эти результаты позволяют сделать вывод о целесообразности фильтрации результатов идентификации. На рис. 3 показаны изолинии оценки $\hat{k}^{\text{кф}}_2(t_i,v_j)$ для уровня шума 0,04.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Непараметрическая идентификация ядер Вольтерра для моделирования нелинейных систем является весьма сложной для практики задачей. При использовании в активном эксперименте известных формул обращения выходного сигнала идентифицируемой системы возникают принципиальные трудности, обусловленные некорректностью задачи дифференцирования и неустойчивостью получаемых решений к шумам измерений. Для устойчивого вычисления производных второго порядка в работе строятся сглаживающие сплайны одной и двух переменных, что обеспечивает высокую вычислительную эффективность и низкую методическую ошибку (примерно один процент) идентификации по точным данным. Для минимизации ошибки сглаживания экспериментальных данных сплайнами предложен алгоритм выбора параметров сглаживания сплайнов, основанный на методе *L*-кривой. Для уменьшения случайной ошибки идентификации в работе используется постобработка результатов идентификации, заключающаяся в фильтрации результатов идентификации локально-пространственным комбинированным фильтром. Выполненный вычислительный эксперимент показал приемлемую для практики точность идентификации квадратичного ядра Вольтерра предлагаемым подходом «алгоритм обращения + алгоритм фильтрации».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Каминскас В.* Идентификация динамических систем по дискретным наблюдениям. – Вильнюс: Мокслас, 1985. – 152 с.

2. *Giannakis G.B., Serpedin E.* A bibliography on nonlinear system identification // Signal Processing. – 2001. – Vol. 81, no. 3. – P. 533–580.

3. Volterra-series-based nonlinear system modeling and its engineering applications: a state-of-the-art review / C.M. Cheng, Z.K. Peng, W.M. Zhang, G. Meng // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2017. – Vol. 87. – P. 430–364.

4. С*олодуша С.В.* Квадратичные и кубичные полиномы Вольтерра: идентификация и приложение // Вестник СПбГУ. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. – 2018. – Т. 14, вып. 2. – С. 131–144. – DOI: 10.21638/11702/spbu10.2018.205.

5. *Solodusha S.V.* New classes of Volterra integral equations of the first kind related to the modeling of the wind turbine dynamics // 15th International Conference on stability and oscillations of nonlinear control systems (Pyatnitskiy's Conference). – Moscow, 2020. – P. 35–39. – DOI: 10.1109/STAB49150.2020.9140662.

6. *Солодуша С.В.* Методика построения интегральных моделей динамических систем: алгоритмы и приложения в энергетике: дис. … д-ра техн. наук: 05.13.18. – Иркутск, 2018. – 353 с.

7. *Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.* Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1986. – 285 с.

8. *Воскобойников Ю.Е., Боева В.А.* Алгоритмы непараметрической идентификации сложных технических систем // Научный вестник НГТУ. – 2020. – № 4 (80). – С. 47–64. – DOI: 10.17212/1814-1196-2020-4-47-64.

9. *Завьялов Ю.С., Квасов Б.И., Мирошниченко В.Л.* Методы сплайн-функций. – М.: Наука, 1980. – 345 с.

10. *Wang Y.* Smoothing splines methods and applications. – A Chapman & Hall, 2011. – 347 p. – (Monographs on Statistics and Applied Probability; vol. 121).

11. *Воскобойников Ю.Е., Преображенский Н.Г., Седельников А.И.* Математическая обработка эксперимента в молекулярной газодинамике. – Новосибирск: Наука, 1984. – 238 с.

12. *Voskoboynikov Yu.E., Boeva V.A.* Synthesis of smoothing cubic spline in non-parametric identification technical systems' algorithm // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 953. – P. 012035. – DOI: 10.1088/1757-899X/953/1/012035.

13. *Воскобойников Ю.Е., Боева В.А.* Устойчивый алгоритм вычисления смешанных производных в задачах непараметрической идентификации нелинейных систем // Современные наукоемкие технологии. – 2021. – № 4. – С. 25–29. – DOI: 10.17513/snt.38610.

14. *Rezghi M., Hosseini S.M.* A new variant of L-curve for Tikhonov regularization // Journal of Computational and Applied Mathematics. – 2012. – Vol. 231 (2). – P. 914–924.

15. *Cultrera A., Callegaro L.* A simple algorithm to find the L-curve corner in the regularization of ill-posed inverse problems // IOP SciNotes. – 2020. – Vol. 1 (2). – P. 25004.

16. *Воскобойников Ю.Е., Боева В.А.* Метод L-кривой для оценивания оптимального параметра сглаживающего кубического сплайна // Международный научно-исследовательский журнал. – 2021. – № 11 (113), ч. 1. – С. 6–13. – DOI: 10.23670/IRJ.2021.113.11.003.

17. *Воскобойников Ю.Е.* Артефакты вейвлет-фильтрации изображений и их устранение // Автометрия. – 2020. – Т. 56, № 6. – С. 3–10. – DOI: 10.15372/AUT20200601.

18. *Meyer Y.* Wavelets: algorithms and applications. – Philadelphia: SIAM, 1993. – 133 p.

Воскобойников Юрий Евгеньевич, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой прикладной математики Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин), профессор кафедры автоматики Новосибирского государственного технического университета, заслуженный работник высшей школы РФ. Основное направление научных исследований – методы и алгоритмы решения некорректных задач интерпретации экспериментальных данных; методы и алгоритмы фильтрации сигналов и изображений; идентификация динамических систем. Является автором более

300 научных работ, в том числе пяти научных монографий по решению некорректно поставленных задач. E-mail: voscob@mail.ru

Боева Василиса Андреевна, аспирант Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин) по профилю «Системный анализ, управление и обработка информации», ассистент кафедры прикладной математики Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин). Основное направление научных исследований – методы и алгоритмы непараметрической идентификации реальных технических систем. Является автором 30 научных статей. E-mail: v.boyeva@sibstrin.ru

Voskoboinikov Yuri Evgenievich, graduate of the NSTU (NETI), Department of Automation, Doctor of Physics and Mathematics, Head of the Department of Applied Mathematics at the Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Professor at the Department of Automation of the Novosibirsk State Technical University, Honored Worker of the Higher School of the Russian Federation. The main direction of scientific research is methods and algorithms for solving ill-posed problems of interpreting experimental data; methods and algorithms for filtering signals and images, as well as identification of dynamic systems. He is the author of over 300 scientific papers including 5 scientific monographs on solving ill-posed problems. E-mail: voscob@mail.ru

Boeva Vasilisa A., postgraduate student, NSTU Department of System Analysis, Control and Data Interpretation; teaching assistant at the Department of Applied Mathematics, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin). Her research interests are currently focused on non-parametric identification methods and algorithms for real engineering systems. She has 18 scientific articles. E-mail: v.boyeva@sibstrin.ru

DOI: 10.17212/2782-2001-2022-1-25-40

Identification of the quadratic kernel of the Volterra equation for modeling non-linear dynamic systems[*]

Yu.E. VOSKOBOINIKOV[1,2,a], *V.A. BOEVA*[2,b]

[1] *Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation*

[2] *Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), 113 Leningradskaya Street, Novosibirsk, 630008, Russian Federation*

[a] *voscob@mail.ru* [b] *v.boyeva@sibstrin.ru*

Abstract

In the last two decades, integral models have been used to describe the dynamics of stationary nonlinear systems in which the terms of the Volterra series are the kernels. The most commonly used are the linear term (the impulse transition function depends on one variable) and the quadratic term (depending on two variables). An active experiment in which a special combination of rectangular pulses is fed to the input of the system is carried out to select two of its components in the output signal of the identified system - the output of the linear "subsystem" and the output of the "quadratic" subsystem. After isolating the output of the "quadratic" subsystem, the identification of the quadratic term of the Volterra series is reduced to solving a two-dimensional integral equation of the first kind. In the literature, inversion formulas are given in which the quadratic kernel function is obtained as a result of arithmetic operations with second-order derivatives of the output signal. Differentiation of functions is an incorrectly posed problem, when small errors in the assignment of a function (measurement noise) cause large errors in

[*] *Received 14 July 2021.*
The reported study was funded by RFBR, project number 20-38-90041.
The reported study was funded by RSF, project number 22-21-00409.

derivatives (especially in second-order derivatives). The paper proposes the use of smoothing cubic splines for stable calculation of derivatives. To calculate the mixed second-order derivative, a spline with two variables is built - a smoothing bicubic spline. The main problem that arises in practice when processing the data of a real experiment is the selection of a smoothing parameter, on the value of which a smoothing error of noisy data depends. As a rule, the value of the variance of the measurement noise is unknown in the experiment. Therefore, in this work, it is proposed to use an algorithm based on the L-curve method to select the smoothing parameter in the constructed splines (especially in the bicubic one), which does not require setting the variance of the measurement noise. The proposed identification algorithm has a high computational efficiency. The performed computational experiment showed a small methodical error (about 1 %) and good resistance to noise in measurements of the output signals of the identified system. To reduce the random component of the identification error, it is proposed to use post-processing with a local-spatial compound filter.

Keywords: integral models of non-linear systems, Volterra kernels, inversion formula, differentiation of noise contaminated data, smoothing cubic spline, smoothing bicubic spline, smoothing parameter selection, local-spatial compound filter

REFERENCES

1. Kaminskas V. *Identifikatsiya dinamicheskikh sistem po diskretnym nablyudeniyam* [Identification of dynamic systems based on discrete observations]. Vilnius, Moxlas Publ., 1985. 152 p. (In Russian).

2. Giannakis G.B., Serpedin E. A bibliography on nonlinear system identification. *Signal Processing*, 2001, vol. 81, no. 3, pp. 533–580.

3. Cheng C.M., Peng Z.K., Zhang W.M., Meng G. Volterra-series-based nonlinear system modeling and its engineering applications: a state-of-the-art review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, vol. 87, pp. 430–364.

4. Solodusha S.V. Kvadratichnye i kubichnye polinomy Vol'terra: identifikatsiya i prilozhenie [Quadratic and cubic Volterra polynomials: identification and application]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo Universiteta. Prikladnaya matematika. Informatika. Protsessy upravleniya = Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes*, 2018, vol. 14, iss. 2, pp. 131–144. DOI: 10.21638/11701/spbu10.2018.205.

5. Solodusha S.V. New classes of Volterra integral equations of the first kind related to the modeling of the wind turbine dynamics. *15th International Conference on stability and oscillations of nonlinear control systems (Pyatnitskiy's Conference).* Moscow, 2020, pp. 35–39. DOI: 10.1109/STAB49150.2020.9140662.

6. Solodusha S.V. *Metodika postroeniya integral'nykh modelei dinamicheskikh sistem: algoritmy i prilozheniya v energetike*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Methods for constructing integral models of dynamic systems: algorithms and applications in energy. Dr. eng. sci. diss.]. Irkutsk, 2018. 353 p.

7. Tikhonov A.N., Arsenin V.Ya. *Metody resheniya nekorrektnykh zadach* [Methods for solving ill-posed problems]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 285 p.

8. Voskoboynikov Yu.E., Boeva V.A. Algoritmy neparametricheskoi identifikatsii slozhnykh tekhnicheskikh sistem [Non-parametric identification algorithms for complex engineering systems]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2020, no. 4 (80), pp. 47–64. DOI: 10.17212/1814-1196-2020-4-47-64.

9. Zav'yalov Yu.S., Kvasov B.I., Miroshnichenko V.L. *Metody splain-funktsii* [Methods of splines]. Moscow, Nauka Publ., 1980. 345 p.

10. Wang Y. *Smoothing splines methods and applications*. A Chapman & Hall, 2011. 347 p.

11. Voskoboynikov Yu.E., Preobrazhensky N.G., Sedelnikov A.I. *Matematicheskaja obrabotka jeksperimenta v molekuljarnoj gazodinamike* [Mathematical experiment proceeding in molecular gas dynamics]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1984. 238 p.

12. Voskoboynikov Yu.E., Boeva V.A. Synthesis of smoothing cubic spline in non-parametric identification technical systems' algorithm. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 953, p. 012035. DOI: 10.1088/1757-899X/953/1/012035.

13. Voskoboynikov Yu.E., Boeva V.A. Ustoichivyi algoritm vychisleniya smeshannykh proizvodnykh v zadachakh neparametricheskoi identifikatsii nelineinykh sistem [Stable algorithm of mixed derivatives calculation for non-parametric identification problems in nonlinear systems]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii = Modern High Technologies*, 2021, no. 4, pp. 25–29. DOI : 10.17513/snt.38610.

14. Rezghi M., Hosseini S.M. A new variant of L-curve for Tikhonov regularization. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2012, vol. 231 (2), pp. 914–924.

15. Cultrera A., Callegaro L. A simple algorithm to find the L-curve corner in the regularization of ill-posed inverse problems. *IOP SciNotes*, 2020, vol. 1 (2), p. 25004.

16. Voskoboynikov Yu.E., Boeva V.A. Metod L-krivoi dlya otsenivaniya optimal'nogo parametra sglazhivayushchego kubicheskogo splaina [L-curve method for evaluating the optimal parameter of a smoothing cubic spline]. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal = International Research Journal*, 2021, no. 11 (113), pt. 1, pp. 6–13. DOI: 10.23670/IRJ.2021.113.11.003.

17. Voskoboinikov Yu.E. Artefakty veivlet-fil'tratsii izobrazhenii i ikh ustranenie [Artefacts of wavelet filtration of images and their elimination]. *Avtometriya = Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2020, vol. 56, no. 6. DOI: 10.15372/AUT20200601. (In Russian).

18. Meyer Y. *Wavelets: algorithms and applications*. Philadelphia, SIAM, 1993. 133 p.

Для цитирования:

Воскобойников Ю.Е., Боева В.А. Идентификация квадратичного ядра уравнения Вольтерра для моделирования нелинейных динамических систем // Системы анализа и обработки данных. – 2022. – № 1 (85). – С. 25–40. – DOI: 10.17212/2782-2001-2022-1-25-40.

For citation:

Voskoboinikov Yu.E., Boeva V.A. Identifikatsiya kvadratichnogo yadra uravneniya Vol'terra dlya modelirovaniya nelineinykh dinamicheskikh sistem [Identification of the quadratic kernel of the Volterra equation for modeling non-linear dynamic systems]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2022, no. 1 (85), pp. 25–40. DOI: 10.17212/2782-2001-2022-1-25-40.

ISSN 2782-2001
Системы анализа
и обработки данных
том 85, № 1, 2022, с. 41–58

http://journals.nstu.ru/vestnik
Analysis and data
processing systems
Vol. 85, No. 1, 2022, pp. 41–58

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND MANAGEMENT

УДК 620.9. 001.57 (470+571) DOI: 10.17212/2782-2001-2022-1-41-58

Разработка геоинформационной системы для исследования живучести систем энергетики*

Г.К. ДАНИЛОВ[a], А.В. ЕДЕЛЕВ[b]

664033, Иркутская область, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук

[a] *dangleb@isem.irk.ru* [b] *flowers@isem.irk.ru*

Эта статья описывает причины создания инструментария для исследования живучести систем энергетики с помощью возможностей геоинформационных технологий на примере программного пакета «Нефть и газ России». Описывается метаматематическая модель системы и ее разделение на основные составляющие: топологическую и функциональную, где структурная модель отражает топологию энергетической сети в виде графа, а функциональная модель оценивает производительность с учетом как топологических возможностей, так и функциональных ограничений. Рассматриваются примеры использования геоинформационных систем в исследовании живучести и описания требований при разработке инструментария для новой метаматематической модели. Рассказывается об архитектуре текущей версии «Нефть и газ России», ее особенностях и проблемах, которые повлияли на разработку нового инструментария. Приводятся причины использования и особенности прикладного программного интерфейса QT во время разработки инструментария.

Новый инструментарий предполагает использование архитектуры «модель – представление – контроллер», что позволяет модифицировать каждый компонент независимо от другого. Данная архитектура также помогает «отвязать» топологическую и функциональную составляющие посредством инкапсуляции топологической модели в виде отдельного графа, а для связи с функциональной составляющей использовать контроллер. Это дает возможность использовать разные типы функциональных моделей без необходимости изменять топологическую модель. Для каждой функциональной модели используется свой контроллер, который настраивает свой поток данных. Таким образом, предлагаемые изменения комплекса «Нефть и газ России» позволят перейти при исследовании живучести от моделирования отдельных систем энергетики к топливно-энергетическому комплексу страны в целом.

* *Статья получена 31 мая 2021 г.*

Работа выполнена в рамках проекта государственного задания FWEU-2021-0003 № АААА-А21-121012090014-5 программы фундаментальных исследований РФ на 2021–2030 гг. с использованием ресурсов ЦКП «Высокотемпературный контур» Минобрнауки России (проект № 13.ЦКП.21.0038).

Ключевые слова: система энергетики, живучесть, уязвимость, геоинформационная система, базы данных, графический интерфейс пользователя, программно-вычислительный комплекс, математическая модель

ВВЕДЕНИЕ

Живучестью системы энергетики (СЭ) называется ее свойство адаптироваться к различным крупным возмущениям и восстанавливаться до того состояния, в котором она находилась до их воздействия [1]. Идентичным живучести понятием в зарубежной литературе является resilience [2, 3].

Современная схема исследования живучести / resilience СЭ [4], показанная на рис. 1, строится на изучении и анализе системных возможностей к адаптации к крупным возмущениям и восстановлению после их воздействия [5, 6], на количественной оценке живучести СЭ [7] и выработке стратегий по ее повышению [8–14].

Анализ уязвимости [15, 16] играет центральную роль в исследовании живучести СЭ (рис. 1). Уязвимость отражает пассивную реакцию системы на крупное возмущение [17].

Как показано на рис. 1, исходными данными для анализа уязвимости являются информация о функционировании и развитии СЭ, классы возмущений и мероприятия по повышению живучести.

Информация о функционировании и развитии СЭ, включающая в себя природно-климатические и социально-экономические данные мониторинга энергетических объектов, является результатом традиционных общеэнергетических исследований [18].

Возмущения делятся на следующие классы:

- стихийные бедствия, такие как наводнения, землетрясения, ураганы и т. д. [19];
- техногенные катастрофы, вызванные отказом компонент или подсистем [20];
- преднамеренные (умышленные) нарушения, такие как террористические акты, кибератаки и т. д. [21].

Мероприятия по улучшению живучести СЭ [8–14, 22] можно классифицировать по трем основным группам по отношению к возмущению как к событию. Перед возникновением возмущения проводится учет и оценка энергетического оборудования, находящегося в простое, резерве, ремонте, а также подготовка СЭ к любому возможному крупному возмущению с помощью повышения защищенности объектов. Во время возмущения сеть СЭ реконфигурируется, подключаются резервные источники и накопители, хранилища, происходит перераспределение имеющихся ресурсов и сброс нагрузки для приспособления системы к возмущению и его последствиям. После возмущения происходит возврат СЭ в нормальное или близкое к нему состояние путем обратной реконфигурации сети, перезапуска основных источников и восстановления поврежденных объектов, составляются планы по повышению живучести СЭ [8].

Планирование повышения живучести СЭ в целом может быть долгосрочным и краткосрочным [23]. Долгосрочные планы включают в себя модернизацию и реконструкцию магистральных и распределительных сетей,

развертывание средств измерения и контроля, резервирование оборудования и передислокацию производственных мощностей. Краткосрочные планы включают в себя управление спросом, использование микросетей и источников распределенной генерации, внедрение современных методов визуализации и прогнозирования, а также децентрализованных методов управления [8].

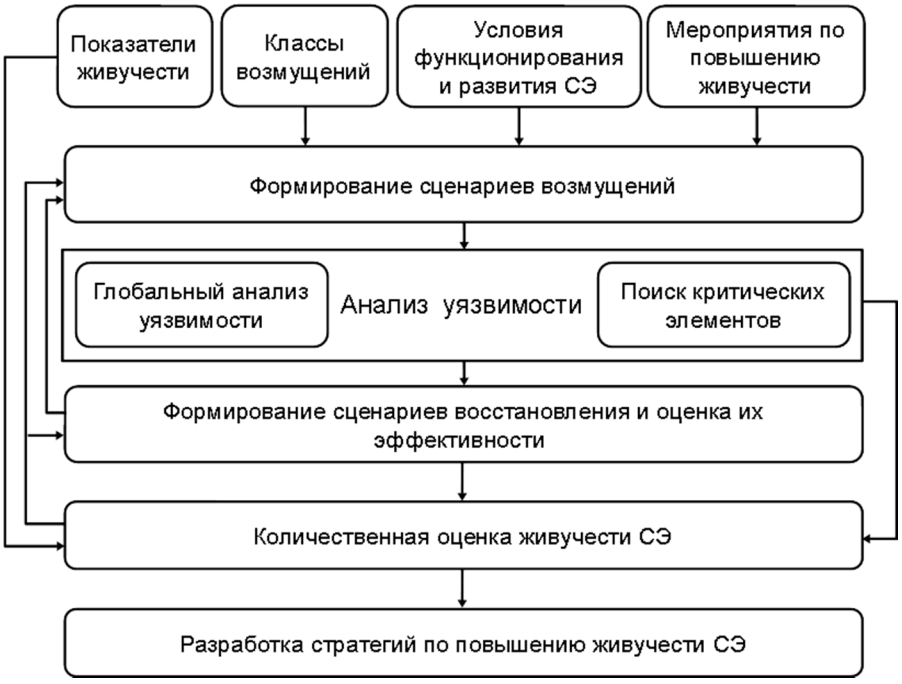


Рис. 1. Общая схема исследования живучести / resilience СЭ

Fig. 1. General scheme of ES resilience research

Главной целью анализа уязвимости СЭ является выявление недостатков в конструкции и механизмах управления системой, которые могут способствовать распространению крупного возмущения по ней самой и также по взаимосвязанным системам [17].

Анализ уязвимости СЭ [24] начинается с формирования множества возможных состояний СЭ, отражающих наиболее представительные или характерные сочетания внешних условий их развития и функционирования в рассматриваемом временном интервале. А также согласно заданным классам формируются сценарии возмущений, описывающие их воздействие на СЭ. Далее анализ уязвимости разбивается на виды, такие как глобальный анализ уязвимости и поиск критических элементов [15, 20].

Общее влияние возмущений на работоспособность СЭ является целью глобального анализа уязвимости. Он проводится путем моделирования серии возмущений с постепенно увеличивающейся степенью воздействия и соответственно возрастающей величиной последствий для системы. Такие вычислительные эксперименты позволят определить пороговые значения воздействия для определенных классов возмущений, превышение которых будет вызывать распад рассматриваемой СЭ на несвязанные части [15, 20].

Поиск критических элементов ориентирован на определение элементов, одиночный или групповой отказ которых вызывает наибольшее снижение работоспособности СЭ в целом. Ключевой момент здесь заключается в том, чтобы обнаружить все, даже неожиданные, наборы критических элементов [20].

Этап формирования сценариев восстановления СЭ и оценки их эффективности связан с этапом анализа уязвимости, так как наискорейшее восстановление системы зависит от нанесенного ущерба, наличия доступа к поврежденным элементам и имеющихся резервов людских, технических и финансовых ресурсов [6]. Эти исходные данные используются для реализации мероприятий по повышению живучести СЭ, относящихся к восстановлению системы. Хотя эти мероприятия и повышают производительность системы, часто она не может быстро вернуться к тому уровню, что был до возмущения. Это в основном определяется значительностью последствий возмущения и продолжительностью операций по восстановлению элементов СЭ.

В литературе предлагается множество разнообразных показателей для количественной оценки живучести [7, 8, 10]. Эти показатели в целом характеризуют производительность системы. В них также в полной мере должен быть отражен временной аспект, поскольку производительность реальной СЭ после возникновения крупного возмущения значительно меняется с течением времени. Последствия такого возмущения не могут быть должным образом измерены с помощью традиционных показателей надежности, поскольку последние характеризуют вероятность и частоту рядовых перебоев в энергоснабжении, а также величину непокрытой нагрузки. Хотя показатели надежности могут дать исследователю некоторую дополнительную информацию об анормальном поведении СЭ, статический характер этих показателей делает их непригодными для измерения пространственно-временных последствий воздействия крупного возмущения на СЭ [16].

Процедура, состоящая из этапов изучения и анализа возможностей СЭ к адаптации и восстановлению, а также из количественной оценки живучести, имеет итеративный характер (рис. 2) и называется циклом повышения живучести [26]. На основе результатов последнего вырабатываются стратегии по повышению живучести СЭ, цель которых заключается в улучшении реакции СЭ в ответ на воздействие рассматриваемых крупных возмущений в будущем.

Решение о включении мероприятия в стратегию и его очереди на реализацию в ней зависит от многих факторов. Некоторые из мероприятий более эффективны в повышения живучести СЭ, а другие более выгодны с точки зрения требуемых людских, технических и финансовых ресурсов. Здесь возникает проблема правильного подбора критериев. Так, с одной стороны, вклад мероприятия в повышение живучести СЭ может быть оценен с различных перспектив [27], а с другой стороны, для выработки долгосрочных и краткосрочных стратегий должны использоваться свои отличающиеся наборы показателей количественной оценки живучести [26].

Для оптимального планирования реализации мероприятий при наличии ресурсных ограничений [28, 23] в отдельной стратегии по повышению живучести СЭ могут применяться многошаговые методы принятия решений в условиях неопределенности [29, 30].

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ СЭ В КОМПЛЕКСНОМ АНАЛИЗЕ УЯЗВИМОСТИ

В статье [31] представлен новый подход к комплексному анализу уязвимости СЭ, основанный на работах [15, 20]. Он обеспечивает:

- рассмотрение взаимосвязей разных типов;
- возможность количественной оценки уязвимости с нескольких точек зрения (например, топологической и функциональной, статической и динамической);
- универсальность по отношению к различным классам возмущений и разным уровням территориальной и технологической иерархии;
- эффективное применение высокопроизводительных вычислений для ускорения расчетов и анализа их результатов.

Моделирование СЭ в подходе [31] строится на следующих положениях.

1. Модель СЭ явным образом разделяется на топологическую и функциональную составляющие. Структурная модель отражает топологию СЭ в виде графа. Его узлы и дуги представляют элементы системы в детальном или агрегированном виде. Функциональная модель иллюстрирует распределения потоков энергоресурса по сети СЭ [20].

2. Если рассматриваются взаимосвязанные СЭ, то они представляются в виде метасистемы (рис. 2). Топология метасистемы описывается объединенными структурными моделями отдельных систем, а моделирование функционирования строится на основе взаимодействия соответствующих функциональных моделей [15].

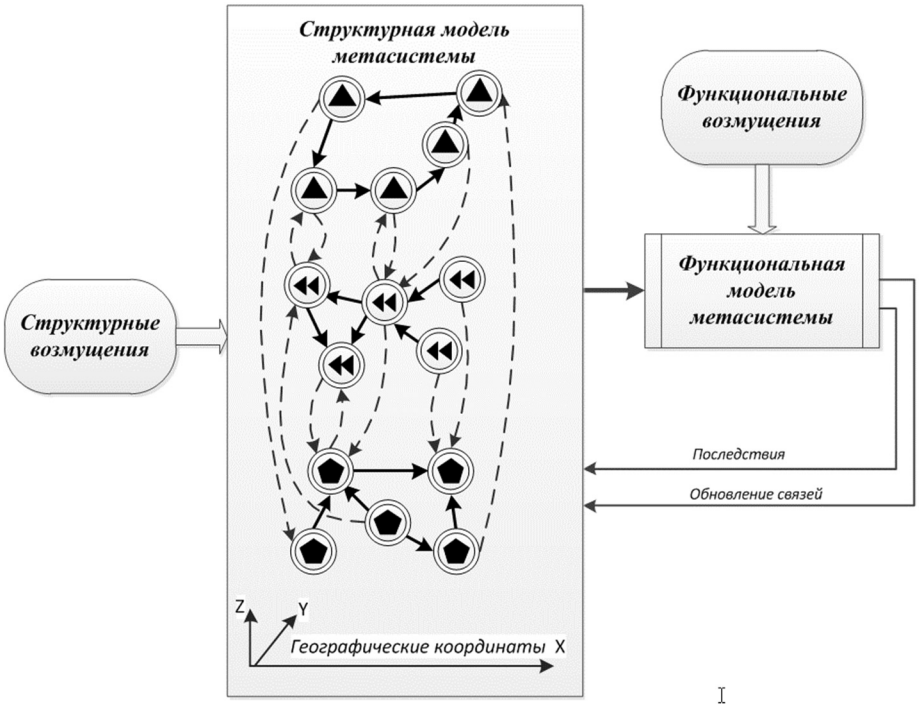


Рис. 2. Моделирование взаимосвязанных СЭ при воздействии крупных возмущений

Fig. 2. Modeling of interconnected ES under the influence of large disturbances

Воздействие крупных возмущений на метасистему приводит к деформации ее структуры или деградации ее функциональных возможностей (рис. 2), что в обоих случаях является причиной падения производительности систем. За изменение системной топологии отвечают структурные возмущения, сценарий которых состоит из поочередного или одновременного удаления узлов и дуг графа. Сценарий функциональных возмущений обычно выражается в виде снижения производственных мощностей СЭ.

Географические координаты элементов метасистемы учитываются при моделировании возмущений, имеющих пространственную привязку.

Процедуры анализа уязвимости состоят из следующих основных этапов.

1. Формирование группы элементов метасистемы, сформированной из взаимосвязанных СЭ.

2. Формирование сценария крупного возмущения, который описывает разовое или многошаговое воздействие на группу элементов в виде их удаления из структурной модели метасистемы или ухудшения условий их функционирования.

3. Выбор показателей измерения падения производительности отдельных СЭ.

4. Моделирование крупного возмущения и количественная оценка его последствий (падения производительности СЭ) на каждом временном шаге с помощью показателей, выбранных на предыдущем этапе.

5. Обработка последствий возмущений (оценка важности элементов, формирование зависимостей и т. д.).

2. ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В АНАЛИЗЕ ЖИВУЧЕСТИ / RESILIENCE СЭ

Геоинформационные системы (ГИС) используются для отображения территориально-производственной структуры СЭ [32], например, при выработке мероприятий по повышению живучести [33].

В анализе уязвимости ГИС используются для представления результатов расчетов на функциональной модели [31, 34, 35]. Электронные карты создаются на информации топологической модели [32].

3. ПРОГРАММНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС «НЕФТЬ И ГАЗ РОССИИ»

Программно-вычислительный комплекс «Нефть и газ России» [36] используется для исследования живучести систем газоснабжения, нефте- и нефтепродуктоснабжения России [37, 38]. Текущая структура комплекса показана на рис. 3.

В настоящее время необходима модернизация программно-вычислительного комплекса «Нефть и газ России» по следующим причинам:

- адаптация к положениям моделирования СЭ нового подхода к комплексному анализу уязвимости;
- замена морально устаревшей реляционной системы управления базами данных Paradox на одну из современных компактных.

На текущий момент основным принципом построения программного обеспечения является объектно ориентированный подход [39].

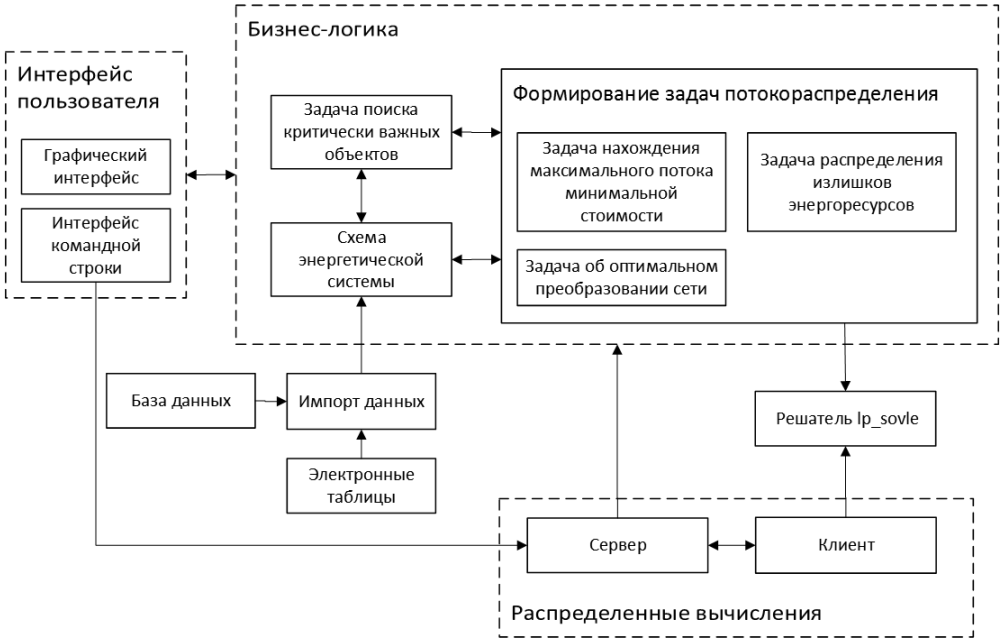


Рис. 3. Компоненты программно-вычислительного комплекса «Нефть и газ России»

Fig. 3. Components of the Oil and Gas of Russia software and computing complex

С момента появления объектно ориентированного подхода (80-е годы прошлого столетия) появилось множество различных парадигм, уточняющих и дополняющих его [40]. Если проследить преемственность некоторых популярных парадигм построения ПО (рис. 4), то, исходя из принципа минимизации сложности программного обеспечения [41], получится следующая иерархия [42]:

- модульность и абстракция, KISS [43], DRY [44];
- процедурное программирование, объектно ориентированный подход [45], Driven Development [46];
- шаблоны проектирования [47, 48], SOLID [49].

Одним из шаблонов проектирования является архитектура приложения, организованная в виде тройки «модель – вид – контроллер». Для выполнения первого пункта предлагается перейти на нее (рис. 5).

Архитектура «модель – вид – контроллер» иллюстрирует разделение данных, пользовательского интерфейса и управляющей логики на три отдельных компонента: модель, представление и контроллер.

Данная архитектура позволяет разделить топологическую и функциональную модели метасистемы посредством инкапсуляции топологической модели в виде отдельного графа. Граф содержит лишь необходимую для построения информацию об объектах СЭ, включая тип объекта, географические данные, его названия и основные характеристики. Для связи с функциональной моделью используется контроллер. Он позволяет настроить поток данных и стандартизировать информацию для ее отображения в топологической

модели. Это дает возможность использовать разные типы функциональных моделей без необходимости изменять топологическую модель. Для каждой функциональной модели используется свой контроллер, который настраивает свой поток данных.

Рис. 4. Иерархия парадигм построения ПО

Fig. 4. The hierarchy of software construction paradigms

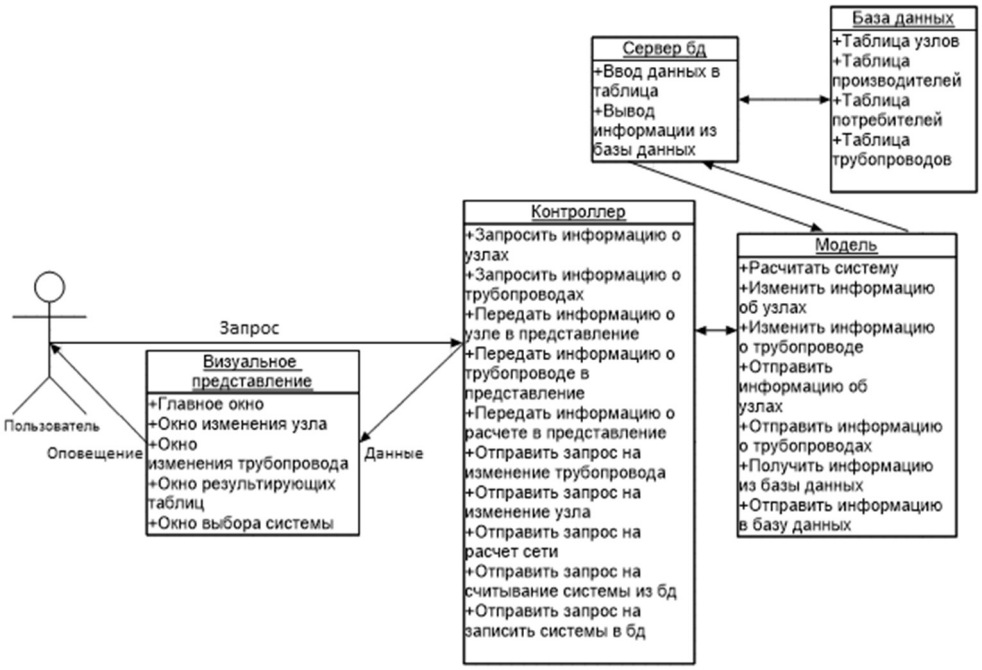


Рис. 5. Новая архитектура программно-вычислительного комплекса «Нефть и газ России»

Fig. 5. A new architecture of the Oil and Gas of Russia software and computing complex

При переходе на данную архитектуру и для разработки приложения была выбрана среда QT. Данная среда имеет несколько отличительных возможностей, которые упрощают разработку данной архитектуры.

• Метаобъектная система. Эта особенность фреймворка позволяет использовать сигналы и слоты для разработки программного обеспечения. В данном случае при разработке представления топологической модели можно использовать механизм слотов и сигналов для разработки поведения, получения и отправки информации из приложения в стандартном плане, а после этого, используя контроллер, определить и интерпретировать данную информацию для функциональной модели.

• Библиотеки для работы и отображения геоинформационных данных. Позволяет, используя метаобъектную систему, отображать объекты на карте, а также производить действия с ними (например, узнать расстояние между двумя узлами).

• Библиотеки для работы с базой данных SQLite.

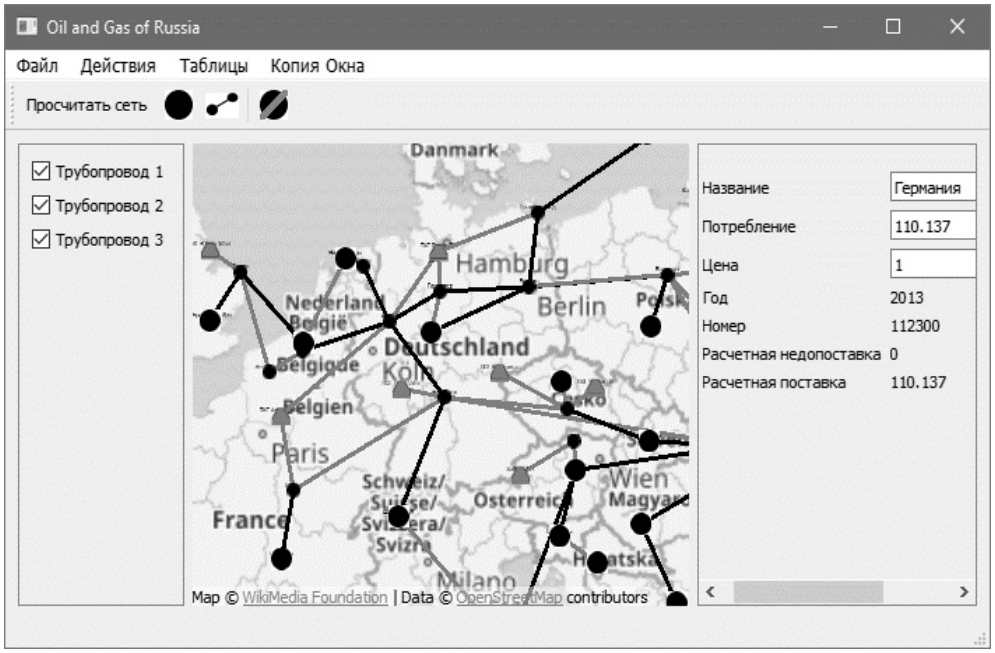


Рис. 6. Внешний вид прототипа специализированной ГИС

Fig. 6. The layout of the specialized GIS prototype

Архитектура «модель – вид – контроллер» позволяет модифицировать каждый компонент независимо от другого. Роль модели выполняет функциональная модель метасистемы или отдельной СЭ. Представление (рис. 6) ассоциируется с топологической моделью отдельной СЭ. Число видов в случае взаимосвязанных СЭ соответствует их числу.

Для работы с функциональной моделью метасистемы или отдельной СЭ используется класс EventChannel, который получает запросы от среды на получение или внесение информации в функциональную модель, тем самым не привязывая интерфейс к конкретной функциональной модели, что позволит

в будущем использовать данную схему классов для разработки под другие функциональные модели.

Классы deleteNodeCommand, DeleteLeaseCommand, InsertNodeCommand, InsertLeaseCommand, UpdateNodeCommand, UpdateLeaseCommand используются для создания запросов на добавление, изменение или удаление информации из функциональной модели. Данные классы разработаны с помощью шаблона программирования «Команда» и наследуют интерфейс VCommand, в котором указаны базовые функции для отмены и возврата информации.

Классы VisualSystem, VisualLease, VisualNode разработаны для отображения географической информации об объектах (рис. 7), абстрагированы от расчетного модуля и хранят только важную для отображения информацию, позицию и тип объекта.

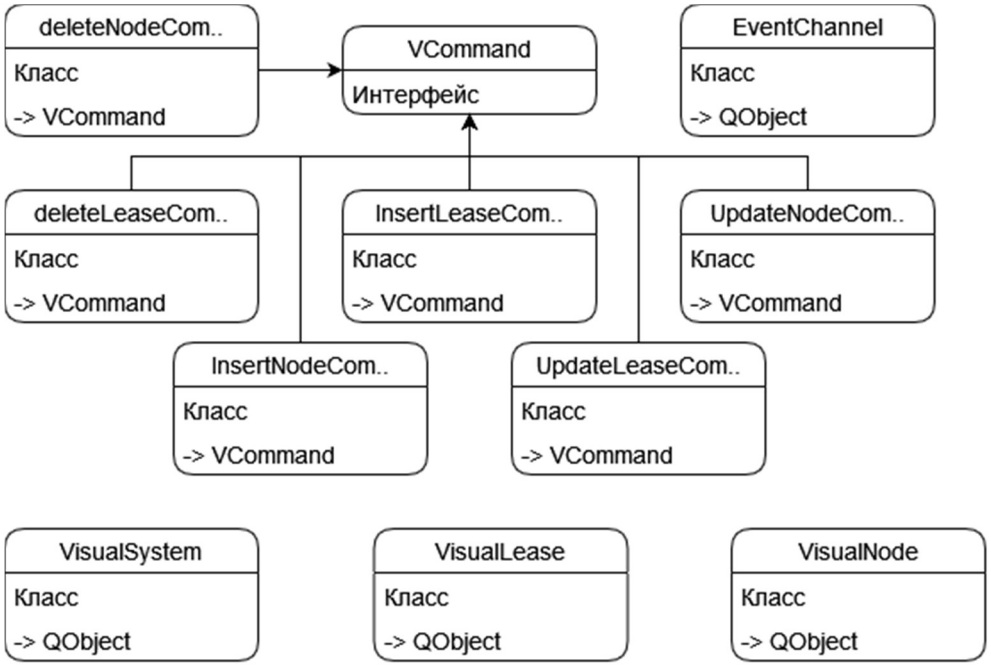


Рис. 7. Диаграмма классов, соответствующая топологической модели метасистемы

Fig. 7. Class diagram corresponding to the topological model of the metasystem

Предлагаемая структура реляционной базы данных, показанная на рис. 8, отражает явное разделение моделирования СЭ на топологическую и функциональную составляющие.

Список справочников базы данных, необходимых для создания топологической модели, включает в себя:

- справочник всех узлов, содержащий их уникальные коды, названия, географические координаты;
- справочник участков трубопроводов с информацией о начальных и конечных узлах, уникальным кодом и датой ввода в эксплуатацию.

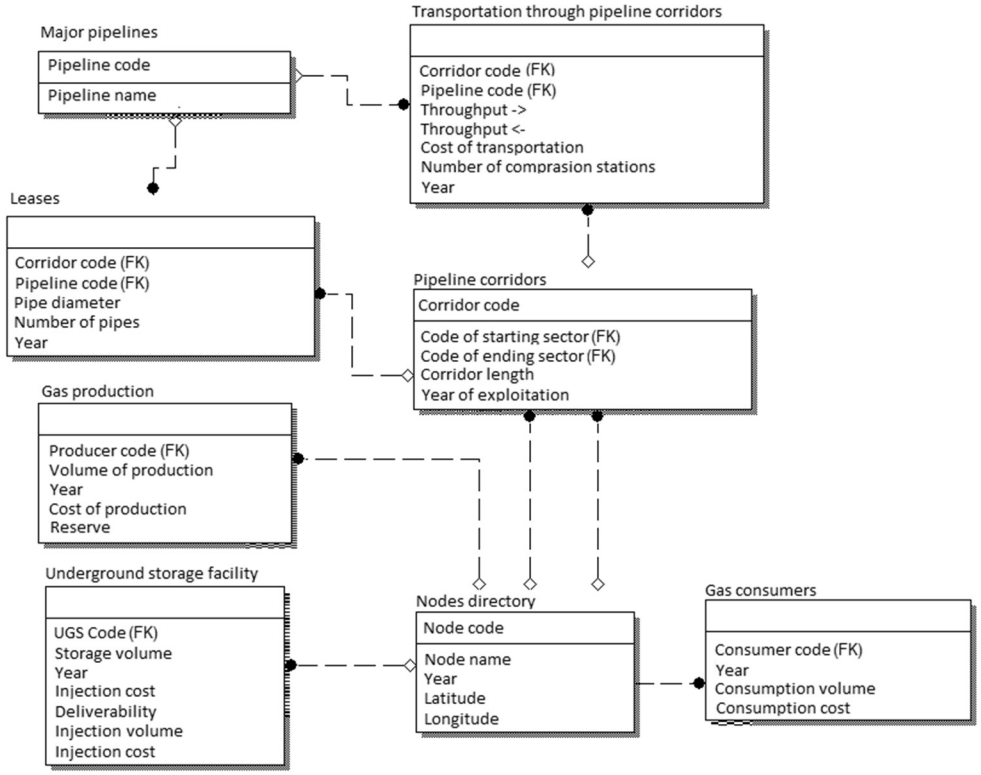


Рис. 8. Структура реляционной базы данных

Fig. 8. The relational database structure

Для создания функциональной модели необходимы следующие справочники:

- справочник трубопроводов;
- справочники потребителей, производителей и подземных хранилищ газа с их функциональными характеристиками;
- справочник пропускных способностей участков трубопроводов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной целью изменения программно-вычислительного комплекса «Нефть и газ России» является внедрение нового подхода к комплексному анализу уязвимости СЭ. Новый подход обеспечивает:

- рассмотрение взаимосвязей разных типов;
- возможность количественной оценки уязвимости с нескольких точек зрения;
- универсальность по отношению к различным классам возмущений и разным уровням территориальной и технологической иерархии.

Модификация комплекса «Нефть и газ России» заключается в основном в переходе на новую архитектуру типа «модель – вид – контроллер». Такая архитектура разделяет программу на три отдельных компонента и позволяет модифицировать их независимо друг от друга.

Помимо перехода на новую архитектуру, также предлагается внедрение одной из современных компактных реляционных систем управления базами данных, так как используемая в настоящее время система является морально устаревшей.

Таким образом, предлагаемые изменения комплекса «Нефть и газ России» позволят перейти в исследовании живучести от моделирования отдельных СЭ к топливно-энергетическому комплексу страны в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основные методические принципы исследования и обеспечения живучести систем энергетики / Н.И. Воропай, Л.Д. Криворуцкий, Ю.Н. Руденко, И.А. Шер // Методы и модели исследования живучести систем энергетики / отв. ред. Ю.Н. Руденко. – Новосибирск: Наука, 1990. – С. 9–17.

2. *Voropai N., Rehtanz C.* Flexibility and resiliency of electric power systems: analysis of definitions and content // EPJ Web of Conferences. – 2019. – Vol. 217. – P. 1018.

3. *Воропай Н.И.* Направления и проблемы трансформации электроэнергетических систем // Электричество. – 2020. – № 7. – С. 12–21.

4. A review on resilience assessment of energy systems / P. Gasser, P. Lustenberger, M. Cinelli, W. Kim, M. Spada, P. Burgherr, S. Hirschberg, B. Stojadinović, T.Y. Sun // Sustainable and Resilient Infrastructure. – 2021. – Vol. 6 (5). – P. 273–299.

5. System resilience enhancement: Smart grid and beyond / G. Huang, J. Wang, C. Chen, C. Guo, B. Zhu // Frontiers of Engineering Management. – 2017. – Vol. 4 (3). – P. 271–282.

6. Multi-phase assessment and adaptation of power systems resilience to natural hazards / S. Espinoza, M. Panteli, P. Mancarella, H. Rudnick // Electric Power Systems Research. – 2016. – Vol. 136. – P. 352–361.

7. Metrics for energy resilience / P.E. Roege, Z.A. Collier, J. Mancillas, J.A. McDonagh, I. Linkov // Energy Policy. – 2014. – Vol. 72. – P. 249–256.

8. *Hussain A., Bui V.H., Kim H.M.* Microgrids as a resilience resource and strategies used by microgrids for enhancing resilience // Applied Energy. – 2019. – Vol. 240. – P. 56–72.

9. Resilience: theory and application / J.L. Carlson, R.A. Haffenden, G.W. Bassett, W.A. Buehring, M.J. Collins III, S.M. Folga, F.D. Petit, J.A. Phillips, D.R. Verner, R.G. Whitfield. – Argonne, IL, 2012. – (Argonne National Laboratory; ANL/DIS-12-1). – 60 p.

10. *Hosseini S., Barker K., Ramirez-Marquez J.E.* A review of definitions and measures of system resilience // Reliability Engineering and System Safety. – 2016. – Vol. 145. – P. 47–61.

11. Resilience in transportation systems: a systematic review and future directions / C. Wan, Z. Yang, D. Zhang, X. Yan, S. Fan // Transport Reviews. – 2018. – Vol. 38 (4). – P. 479–498.

12. Battling the extreme: a study on the power system resilience / Z. Bie, Y. Lin, G. Li, F. Li // Proceedings of the IEEE. – 2017. – Vol. 105, N 7. – P. 1253–1266.

13. *Sharifi A., Yamagata Y.* Principles and criteria for assessing urban energy resilience: a literature review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – Vol. 60. – P. 1654–1677.

14. *Lin Y., Bie Z., Qiu A.* A review of key strategies in realizing power system resilience // Global Energy Interconnection. – 2018. – Vol. 1 (1). – P. 70–78.

15. *Johansson J., Hassel H.* An approach for modelling interdependent infrastructures in the context of vulnerability analysis // Reliability Engineering and System Safety. – 2010. – Vol. 95 (12). – P. 1335–1344.

16. *Zio E.* Challenges in the vulnerability and risk analysis of critical infrastructures // Reliability Engineering and System Safety. – 2016. – Vol. 152. – P. 137–150.

17. Toward a consensus on the definition and taxonomy of power system resilience / A. Gholami, T. Shekari, M.H. Amirioun, F. Aminifar, M.H. Amini, A. Sargolzaei // IEEE Access. – 2018. – Vol. 6. – P. 32035–32053.

18. Иерархическое моделирование систем энергетики / под. ред. Н.И. Воропая, В.А. Стенникова. – Новосибирск: Гео, 2020. – 314 с.

19. *Jufri F.H., Widiputra V., Jung J.* State-of-the-art review on power grid resilience to extreme weather events: definitions, frameworks, quantitative assessment methodologies, and enhancement strategies // Applied Energy. – 2019. – Vol. 239. – P. 1049–1065.

20. *Jonsson H., Johansson J., Johansson H.* Identifying critical components in technical infrastructure networks // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Pt. O: Journal of Risk and Reliability. – 2008. – Vol. 222 (2). – P. 235–243.

21. *Hausken K.* Defence and attack of complex interdependent systems // Journal of the Operational Research Society. – 2019. – Vol. 70 (3). – P. 364–376.

22. A review of the measures to enhance power systems resilience / M. Mahzarnia, M.P. Moghaddam, P.T. Baboli, P. Siano // IEEE Systems Journal. – 2020. – Vol. 14 (3). – P. 4059–4070. – DOI: 10.1109/JSYST.2020.2965993.

23. Надежность систем энергетики и их оборудования. В 4 т. Т. 1. Справочник по общим моделям анализа и синтеза надежности систем энергетики / под ред. Ю.Н. Руденко. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 480 с.

24. *Sperstad I.B., Kjølle G.H., Gjerde O.* A comprehensive framework for vulnerability analysis of extraordinary events in power systems // Reliability Engineering and System Safety. – 2020. – Vol. 196. – P. 106788.

25. *Panteli M., Mancarella P.* The grid: Stronger, bigger, smarter? Presenting a conceptual framework of power system resilience // IEEE Power and Energy Magazine. – 2015. – Vol. 13 (3). – P. 58–66.

26. *Han F., Zio E.* A multi-perspective framework of analysis of critical infrastructures with respect to supply service, controllability and topology // International Journal of Critical Infrastructure Protection. – 2019. – Vol. 24. – P. 1–13.

27. Resilient critical infrastructure planning under disruptions considering recovery scheduling / Y. Fang, C. Fang, E. Zio, M. Xie // IEEE Transactions on Engineering Management, Institute of Electrical and Electronics Engineers. – 2019. – Vol. 68 (2). – P. 452–466.

28. *Ouyang M., Fang Y.* A mathematical framework to optimize critical infrastructure resilience against intentional attacks // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. – 2017. – Vol. 32 (11). – P. 909–929.

29. *Fang Y., Zio E.* Resilience management of infrastructure systems from a multistage decision making perspective // 29th European Safety and Reliability Conference (ESREL2019). – Hannover, Germany, 2019. – P. 3382–3389. – DOI: 10.3850/978-981-11-2724-3.

30. *Edelev A.V., Zorkaltsev V.I.* An algorithm for determining optimal and suboptimal trajectories of the development of a system // Journal of Applied and Industrial Mathematics. – 2019. – Vol. 13 (1). – P. 36–42.

31. Поддержка управления живучестью систем энергетики на основе комбинаторного подхода / И.В. Бычков, С.А. Горский, А.В. Еделев, Р.О. Костромин, И.А. Сидоров, А.Г. Феоктистов, Е.С. Фереферов, Р.К. Федоров // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2021. – № 6. – С. 122–135.

32. *Еделев А.В., Сендеров С.М., Пяткова Н.И.* Применение геоинформационных технологий для исследования проблем энергетической безопасности // Проблемы управления. – 2015. – № 2. – С. 68–74.

33. *Scholz Y.* Renewable energy based electricity supply at low costs: development of the remix model and application for Europe: PhD Dissertation / Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik der Universität Stuttgart. – Stuttgart, 2012. – 181 p. – URL: http://elib.dlr.de/77976/1/REMix_Thesis_YS.pdf (accessed: 11.02.2022).

34. *Edelev A., Fereferov E.S.* A software platform to support the energy system resilience study // CEUR Workshop Proceedings. – 2020. – Vol. 2638. – P. 79–88.

35. *Edelev A.V., Fereferov E.S., Khmelnov A.E.* Workbench for vulnerability analysis of Vietnam energy sector // CEUR Workshop Proceedings. – 2020. – Vol. 2677. – P. 23–35.

36. *Воробьев С.В., Еделев А.В.* Особенности математического моделирования при распределении излишков газа в Единой системе газоснабжения России // Научный вестник НГТУ. – 2016. – № 1 (62). – С. 181–194. – DOI: 10.17212/1814-1196-2016-1-181-194.

37. *Клименко С.М., Сендеров С.М., Янченко В.А.* Исследование проблем повышения устойчивости и экологической безопасности магистральных нефте- и нефтепродуктопроводов // Новые информационные технологии управления развитием и функционированием трубопроводных систем энергетики. – Иркутск: СЭИ СО РАН, 1993. – С. 119–127.

38. *Еделев А.В., Сендеров С.М.* Интегрированная инструментальная среда ПВК «Нефть и газ России» // Информационные технологии в энергетике: современные подходы к анализу и обработке информации: труды Всероссийского семинара. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2000. – С. 165–169.

39. Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений / Г. Буч, Р.А. Максимчук, М.У. Энгл, Б.Дж. Янг, Д. Коналлен, К.А. Хьюстон. – 3-е изд. – М.: Вильямс, 2008. – 720 с.

40. The Software Architecture Chronicles. – URL: https://herbertograca.com/2017/07/03/the-software-architecture-chronicles/ (accessed: 17.02.2022).

41. *McConnell S.* Code complete. – 2nd ed. – Redmond, WA: Microsoft Press, 2004. – 960 p.

42. *Баранов В.* Иерархия принципов проектирования, или самые важные слова для инженеров. – URL: https://habr.com/ru/post/169487/ (дата обращения: 17.02.2022).

43. *Raymond E.S.* The Unix philosophy in one lesson // Raymond E.S. The Art of Unix Programming. – Addison-Wesley, 2003. – ISBN 0-13-142901-9.

44. *Hunt A., Thomas D.* The pragmatic programmer: from journeyman to master. – 1st ed. – Reading, MA: Addison-Wesley, 1999. – 320 p. – ISBN 978-0201616224.

45. *Переверза Д.* TDDx2, BDD, DDD, FDD, MDD и PDD, или все, что вы хотите узнать о Driven Development. – URL: https://habr.com/ru/post/459620 (дата обращения: 17.02.2022).

46. Design patterns: elements of reusable object-oriented software / E. Gamma, R. Helm, R. Johnson, J.M. Vlissides. – Reading, MA: Addison-Wesley, 1995. – 395 p.

47. *Рогачев С.* Обобщенный Model-View-Controller. – URL: http://rsdn.org/article/patterns/generic-mvc.xml (дата обращения: 17.02.2022).

48. *Мартин Р.К., Ньюкирк Д.В., Косс Р.С.* Быстрая разработка программ: принципы, примеры, практика. – М.: Вильямс, 2004. – 744 с.

Данилов Глеб Константинович, инженер-исследователь лаборатории живучести систем энергетики Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук. Основное направление научных исследований – математическое моделирование, оптимизация, параллельные вычисления. E-mail: dangleb@isem.irk.ru

Еделев Алексей Владимирович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории живучести систем энергетики Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук. Основное направление научных исследований – исследование живучести топливно-энергетического комплекса. Имеет более 45 печатных работ. E-mail: flower@isem.irk.ru

Danilov Gleb K., research engineer in the laboratory of energy system resilience, the Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. His research interests are currently focused on mathematical modeling, optimization methods and parallel computing. E-mail: dangleb@isem.irk.ru

Edelev Aleksey V., PhD (Eng.), Senior Researcher in the laboratory of energy system resilience, Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. His research interests are currently focused on the energy system resilience. He is the author of more than 45 publications. E-mail: flower@isem.irk.ru

DOI: 10.17212/2782-2001-2022-1-41-58

Development of a geographic information system to study the resilience of energy systems[*]

G.K. DANILOV [a], *A.V. EDELEV* [b]

Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 130 Lermontov Street, Irkutsk, 664033, Russian Federation

[a] *dangleb@isem.irk.ru* [b] *flower@isem.irk.ru*

Abstract

This article describes the reasons for creating a toolkit to study the energy system resilience using the capabilities of GIS technologies using the example of the Oil and Gas of Russia software package. A metamathematical model of the system and its division into main components, namely, topological and functional is described where the structural model reflects the topology of the power network in the form of a grap, and the functional model evaluates the performance taking into account both topological capabilities and functional constraints. Examples of the use of geographic information systems to aid in survivability research and the description of the requirements for developing tools for a new metamathematical model are considered. The architecture of the current "Oil and Gas of Russia" version, its features and problems that influenced the development of the new toolkit are described. The reasons for the use and features of the QT API during the development of the toolkit are given.

The new toolkit assumes the use of the Model-View-Controller architecture, which allows you to modify each component independently of the other. This architecture also helps to decouple the topological and functional components by encapsulating the topological model in the form of a separate graph, and to use a controller to communicate with the functional component. This makes it possible to use different types of functional models without the need to change the topological model. Each functional model uses its own controller which sets complex of the country as a whole.

Keywords: Energy system, resilience, vulnerability, geographic information system, database, graphical user interface, software and computing complex, mathematical model up its own data flow. Thus, the proposed changes to the "Oil and Gas of Russia" complex will make it possible to move in the study of resilience from modeling individual power plants to the fuel and energy

REFERENCES

1. Voropai N.I., Krivorutskii L.D., Rudenko Yu.N., Sher I.A. Osnovnye metodicheskie printsipy issledovaniya i obespecheniya zhivuchesti sistem energetiki [Basic methodological principles of research and ensuring the survivability of energy systems]. *Metody i modeli issledovaniya zhivuchesti sistem energetiki* [Methods and models of research vitality energy systems]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1990, pp. 9–17.

2. Voropai N., Rehtanz C. Flexibility and resiliency of electric power systems: analysis of definitions and content. *EPJ Web of Conferences*, 2019, vol. 217, p. 1018.

3. Voropay N.I. Napravleniya i problemy transformatsii elektroenergeticheskikh sistem [Prospects and problems of electric power system transformations]. *Elektrichestvo = Electrical Technology Russia*, 2020, no. 7, pp. 12–21. (In Russian).

[*] *Received 31 May 2021.*

The research was carried out under State Assignment Project no. FWEU-2021-0003 (reg. no. AAAA-A21-121012090014-5) of the Fundamental Research Program of Russian Federation 2021-2030 using the resources of the High-Temperature Circuit Multi-Access Research Center (Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project no 13.CKP.21.0038).

4. Gasser P., Lustenberger P., Cinelli M., Kim W., Spada M., Burgherr P., Hirschberg S., Stojadinovic B., Sun T.Y. A review on resilience assessment of energy systems. *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 2021, vol. 6 (5), pp. 273–299.

5. Huang G., Wang J., Chen C., Guo C., Zhu B. System resilience enhancement: Smart grid and beyond. *Frontiers of Engineering Management*, 2017, vol. 4 (3), pp. 271–282.

6. Espinoza S., Panteli M., Mancarella P., Rudnick H. Multi-phase assessment and adaptation of power systems resilience to natural hazards. *Electric Power Systems Research*, 2016, vol. 136, pp. 352–361.

7. Roege P.E., Collier Z.A., Mancillas J., McDonagh J.A., Linkov I. Metrics for energy resilience. *Energy Policy*, 2014, vol. 72, pp. 249–256.

8. Hussain A., Bui V.H., Kim H.M. Microgrids as a resilience resource and strategies used by microgrids for enhancing resilience. *Applied Energy*, 2019, vol. 240, pp. 56–72.

9. Carlson J.L., Haffenden R.A., Bassett G.W., Buehring W.A., Collins M.J. III, Folga S.M., Petit F.D., Phillips J.A., Verner D.R., Whitfield R.G. *Resilience: theory and application*. Argonne National Laboratory, ANL/DIS-12-1. Argonne, IL, 2012. 60 p.

10. Hosseini S., Barker K., Ramirez-Marquez J.E. A review of definitions and measures of system resilience. *Reliability Engineering and System Safety*, 2016, vol. 145, pp. 47–61.

11. Wan C., Yang Z., Zhang D., Yan X., Fan S. Resilience in transportation systems: a systematic review and future directions. *Transport Reviews*, 2018, vol. 38 (4), PP. 479–498.

12. Bie Z., Lin Y., Li G., Li F. Battling the extreme: a study on the power system resilience. *Proceedings of the IEEE*, 2017, vol. 105, no. 7, pp. 1253–1266.

13. Sharifi A., Yamagata Y. Principles and criteria for assessing urban energy resilience: a literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 60, pp. 1654–1677.

14. Lin Y., Bie Z., Qiu A. A review of key strategies in realizing power system resilience. *Global Energy Interconnection*, 2018, vol. 1 (1), pp. 70–78.

15. Johansson J., Hassel H. An approach for modelling interdependent infrastructures in the context of vulnerability analysis. *Reliability Engineering and System Safety*, 2010, vol. 95 (12), pp. 1335–1344.

16. Zio E. Challenges in the vulnerability and risk analysis of critical infrastructures. *Reliability Engineering and System Safety*, 2016, vol. 152, pp. 137–150.

17. Gholami A., Shekari T., Amirioun M.H., Aminifar F., Amini M.H., Sargolzaei A. Toward a consensus on the definition and taxonomy of power system resilience. *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 32035–32053.

18. Voropai N.I., Stennikov V.A., eds. *Ierarkhicheskoe modelirovanie sistem energetiki* [Hierarchical modeling of energy systems]. Novosibirsk, Geo Publ., 2020. 314 p.

19. Jufri F.H., Widiputra V., Jung J. State-of-the-art review on power grid resilience to extreme weather events: definitions, frameworks, quantitative assessment methodologies, and enhancement strategies. *Applied Energy*, 20149, vol. 239, pp. 1049–1065.

20. Jonsson H., Johansson J., Johansson H. Identifying critical components in technical infrastructure networks. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Pt. O: Journal of Risk and Reliability*, 2008, vol. 222 (2), pp. 235–243.

21. Hausken K. Defence and attack of complex interdependent systems. *Journal of the Operational Research Society*, 2019, vol. 70 (3), pp. 364–376.

22. Mahzarnia M., Moghaddam M.P., Baboli P.T., Siano P. A review of the measures to enhance power systems resilience. *IEEE Systems Journal*, 2020, vol. 14 (3), pp. 4059–4070. DOI: 10.1109/JSYST.2020.2965993.

23. Rudenko Yu.N., ed. *Nadezhnost' sistem energetiki i ikh oborudovaniya*. V 4 t. T. 1 [Reliability of energy systems and their equipment. Vol. 1]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1994. 480 p.

24. Sperstad I.B., Kjølle G.H., Gjerde O. A comprehensive framework for vulnerability analysis of extraordinary events in power systems. *Reliability Engineering and System Safety*, 2020, vol. 196, p. 106788.

25. Panteli M., Mancarella P. The grid: Stronger, bigger, smarter? Presenting a conceptual framework of power system resilience. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2015, vol. 13 (3), pp. 58–66.

26. Han F., Zio E. A multi-perspective framework of analysis of critical infrastructures with respect to supply service, controllability and topology. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 2019, vol. 24, pp. 1–13.

27. Fang Y., Fang C., Zio E., Xie M. Resilient critical infrastructure planning under disruptions considering recovery scheduling. *IEEE Transactions on Engineering Management, Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 2019, vol. 68 (2), pp. 452–466.

28. Ouyang M., Fang Y. A mathematical framework to optimize critical infrastructure resilience against intentional attacks. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2017, vol. 32 (11), pp. 909–929.

29. Fang Y., Zio E. Resilience management of infrastructure systems from a multistage decision making perspective. *29th European Safety and Reliability Conference (ESREL2019)*, Hannover, Germany, 2019, pp. 3382–3389. DOI: 10.3850/978-981-11-2724-3.

30. Edelev A.V., Zorkaltsev V.I. An algorithm for determining optimal and suboptimal trajectories of the development of a system. *Journal of Applied and Industrial Mathematics*, 2019, vol. 13 (1), pp. 36–42.

31. Bychkov I.V., Gorsky S.A., Edelev A.V., Kostromin R.O., Sidorov I.A., Feoktistov A.G., E.S. Fereferov A.G., Fedorov R.K. Support for managing the survivability of energy systems based on a combinatorial approach. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2021, vol. 60, no. 6, pp. 981–994. Translated from *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya*, 2021, no. 6, pp. 122–135.

32. Edelev A.V., Senderov S.M., Pyatkova N.I. Primenenie geoinformatsionnykh tekhnologii dlya issledovaniya problem energeticheskoi bezopasnosti [Application of geoinformation technologies for the study of energy security problems]. *Problemy upravleniya = Control Sciences*, 2015, no. 2, pp. 68–74.

33. Scholz Y. *Renewable energy based electricity supply at low costs: development of the remix model and application for Europe*: PhD Dissertation. Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik der Universität Stuttgart, 2012. 181 p. Available at: http://elib.dlr.de/77976/1/REMix_Thesis_YS.pdf (accessed 11.02.2022).

34. Edelev A., Fereferov E.S. A software platform to support the energy system resilience study. *CEUR Workshop Proceedings*, 2020, vol. 2638, pp. 79–88.

35. Edelev A.V., Fereferov E.S., Khmelnov A.E. Workbench for vulnerability analysis of Vietnam energy sector. *CEUR Workshop Proceedings*, 2020, vol. 2677, pp. 23–35.

36. Vorob'ev S.V., Edelev A.V. Osobennosti matematicheskogo modelirovaniya pri raspredelenii izlishkov gaza v Edinoi sisteme gazosnabzheniya Rossii [Features of mathematical modeling in the distribution of natural gas excess in the Russian Unified Gas Supply System]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 62, pp. 181–194. DOI: 10.17212/1814-1196-2016-1-181-194.

37. Klimenko S.M., Senderov S.M., Yanchenko V.A. Issledovanie problem povysheniya ustoichivosti i ekologicheskoi bezopasnosti magistral'nykh nefte- i nefteproduktoprovodov [Study of the problems of increasing the sustainability and environmental safety of oil and oil product pipelines]. *Novye informatsionnye tekhnologii upravleniya razvitiem i funktsionirovaniem truboprovodnykh sistem energetiki* [New information technologies for managing the development and functioning of energy pipeline systems]. Irkutsk, SEI SB RAS Publ., 1993, pp. 119–127.

38. Edelev A.V., Senderov S.M. [Integrated instrumental environment PVK "Oil and Gas of Russia"]. *Informatsionnye tekhnologii v energetike: sovremennye podkhody k analizu i obrabotke informatsii*: trudy Vserossiiskogo seminara [Proceedings of the All-Russian Seminar ”Information technology in energy: modern approaches to the analysis and processing of information”]. Irkutsk, 2000, pp. 165–169. (In Russian).

39. Booch G., Maksimchuk R.A., Engle M.W., Young B.J., Conallen J., Houston K.A. *Object-oriented analysis and design with application*. 3rd ed. Addison-Wesley, 2007 (Russ. ed.: *Ob"ektno-orientirovannyi analiz i proektirovanie s primerami prilozhenii*. 3rd ed. Moscow, Williams, 2008. 720 p.).

40. *The Software Architecture Chronicles*. Available at: https://herber-tograca.com/2017/07/03/the-software-architecture-chronicles/ (accessed 17.02.2022).

41. McConnell S. *Code complete*. 2nd ed. Redmond, WA, Microsoft Press, 2004. 960 p.

42. Baranov V. *Ierarkhiya printsipov proektirovaniya, ili samye vazhnye slova dlya inzhenerov* [Hierarchy of design principles, or the most important words for engineers]. Available at: https://habr.com/ru/post/169487/ (accessed 17.02.2022).

43. Raymond E.S. The Unix philosophy in one lesson. Raymond E.S. *The Art of Unix Programming*. Addison-Wesley, 2003. ISBN 0-13-142901-9.

44. Hunt A., Thomas D. *The pragmatic programmer: from journeyman to master*. 1st ed. Reading, MA, Addison-Wesley, 1999. 320 p. ISBN 978-0201616224.

45. Pereverza D. *TDDx2, BDD, DDD, FDD, MDD i PDD, ili vse, chto vy khotite uznat' o Driven Development* [TDDx2, BDD, DDD, FDD, MDD and PDD, or whatever you want to know about Driven Development]. Available at: https://habr.com/ru/post/459620 (accessed 17.02.2022).

46. Gamma E., Helm R., Johnson R., Vlissides J.M. *Design patterns: elements of reusable object-oriented software*. Reading, MA, Addison-Wesley, 1995. 395 p.

47. Rogachev S. *Obobshchennyi Model-View-Controller* [Generalized Model-View-Controller]. Available at: http://rsdn.org/article/patterns/generic-mvc.xml (accessed 17.02.2022).

48. Martin R.C. *Agile software development: principles, patterns, and practices*. With contrib. by J.W. Newkirk, R.S. Koss. Upper Saddle River, NJ, Pearson, 2002 (Russ. ed.: Martin R.K., N'yukirk D.V., Koss R.S. *Bystraya razrabotka programm: printsipy, primery, praktika*. Moscow, Williams Publ., 2004. 744 p.).

Для цитирования:

Данилов Г.К.., Еделев А.В. Разработка геоинформационной системы для исследования живучести систем энергетики // Системы анализа и обработки данных. – 2022. – № 1 (85). – С. 41–58. – DOI: 10.17212/2782-2001-2022-1-41-58.

For citation:

Danilov G.K., Edelev A.V. Razrabotka geoinformatsionnoi sistemy dlya issledovaniya zhivuchesti sistem energetiki [Development of a geographic information system to study the resilience of energy systems]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2022, no. 1 (85), pp. 41–58. DOI: 10.17212/2782-2001-2022-1-41-58.

ISSN 2782-2001
Системы анализа
и обработки данных
том 85, № 1, 2022, с. 59–72

http://journals.nstu.ru/vestnik
Analysis and data
processing systems
Vol. 85, No. 1, 2022, pp. 59–72

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND MANAGEMENT

УДК 004.415.2

DOI: 10.17212/2782-2001-2022-1-59-72

Заключительные этапы проектирования системы сбора и предиктивного анализа данных социальных медиа*

И.С. КАЛЫТЮК[a], Г.А. ФРАНЦУЗОВА[b], А.В. ГУНЬКО[c]

630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет

[a] *ivankalytyuk@yandex.ru* [b] *frants@ac.cs.nstu.ru* [c] *gun@ait.cs.nstu.ru*

В настоящей статье рассматривается проектирование системы сбора и предиктивного анализа социальных медиа. По мере развития сети Интернет и социальных медиа более простым стал доступ к информации и ее распространение, ведь сами пользователи сети являются одновременно создателями и получателями различной информации. Основная разновидность социальных медиа – социальные сети. Из наиболее известных можно выделить следующие: Facebook, VK, Instagram, YouTube, Twitter, «Одноклассники», а также мессенджеры WhatsApp, Telegram. Важнейшие функции социальных медиа – влияние на восприятие, отношение и конечное поведение потребителей.

В основе предиктивной аналитики лежит автоматический поиск связей, аномалий и закономерностей между различными факторами. Для формирования прогнозной модели используется большой набор статистических методов моделирования, интеллектуальный анализ данных, машинное обучение, нейронные сети и другие механизмы. В совокупности с различными методами сбора информации с интернет-ресурсов, таких как парсинг и API социальных сетей, предиктивная аналитика может предлагать наиболее интересные для пользователя источники информации. Для того чтобы объединить методы предиктивного анализа и методы сбора данных, требуется подробно отнестись к процессу проектирования системы.

В работе особое внимание обращено на подробное описание второй из основных частей системы (подсистемы анализа). Помимо этого, выделены полная архитектура и алгоритм функционирования. Полученные результаты будут в полном объеме использоваться при дальнейшей разработке. Работа над данной темой позволит облегчить процесс последующего тестирования и исследования системы.

Ключевые слова: социальные медиа, предиктивный анализ, проектирование системы, архитектура, алгоритм функционирования, анализ данных, API, парсинг

* *Статья получена 22 июля 2021 г.*

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что Интернет на сегодняшний момент – крупнейшая база данных во всем мире. Социальные сети являются одним из основных источников информации в Интернете [1]. Сами пользователи являются создателями контента, который доступен и прочим людям. Так как пользователей соцсетей достаточно много, образуется огромный массив различной информации – это открывает возможности для исследований в разных областях науки.

В связи с этим важное значение приобретает анализ размещенной в социальных сетях информации и возможность прогнозирования будущих событий. К сожалению, методы предиктивной аналитики на сегодня развиты не так сильно [2]. На основании этого очевидна актуальность применения данных методов в области анализа данных социальных медиа.

Целью настоящей работы является проектирование подсистемы анализа системы сбора и предиктивного анализа данных социальных медиа, а также разработка подробного алгоритма ее функционирования. Ранее в работе [3] рассматривалось подробное проектирование подсистемы сбора.

Для того чтобы описать алгоритм функционирования системы максимально подробно, требуется выделить основные модули подсистемы анализа. Основной проблемой при проектировании данной подсистемы можно назвать связи между модулями. Следует достаточно четко понимать, как части подсистемы взаимодействуют между собой, какие вычисления и методы производятся в ней.

Структура работы следующая: в первом и втором разделах представлены постановка задачи и структура подсистемы анализа. Подзадачи, которые решает подсистема анализа, описаны в разделах 3, 4 и 5. Алгоритм функционирования и архитектура подсистемы представлены в разделе 6. Полный алгоритм функционирования и архитектура всей системы описаны в разделе 7.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Необходимо разработать эффективную подсистему анализа. Целью функционирования подсистемы (как заключительной части целой системы) является представление пользователю интернет-источников, которые могут быть ему интересны в будущем по настоящим данным.

В подсистеме анализа при помощи алгоритмов кластеризации выделяется определенная часть ресурсов. Так как процесс кластеризации является основой подсистемы, к ней предъявляются следующие требования:

– определение повторяющихся ресурсов, переданных из подсистемы сбора;
– вычисление количества кластеров, которое должно получиться;
– выделение характеристик, по которым проводится кластеризация;
– структуризация характеристик кластеризации;
– нормализация характеристик кластеризации;
– вычисление центров кластеров;
– ограничение числа результатов.

Для достижения поставленной цели с учетом предъявляемых требований общую задачу разделим на ряд подзадач:

1) определение числа кластеров;

2) определение характеристик кластеризации;

3) определение центров кластеров и желаемых результатов.

В свою очередь, каждой из подзадач соответствуют свои требования из общего перечня. Для определения числа кластеров необходимо определить повторяющиеся ресурсы и только после этого вычислить их количество; для решения второй подзадачи, помимо выделения характеристик для различных типов интернет-ресурсов, требуется структуризировать их и провести нормализацию. Решение третьей подзадачи предполагает определение элементов, которые будут являться центрами кластеров, и ограничение числа результатов.

2. СТРУКТУРА ПОДСИСТЕМЫ АНАЛИЗА

Схематично подсистема анализа с выделенными подзадачами представлена на рис. 1.

Рис. 1. Схематичное представление постановки задачи

Fig. 1. A schematic representation of the problem statement

До того как перейти непосредственно к подсистеме анализа, рассмотрим работу модуля ввода параметров. Как было сказано в [3], после сбора пользователь принимает решение, каким образом будет проводиться предиктивный анализ. Эти данные вводятся в промежуточном модуле (ввод параметров анализа). Он выполняет следующие функции:

– выбор количества желаемых результатов;

– выбор ресурсов, по которым производится анализ.

Для первого параметра количество задается в числовом виде либо не ограничивается. Если ограничений нет, результатом будут являться все собранные данные в зависимости от того, какие ресурсы будут выбраны.

Для второго параметра пользователь системы может как проводить анализ сразу по всем данным, так и запустить частную задачу. В этом случае возможен анализ, например, только по известным социальным сетям, по прочим интернет-ресурсам либо же только по определенным сайтам. Данные варианты должны быть доступны в интерфейсе системы. По результатам работы подсистемы сбора формируется общий список ресурсов, который можно разделить

на две части. Первая – социальные сети (данные, полученные через их API) и вторая – прочие ресурсы (данные, полученные при помощи парсинга).

Выделим следующие части подсистемы анализа:

– модуль вычислений;

– модуль сбора характеристик кластеризации;

– модуль кластеризации.

Рассмотрим решение каждой из заявленных выше подзадач отдельно.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛА КЛАСТЕРОВ

При выборе параметров анализа пользователь системы указывает количество желаемых результатов. После сбора данных известно количество ресурсов, по которым проводится анализ. Учитывая это, количество кластеров будет равно количеству всех ресурсов, деленному на желаемое [4].

Однако сначала модулю вычислений необходимо провести нормализацию данных. Анализируется, нет ли повторяющихся интернет-ресурсов или сообществ в социальных сетях. Если в одном сообществе есть два упоминания, то оно должно рассматриваться один раз, но с наибольшим приоритетом (реализация будет описана ниже, после определения характеристики для кластеризации).

Учитывая повторяющиеся ресурсы, получаем следующую формулу определения числа кластеров:

$$k = \frac{A}{B}, \tag{1}$$

где A – количество результатов, полученное при сборе данных (с вычтенным числом повторений); B – количество желаемых результатов, заданное пользователем; k – число кластеров.

Количество кластеров, получаемое после использования формулы (1), не всегда будет равным целому числу. При дробной части, равной или большей, чем 0.5, задавать количество кластеров равным целой части $k + 1$ (округление в большую сторону). В противоположном случае количество кластеров принимается равным целой части k.

Используя это решение, можно столкнуться с некоторыми трудностями. Например, если будет 90 полученных при сборе результатов и задано 20 желаемых, $k = 4.5$, то это приведет систему к нахождению пяти кластеров. Можно предположить, что в каждом кластере будет примерно по 18 элементов, что не соответствует параметрам, которые задает пользователь. Это означает, что после первоначальной кластеризации системе необходимо определить, сколько ещё элементов потребуется выделить для представления результатов пользователю. При получении этого результата (в данном случае 2) необходимо разделить на него количество элементов в ближайшем кластере и провести еще одну кластеризацию. Данные используются непосредственно из этого кластера. В сложных ситуациях итерация может повториться еще несколько раз.

Аналогично проводится повторная кластеризация в случае количества данных, которое больше, чем было задано желаемых результатов. Однако операция проводится по получившемуся кластеру. Количество кластеров задается вычитанием количества желаемых результатов из числа уже имеющихся

элементов. Далее количество элементов кластера делится на получившееся число. Такая итерация может повторяться до получения необходимого количества желаемых результатов.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КЛАСТЕРИЗАЦИИ

Когда количество необходимых кластеров определено, следует решить подзадачу характеристик кластеризации. Предполагается, что пользователю будут интересны ресурсы, где наибольшее количество раз встречаются ключевые слова, заданные при начальном поиске. В случае, если ресурсов с одинаковым количеством упоминаний несколько, наибольшее предпочтение отдается тем, которые имеют больший охват. Например, для социальных сетей подсчитывается количество подписчиков пользователя или сообщества. Для интернет-ресурсов, по которым проводится парсинг, определяется число посещений.

В случае социальных сетей для каждого подресурса (сообщество, канал или пользователь) модуль сбора характеристик анализа через API дополнительно получает информацию о количестве подписчиков. В случае обычных ресурсов возможно воспользоваться сторонним программным обеспечением – Яндекс.Метрика [5] или Google Analytics [6]. При помощи этих продуктов возможно определение прямых заходов на сайт и переходов из социальных сетей [7].

Помимо вышеупомянутых программных комплексов, для данной задачи можно использовать и платные сервисы – SimilarWeb, Serpstat, Alexa, Semrush [8] и Ahrefs [9]. Также есть и свободное программное обеспечение, например, ресурс 2*ip* [10]. Возможное применение различных плагинов для браузеров по типу RDS Bar [11]. Собственно, через RDS Bar можно получить рейтинг (без количества пользователей, посетивших сайт) в глобальной сети от Alexa или SemRush. Для задачи анализа только по сторонним интернет-ресурсам этот метод является достаточным.

Однако для общего анализа требуется конкретное количество посетителей, что возвращает нас к использованию других продуктов. Хорошим решением можно назвать онлайн-портал PR-CY [12]. Ресурс бесплатно предоставляет примерное количество посещений задаваемого сайта за день, месяц и год. Данные являются примерными, так как являются средним значением, полученным через вышеупомянутые ресурсы.

Для общего анализа некорректно сравнивать данные количества подписчиков социальных сетей и количества людей, которые посещают определенный сайт. К сожалению, статистика сообществ и каналов в социальных сетях доступна только их владельцам, что не позволяет в полной мере сравнить данные цифры. Возможно лишь предположение о том, что среднее количество посетителей за день примерно равно количеству подписчиков в социальной сети. В целом общая задача для анализа по всем результатам сбора является самой сложной задачей для системы.

Когда количественная характеристика для каждого результата сбора получена и сохранена, следует пересчитать ее для тех ресурсов, в которых должен быть назначен наибольший приоритет. Это просто реализовать, возвращаясь в модуль вычислений с уже известными данными. В случае, если

было два упоминания, количественная характеристика умножается на 2. Аналогично проводится операция и для другого количества упоминаний.

После этого производится нормализация данных. Существует несколько известных методов проведения нормализации кластеризуемых данных.

1. Min-max нормализация. В этом случае какой-либо отрезок (к примеру, от нуля до единицы) заполняется от одной границы к другой. Максимальное и минимальное количественные значения приравниваются к соответствующим значениям отрезка, после чего все остальные числа пересчитываются в его рамках. В итоге все данные имеют определенное значение из данного промежутка.

2. Нормализация стандартным отклонением. Используется приведение уже известного распределения к центрированному (с единичным отклонением).

3. Десятичное масштабирование. Этот метод одинаково смещает точку в десятичных числах. Все данные находятся в окрестности нуля [13].

По итогам рассмотрения этих методов становится понятно, что наиболее подходящими являются первый и третий. Второй метод применяется, если границы не известны. Предлагается использовать в разрабатываемой системе оба метода (min-max нормализацию и десятичное масштабирование).

Характеристика для кластеризации будет использоваться при расчете меры расстояния. Помимо этого, необходимо выбрать центры кластеров.

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕНТРОВ КЛАСТЕРОВ И ЖЕЛАЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из полученных данных для анализа в качестве центров будут выбраны наиболее удаленные значения. Это наибольшее и наименьшее количественные значения, рассчитанные в результате нормализации [14]. Если количество кластеров $k > 2$, определяем количество оставшихся центров кластеров:

$$m = k - 2, \tag{2}$$

где k – число кластеров; m – количество оставшихся центров кластеров.

Первый центр рассчитывается по следующей формуле:

$$n_1 = \frac{A}{m+1}, \tag{3}$$

где m – количество оставшихся центров кластеров; A – количество результатов, полученное при сборе данных (с вычтенным числом повторений); n_i – первый центр кластера.

Целая часть полученного числа становится новым центром (так же и в последующих формулах).

Если $k > 3$ и дробная часть $n_i > 0.5$, следующий центр вычисляется по формуле

$$n_i = n_1 \cdot i + 1, \tag{4}$$

где n_i – первый центр кластера, $i \in [1, m]$, m – количество оставшихся центров кластеров.

Возможно использовать чередование, в котором на каждой нечетной итерации добавляется единица, а на четной – не добавляется.

В случае, если дробная часть $n_i < 0.5$, следующий центр вычисляется по формуле

$$n_i = n_1 \cdot i, \tag{5}$$

где n_i – первый центр кластера, $i \in [1, m]$, m – количество оставшихся центров кластеров.

После нахождения всех центров начинается процесс кластеризации. Используется метод *k*-средних. При его использовании пространство данных разбивается на определяемое заранее количество *k* кластеров. Далее в исходном наборе выбирается количество объектов, равное *k*. Проводится вычисление для каждого из объектов – выбирается наиболее близкий центр. После образования новых кластеров центры пересчитываются и процесс продолжается до момента остановки [15]. Более подробно метод рассматривался в [2].

В результате получаем количество кластеров, соответствующее первоначальным расчетам. Пользователю интересен кластер, который включает в себя наибольшее количественное значение. В случае полного совпадения числа элементов кластера и количества результатов, заданного пользователем, этот кластер является результатом анализа. Если же он больше или меньше, проводится повторная кластеризация по той же процедуре.

6. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ИТОГОВЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ. АЛГОРИТМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И АРХИТЕКТУРА ПОДСИСТЕМЫ

Можно предложить следующий общий вид подсистемы анализа (рис. 2).

Рис. 2. Подсистема анализа

Fig. 2. An analysis subsystem

Модуль вывода результатов анализа представляет итоговые данные пользователю. Показываются ссылки на социальные сети и их подразделы либо же интернет-ресурсы, на которых в будущем возможно появление интересующей его информации. Эти данные пользователь может сохранить в удобном для себя формате. Решено не хранить эту информацию в отдельном модуле, так как каждый процесс анализа с течением времени может выдавать различные результаты. Это сделано по причине того, что охват социальных сетей и интернет-ресурсов постоянно меняется.

Алгоритм работы подсистемы следующий.

1. Полученные при сборе ресурсы анализируются на уникальность модулем вычислений. Уникальные ресурсы получают приоритет $p = 1$. В противном случае выставляется $p > 1$ (в зависимости от количества). Количество кластеров рассчитывается с учетом введенных параметров анализа.

2. Происходит переход в модуль сбора характеристик кластеризации. Характеристики ресурсов для кластеризации собираются с использованием программных комплексов для определения охвата и запросов к API социальных сетей.

3. Производится возврат в модуль вычислений. Количественные характеристики пересчитываются для тех результатов, у которых $p > 1$. Осуществляется нормализация данных.

4. Происходит переход в модуль кластеризации. Кластеризация производится по уникальным ресурсам, будь то сообщество в социальной сети или обычный сайт. Для кластеризации необходимы постоянные обращения к модулю сбора. Итоговое количество результатов сравнивается с запрошенным количеством желаемых. Если данные числа не равны, операция повторяется для текущего или ближайшего кластера, чтобы отбросить или дополнить результаты.

7. АЛГОРИТМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ

Опираясь на ранее спроектированную подсистему сбора [3] и подсистему анализа, опишем полную архитектуру системы (рис. 3).

На рис. 3 X – входные данные для системы; X* – промежуточные данные, полученные в результате сбора; A* – ресурсы, на которых располагаются собранные данные; Y* – выходные данные системы.

Разработан алгоритм функционирования системы. Его блок-схема приведена на рис. 4.

Алгоритм работы системы с комментариями по каждому из блоков 1–19 следующий.

1. Ввод данных на сбор. Ключевые слова вводятся через модуль ввода данных на сбор.

2. Внесение данных в модуль планирования. Введенные ключевые слова вносятся в модуль планирования.

3. Сортировка запросов в модуле задач. Запросы делятся на две группы. Первая группа – запросы к классическим социальным сетям (использование API). Вторая группа – запросы по глобальной сети (использование парсинга). Запросы из первой группы вносятся в модуль очереди задач в первую очередь, далее вносятся запросы из второй группы.

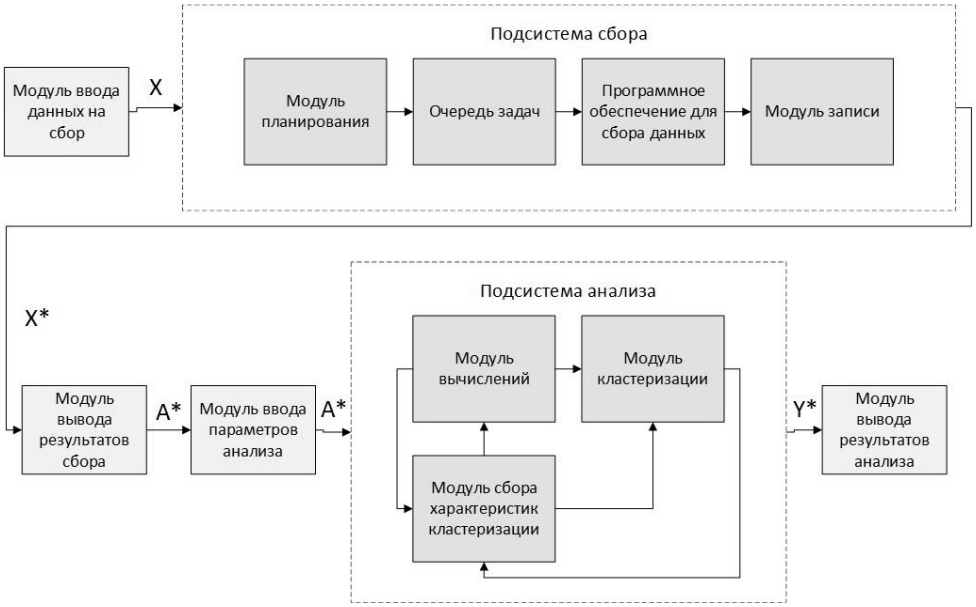


Рис. 3. Архитектура системы

Fig. 3. The system architecture

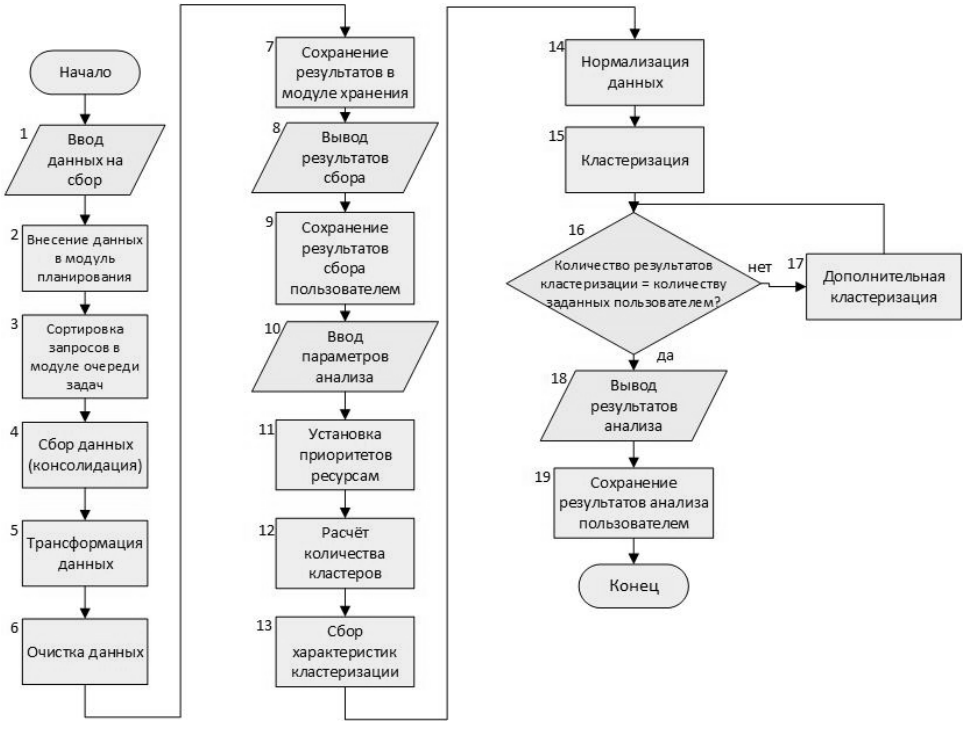


Рис. 4. Блок-схема алгоритма функционирования системы

Fig. 4. Block diagram of the system functioning algorithm

4. Сбор данных (консолидация). Данные собираются с использованием API и парсинга.

5. Трансформация данных. Данные трансформируются к общему списку. Система формирует список групп, каналов, сообществ и пользователей, на чьих страницах в социальных сетях расположена необходимая информация. Также вносятся в список и прочие интернет-ресурсы.

6. Очистка данных. Данные очищаются от информации, которая может быть отброшена (нахождение ботов, удаленных страниц).

7. Сохранение результатов в модуле хранения. Данные сохраняются в системе управления базами данных.

8. Вывод результатов сбора. Результаты представляются через модуль вывода результатов сбора.

9. Сохранение результатов сбора. Полученные результаты сбора сохраняются и выгружаются на локальный компьютер (по желанию пользователя).

10. Ввод параметров анализа. Желаемое количество результатов и желаемые ресурсы вводятся через модуль ввода параметров анализа.

11. Установка приоритетов ресурсам. Полученные при сборе ресурсы анализируются на уникальность. Уникальные ресурсы получают приоритет $p = 1$. В противном случае выставляется $p > 1$ (в зависимости от количества).

12. Расчет количества кластеров. Количество кластеров рассчитывается с учетом введенных параметров анализа.

13. Сбор характеристик кластеризации. Характеристики ресурсов для кластеризации собираются с использованием программных комплексов с целью определения охвата и запросов к API социальных сетей.

14. Нормализация данных. Количественные характеристики пересчитываются для тех результатов, у которых $p > 1$. Производится нормализация данных.

15. Кластеризация. Кластеризация производится по уникальным ресурсам, будь то сообщество в социальной сети или обычный сайт.

16. Сравнение количества результатов кластеризации и числа результатов, заданных пользователем. Итоговое количество результатов кластеризации сравнивается с запрошенным числом желаемых.

17. Дополнительная кластеризация. Если числа из шага 16 не равны, кластеризация повторяется для текущего или ближайшего кластера, чтобы отбросить или дополнить результаты (шаги 16 и 17 могут повториться несколько раз).

18. Вывод результатов анализа. Ресурсы, на которых в будущем возможно появление интересующей информации, представляются через модуль вывода результатов анализа.

19. Сохранение результатов анализа пользователем. Полученные результаты сбора сохраняются и выгружаются на локальный компьютер (по желанию пользователя).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагается оригинальное решение для архитектуры подсистемы анализа, отличающееся нелинейным построением. Модуль вычисления и модуль кластеризации постоянно обращаются к модулю сбора характеристик кластеризации. Такое решение позволяет четко распределить задачи по подсистеме.

При реализации системы возможно использование алгоритмов параллельной обработки данных для большего быстродействия ее работы.

Подробно описаны элементы и процессы подсистемы, рассматривается ее взаимодействие с пользователем. Предложены методы для подзадач нахождения числа кластеров, определения их центров, сбора характеристик кластеризации, а также возможные варианты нормализации данных.

По итогам проектирования представлены подробный алгоритм функционирования всей системы и полная архитектура системы. Предложенный алгоритм позволяет решить такие проблемы, как нахождение выходных результатов по параметрам от пользователя, выделение характеристик для кластеризации, нормализация данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Калытюк И.С.* Разработка и исследование алгоритма извлечения данных геолокации в социальных сетях // Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки. – СибАК, 2018. – № 11(70). – С. 39–44.

2. *Калытюк И.С., Французова Г.А., Гунько А.В.* К вопросу выбора методов предиктивного анализа данных социальных медиа // Автоматика и программная инженерия. – 2019. – № 4 (30). – С. 9–17.

3. *Калытюк И.С., Французова Г.А., Гунько А.В.* Начальные этапы проектирования системы сбора и предиктивного анализа данных социальных медиа // Системы анализа и обработки данных. – 2021. – № 1 (81). – С. 73–84. – DOI: 10.17212/2782-2001-2021-1-73-84.

4. *Фролов В.В., Слипченко С.Е., Приходько О.Ю.* Метод расчета числа кластеров для алгоритма k-means // Экономика. Информатика. – 2020. – № 47 (1). – С. 213–225. – DOI: 10.18413/2687-0932-2020-47-1-213-225.

5. Яндекс.Метрика: web-сайт. – URL: https://metrika.yandex.ru/list? (дата обращения: 11.02.2022).

6. Google Аналитика: web-сайт. – URL: https://analytics.google.com/analytics/web/provision/#/provision (дата обращения: 11.02.2022).

7. *Молодецкая С.Ф., Шитова Т.Ф.* Оценка эффективности сайта на основе технологии нечеткого управления // Вопросы управления. – 2020. – № 2 (63). – С. 39–49.

8. *Кошик А.* Веб-аналитика 2.0 на практике: тонкости и лучшие методики. – М.: Диалектика, 2019. – 528 с.

9. Ahrefs – это инструменты и ресурсы SEO для роста вашего поискового трафика. – URL: https://ahrefs.com/ru/ (дата обращения: 11.02.2022).

10. 2ip: web-сайт. – URL: https://2ip.ru/analizator/ (дата обращения: 11.02.2022).

11. RDS Bar – расширение для SEO анализа сайта и страниц: web-сайт. – URL: https://www.recipdonor.com/bar (дата обращения: 11.02.2022).

12. PR-CY. Сервис самостоятельного продвижения сайта – онлайн-инструменты для вебмастеров, оптимизаторов и копирайтеров: web-сайт. – URL: https://pr-cy.ru/ (дата обращения: 11.02.2022).

13. *Бабичев С.* Оптимизация процесса предобработки информации в системах кластеризации высокоразмерных данных // Радиоэлектроника, информатика, управление. – 2014. – № 2. – С. 135–142. – DOI: 10.15588/1607-3274-2014-2-19.

14. Статистические алгоритмы кластеризации данных в адаптивных обучающих системах / С.А. Батуркин, Е.Ю. Батуркина, В.А. Зименко, И.В. Сигинов // Вестник РГРТУ. 2010. – № 1 (31). – С. 82–85.

15. *Hartigan J.A., Wong M.A.* Algorithm AS136: a K-means clustering algorithm // Applied Statistics. – 1979. – Vol. 28 (1). – P. 100–108.

Калытюк Иван Сергеевич, аспирант кафедры автоматики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – разработка и исследование систем сбора и анализа данных. E-mail: ivankalytyuk@yandex.ru

Французова Галина Александровна, доктор технических наук, профессор кафедры автоматики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – синтез систем экстремального регулирования. E-mail: frants@ac.cs.nstu.ru

Гунько Андрей Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – разработка автоматизированных систем сбора и обработки результатов. E-mail: gun@ait.cs.nstu.ru

Kalytyuk Ivan S., postgraduate student at the Department of Automation, Novosibirsk State Technical University. The main area of his scientific research is development and research of data collection and analysis systems. E-mail: ivankalytyuk@yandex.ru

Frantsuzova Galina A., D.Sc. (Eng.), professor, Department of Automation, NSTU. The main area of her scientific research is the synthesis of extreme regulation systems. E-mail: frants@ac.cs.nstu.ru

Gunko Andrei V., PhD (Eng.), associate professor at the Department of Automation, NSTU. The main area of his scientific research is development of automated systems for collecting and processing results. E-mail: gun@ait.cs.nstu.ru

DOI: 10.17212/2782-2001-2022-1-59-72

Final stages of designing a system for collecting and predictive analysis of social media data[*]

I.S. KALYTYUK[1], *G.A. FRANTSUZOVA*[2], *A.V. GUNKO*[3]

Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

[a] *ivankalytyuk@yandex.ru* [b] *frants@ac.cs.nstu.ru* [c] *gun@ait.cs.nstu.ru*

Abstract

This article discusses the design of a system for collecting and predictive analysis of social media data. With the development of the Internet, as well as social media, it has become easier to access and distribute information because the network users themselves are both creators and recipients of varying information. The main type of social media is social networks. Facebook, VK, Instagram, YouTube, Twitter, Odnoklassniki, WhatsApp and Telegram messengers are among the most well-known ones. The most important functions of social media are to influence the perception, attitude and final behavior of consumers.

Predictive analytics is based on automatic search for connections, anomalies and patterns between various factors. To form a predictive model, a large set of statistical modeling methods, data mining, machine learning, neural networks and other mechanisms are used. Together with various methods of collecting information from Internet resources, such as parsing and social network APIs, predictive analytics can offer the most interesting sources of information for the user. In order to combine the methods of predictive analysis and data collection methods, it is necessary to take a detailed approach to the system design process.

In this paper, special attention is paid to the detailed description of the second of the main parts of the system (the analysis subsystem). In addition, the full architecture and

[*] *Received 22 July 2021.*

algorithm of operation are highlighted. The results obtained will be used in further development, and it is planned to use them in full. Working on this topic will facilitate the process of subsequent testing and research of the system.

Keywords: social media, predictive analysis, system design, architecture, algorithm of functioning, data analysis, API, parsing

REFERENCES

1. Kalytyuk I.S. Razrabotka i issledovanie algoritma izvlecheniia dannykh geolokatsii v sotsial'nykh setiakh [Development and research of an algorithm for extracting geolocation data in social networks]. *Nauchnoe soobshchestvo studentov XXI stoletiia. Tekhnicheskie nauki. SibAK - Scientific community of students of the XXI century. Technical Sciences. SibAK*, 2018, no. 11(70), pp. 39–44. (In Russian).

2. Kalytyuk I.S., Frantsuzova G.A., Gunko A.V. K voprosu vybora metodov prediktivnogo analiza dannykh sotsial'nykh media [On the choice of methods of predictive analysis of social media data]. *Avtomatika i programmnaia inzheneriia = Automatics and Software Enginery*, 2019, no. 4 (30), pp. 9–17. (In Russian).

3. Kalytyuk I.S., Frantsuzova G.A., Gunko A.V. Nachal'nye etapy proektirovaniya sistemy sbora i prediktivnogo analiza dannykh sotsial'nykh media [Initial stages of designing a system for collecting and predictive analysis of social media data]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and data processing systems*, 2021, no. 1 (81), pp. 73–84. DOI: 10.17212/2782-2001-2021-1-73-84.

4. Frolov V.V., Slipchenko S.E., Prikhod'ko O.Yu. Metod rascheta chisla klasterov dlya algoritma k-means [Clusters number calculating method for the k-means algorithm]. *Ekonomika. Informatika = Economics. Information technologies*, 2020, vol. 47 (1), pp. 213–225. DOI: 10.18413/2687-0932-2020-47-1-213-225.

5. Yandeks.Metrika [Yandex. Metrica]: website. Avaliable at: https://metrika.yandex.ru/list? (accessed 11.02.2022).

6. Google Analitika [Google Analytics]: website. Available at: https://analytics.google.com/analytics/web/provision/#/provision (accessed 11.02.2022).

7. Molodetskaya S.F., Shitova T.F. Otsenka effektivnosti saita na osnove tekhnologii nechetkogo upravleniya [Evaluation of the website effectiveness based on the technology of fuzzy control]. Voprosy upravleniya = *Management Issues*, 2020, no. 2 (63), pp. 39–49. DOI: 10.22394/2304-3369-2020-2-39-49.

8. Kaushik A. *Web analytics 2.0: the art of online accountability and science of customer centricity.* Indianapolis, Wiley, 2010 (Russ. ed.: Koshik A. *Veb-analitika 2.0 na praktike: tonkosti i luchshie metodiki*. Moscow, Dialektika Publ., 2019. 528 p.).

9. *Ahrefs – eto instrumenty i resursy SEO dlya rosta vashego poiskovogo trafika* [Ahrefs are SEO tools and resources for growing your search traffic]. Available at: https://ahrefs.com/ru/ (accessed 11.02.2022).

10. 2ip: website. (In Russian). Available at: https://2ip.ru/analizator/ (accessed 11.02.2022).

11. *RDS Bar – rasshirenie dlya seo analiza saita i stranits* [RDS Bar-extension for SEO analysis of the site and pages]. Available at: https://www.recipdonor.com/bar (accessed 11.02.2022).

12. *PR-CY. Servis samostoyatel'nogo prodvizheniya saita – Onlain instrumenty dlya vebmasterov, optimizatorov i kopiraiterov* [PR-CY. Self-promotion service – Online tools for webmasters, optimizers and copywriters]. Available at: https://pr-cy.ru/ (accessed 11.02.2022).

13. Babichev S. Optimization of information preprocessing in clustering systems of high dimension data. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2014, no. 2, pp. 135–142. (In Russian). DOI: 10.15588/1607-3274-2014-2-19.

14. Baturkin S.A., Baturkina E.Yu., Zimenko V.A., Siginov I.V. Statisticheskie algoritmy klasterizatsii dannykh v adaptivnykh obuchayushchikh sistemakh [Statistical data clasterisation algorithms in adaptive training systems]. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Ryazan State Radio Engineering University*, 2010, no. 1 (31), pp. 82–85.

15. Hartigan J.A., Wong M.A. Algorithm AS136: a K-means clustering algorithm. *Applied Statistics*, 1979, vol. 28 (1), pp. 100–108.

Для цитирования:

Калытюк И.С., Французова Г.А., Гунько А.В. Заключительные этапы проектирования системы сбора и предиктивного анализа данных социальных медиа // Системы анализа и обработки данных. – 2022. – № 1 (85). – С. 59–72. – DOI: 10.17212/2782-2001-2022-1-59-72.

For citation:

Kalytyuk I.S., Frantsuzova G.A., Gunko A.V. Zaklyuchitel'nye etapy proektirovaniya sistemy sbora i prediktivnogo analiza dannykh sotsial'nykh media [Final stages of designing a system for collecting and predictive analysis of social media data]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2022, no. 1 (85), pp. 59–72. DOI: 10.17212/2782-2001-2022-1-59-72.

ISSN 2782-2001
Системы анализа
и обработки данных
том 85, № 1, 2022, с. 73–82

http://journals.nstu.ru/vestnik
Analysis and data
processing systems
Vol. 85, No. 1, 2022, pp. 73–82

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND MANAGEMENT

УДК 81’322+811.222.8+519.25 DOI: 10.17212/2782-2001-2022-1-73-82

О распознавании автора текстового фрагмента на основе частотности буквенных биграмм*

А.А. КОСИМОВ

734042, г. Душанбе, пр. Акад. Раджабовых, 10, Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими

abdunabi_kbtut@mail.ru

На примере модельной коллекции таджикских литературных произведений изучается задача о возможности определения авторства фрагмента текста минимального размера, извлеченного из коллекции. Рассматривается модельная коллекция текстов таджикского языка, составленная из произведений классической поэзии и современной прозы на кириллической графике. Каждому произведению сопоставлен цифровой портрет – распределения частотностей символьных биграмм. Для решения проблемы идентификации авторов текстов биграммы вполне приемлемы как количественные характеристики. В качестве инструмента реализации задачи используется γ-классификатор, позволяющий по частотности элементов алфавитно-буквенных биграмм с достаточно высокой степенью эффективности идентифицировать авторов текстовой информации. Математическая модель γ-классификатора представляется в виде триады. Ее первым компонентом является цифровой портрет (ЦП) текста – распределение в тексте частотности буквенных биграмм; вторым компонентом служит формула для вычисления расстояний между ЦП текстов и третьим – алгоритм машинного обучения. Настройка алгоритма, использующего таблицу парных расстояний между всеми произведениями модельной коллекции, заключалась в определении оптимального значения вещественного параметра γ, для которого минимизируется ошибка нарушения гипотезы «однородности». Также установлено, что с помощью γ-классификатора по цифровому портрету удается идентифицировать авторов произведений на таджикском языке. Путем применения метрического классификатора и методом ближайшего (по расстоянию) соседа удалось идентифицировать авторов убывающих по размерам последовательности текстовых фрагментов от величины в 7000 слов (40 000 символов) вплоть до 20 слов (100 символов). Определен минимальный объем выборки слов или символов для распознавания автора таджикского текста. Описаны результаты экспериментов с минимальным объемом выборки слов (символов) для распознавания автора текста.

Ключевые слова: текст, фрагмент, символ, слова, биграмм, цифровой портрет текста, частотность, ближайший сосед, классификатор, идентификация

* *Статья получена 27 августа 2021 г.*

ВВЕДЕНИЕ

В настоящей статье с использованием γ-классификатора [1, 2] и цифрового текстового портрета [3], характеризующего распределение частотности буквенных биграмм, приводится описание процесса идентификации авторов произведений таджикского текста. Отметим, что ранее аналогичный вопрос изучался именно для символьных (буквенных) униграмм, биграмм и триграмм с учетом пробела [4]. Существенным моментом в сравнении с нашим предыдущим исследованием [5, 8–15] является изучение вопроса о минимально допустимом размере текстового фрагмента, для которого удается получить удовлетворительный результат решения рассматриваемой задачи. Отметим также, что в сравнении с исследованием [4] выбора фрагментов из текстов, извлеченных из «начала», «середины» и «окончания» произведений, решается задача по отдельности для поэзий и прозы.

В дополнение уместно отметить, что в монографии [16] представлен обширный обзор работ по идентификации авторов текстов на основе разнообразных цифровых портретов текстов и применяемых методов классификации.

Модельная коллекция текстов, на которой разворачивается наше исследование, та же самая, что и в [5].

Обработка коллекционного материала происходила в 4 этапа.

Этап 1. Выбор двух произведений различных авторов – «Рустам ва Сухроб» А. Фирдоуси и «Дохунда» С. Айни. Из каждого произведения извлекалось по 9 случайных выборок текстовых фрагментов, размеры которых в словах и символах показаны в табл. 1.

Таблица 1

Table 1

Информация о размерах фрагментов в словах и символах

Information on the sizes of fragments in words and symbols

Номер фрагмента	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Число слов	7000	3500	1700	900	450	250	130	60	20
Число символов	40 000	20 000	10 000	5000	2500	1200	600	300	100

Как видно из таблицы, размеры фрагментов уменьшаются от номера к номеру.

Замечание. Формальное деление числа символов на соответствующее ему число слов не будет означать среднюю длину слова, исчисляемую количеством букв, поскольку к символам помимо букв относятся также знаки препинания и арифметических операций, цифры, обозначения.

Этап 2. Для каждого фрагмента выбранных произведений строится цифровой портрет, который определяется распределением частотности буквенных биграмм, содержащихся в рассматриваемом фрагменте.

Цифровой портрет представляется в табличном виде:

$$N: \quad 1 \quad 2 \quad \ldots \quad 1225$$
$$P: \quad p_1 \quad p_2 \quad \ldots \quad p_{1225},$$

в котором первая строка – номера биграмм, расположенных в алфавитном порядке, а вторая – относительные частоты встречаемости буквенных биграмм в тексте T, причем $\sum_{i=1}^{1225} p_i = 1$.

Этап 3. Вычисление расстояний $\rho(T_1, T_2)$ между цифровыми портретами 9 фрагментов T_1 и 12 произведениями T_2 рассматриваемой коллекции текстов. Соответствующие вычисления производились по формуле

$$\rho(T_1, T_2) = \sqrt{\frac{1225}{2}} \max_s \left| \sum_{i=1}^{s} p_i^{(1)} - p_i^{(2)} \right|, \qquad (1)$$

где $p_i^{(1)}$ и $p_k^{(2)}$ – частоты встречаемости в фрагментах T_1 и в произведениях T_2 буквенных биграмм i (i = 1,…, 1225) и (s = 1,…, 1225).

Этап 4. Определение автора текстового фрагмента производится методом ближайшего соседа [6, 7]. Сущность метода заключается в том, что классифицируемый фрагмент T_1 объявляется принадлежащим тому автору, чье произведение T_2 в сравнении с другими произведениями оказывается наиболее «сходным» с фрагментом. Иными словами, рассматриваемые объекты являются ближайшими соседями, и расстояния между их цифровыми портретами минимальны в сравнении с прочими расстояниями.

Полученные результаты сведены в две группы таблиц (табл. 2–4 и 5–7). В ячейках таблиц представлены расстояния от 12 произведений модельной коллекции текстов до девяти фрагментов из романа С. Айни «Дохунда» (в 1-й группе) и до 9 фрагментов из поэмы А. Фирдоуси «Рустам ва Сухроб» (во 2-й группе).

В этих таблицах используются те же сокращения для имен авторов и названий произведений, что и в статье [5], а именно: А. Фирдоуси «Бежан бо Манижа» (АФ, Б&М, 14799) и «Рустам ва Сухроб» (АФ, Р&С, 16355); Дж. Руми «Маснавии Маънави, Дафтари 1» (ЧР, ММ1, 48713) и «Маснавии Маънави, Дафтари 2» (ЧР, ММ2, 41661); А. Суруш «Дафтари 1» (АС, Д1, 7890) и «Дафтари 2» (АС, Д2, 9322); С. Айни «Одина» (СА, О, 25446), «Ахмади Девбанд» (СА, АД, 7480), «Дохунда» (СА, Д, 71134) и «Марги судхур» (СА, МС, 48801); С. Турсун «Нисфирузи» (СТ, Н, 9936) и «Повести Камони Рустам» (СТ, ПКР, 4041). Для авторов и их произведений приняты обозначения, указываемые в скобках: первые две буквы – это инициалы авторов, вторые – сокращенные шифры текстов, третьи – число слов в произведениях.

В последующих таблицах первые 2 колонки указывают авторов и их произведения, а ячейки девяти других колонок – значения расстояний фрагментов различных длин до соответствующих произведений, вычисленные по формуле (1). Отметим также, что в названиях таблиц используются фразы о фрагментах, извлеченных из ***«начала»***, ***«середины»*** и ***«окончания»*** произведений, тем самым в определенном смысле подчеркивается случайный характер выбора фрагментов из текстов произведений.

Закрашенные ячейки этой таблицы показывают, что из четырех фрагментов, взятых из «начала» романа С. Айни «Дохунда», все 4 оказались ближайшими соседями для самой произведения. Кроме того, еще 3 фрагмента (размерами в 2500, 1200 и 600) оказались ближайшими соседями для поэмы Дж. Руми «Маснавии Маънави, Дафтари 1». Интересно, что 2 самых маленьких

фрагмента (в 300 и 100 символов) оказались ближайшими соседями для поэм А. Фирдоуси «Рустам ва Сухроб» и «Бежан бо Манижа».

Таблица 2

Table 2

Расстояния между цифровыми портретами произведений из коллекции текстов и фрагментами, извлеченными из «начала» романа С. Айни «Дохунда»

Distances between digital portraits of works from the collection of texts and fragments extracted from the "beginning" of the Dohunda novel by S. Aini

Авторы (произв.)		Длина фрагментов (в символах)								
		40 000	**20 000**	**10 000**	**5000**	**2500**	**1200**	**600**	**300**	**100**
АФ	**P&C**	0.5573	0.5982	0.6717	0.7503	1.0922	1.2611	1.6813	1.5618	2.3129
	Б&М	0.6544	0.6716	0.6682	0.7212	1.1462	1.3140	1.7159	1.6335	2.2528
ЧР	**ММ1**	0.7584	0.8357	0.7952	1.0484	0.9381	1.1166	1.4725	1.7174	2.4685
	ММ2	0.8130	0.8841	0.8559	1.1104	1.0265	1.2275	1.5834	1.7827	2.5338
АС	**Д1**	0.4965	0.5156	0.9310	0.9761	1.2956	1.4943	1.8959	2.1686	2.9197
	Д2	0.3919	0.4851	0.7735	0.7849	1.1836	1.3003	1.7000	1.9239	2.6749
СТ	**Н**	0.4577	0.4234	0.7571	0.7876	1.2746	1.4555	1.8483	2.1166	2.8677
	ПКР	0.5441	0.5874	0.8607	0.8800	1.2978	1.4787	1.8927	2.2428	2.9939
СА	**О**	**0.3130**	**0.3175**	**0.6645**	**0.7096**	**1.0283**	**1.2285**	**1.6214**	**2.0498**	**2.8009**
	АД	**0.5506**	**0.6049**	**1.0013**	**0.9192**	**1.3278**	**1.4543**	**1.8821**	**2.2721**	**3.0232**
	Д	**0.1232**	**0.1482**	**0.6078**	**0.6529**	**0.9750**	**1.1686**	**1.5704**	**1.9388**	**2.6899**
	МС	**0.2562**	**0.2456**	**0.6564**	**0.7016**	**1.0170**	**1.2144**	**1.5983**	**1.9371**	**2.6882**

Таблица 3

Table 3

Расстояния между цифровыми портретами произведений из коллекции текстов и фрагментами, извлеченными из «середины» романа С. Айни «Дохунда»

Distances between digital portraits of works from the collection of texts and fragments extracted from the "middle" of the Dohunda novel by S. Aini

Авторы (произв.)		Длина фрагментов (в символах)								
		40 000	**20 000**	**10 000**	**5000**	**2500**	**1200**	**600**	**300**	**100**
АФ	**P&C**	0.5732	0.8167	0.7396	1.0583	0.9825	1.0452	1.1623	1.7480	1.6993
	Б&М	0.7022	0.9456	0.8792	1.1253	1.1185	1.1427	1.2877	1.7797	1.6941
ЧР	**ММ1**	0.7356	1.0244	0.9692	1.1792	1.0078	1.1868	1.3460	2.0187	1.9645
	ММ2	0.7907	1.0878	1.0124	1.2333	1.0619	1.2722	1.3939	2.0629	2.0087
АС	**Д1**	0.5232	0.6087	0.6365	0.7520	0.6976	0.8247	0.9005	1.5000	1.6306
	Д2	0.4695	0.6444	0.6177	0.8370	0.8024	0.9197	0.9955	1.5950	1.5978
СТ	**Н**	0.4576	0.6337	0.5411	0.7787	0.7073	0.8797	0.9555	1.5550	1.6652
	ПКР	0.5479	0.5887	0.5823	0.6048	0.6376	0.6899	0.7863	1.4214	1.8266
СА	**О**	**0.2970**	**0.2827**	**0.3377**	**0.3843**	**0.3892**	**0.5474**	**1.2148**	**1.2685**	**1.4150**
	АД	**0.6741**	**0.7069**	**0.6588**	**0.5567**	**0.7036**	**0.6747**	**0.9854**	**1.4066**	**1.9524**
	Д	**0.1766**	**0.4375**	**0.3604**	**0.5681**	**0.5244**	**0.7299**	**1.0766**	**1.4519**	**1.4266**
	МС	**0.2846**	**0.3704**	**0.3081**	**0.4759**	**0.4246**	**0.6376**	**1.0314**	**1.3129**	**1.4253**

Как видно из табл. 2, для восьми фрагментов, взятых из «середины» романа «Дохунда», один фрагмент оказался ближайшим соседом для самого произведения, один фрагмент – ближайшим соседом для «Марги судхур» и 6 фрагментов – ближайшими соседями для «Одина». Кроме того, всего лишь один фрагмент (размером в 600 символов) оказался ближайшим соседом для произведения С. Турсуна «Повести Камони Рустам».

Таблица 4

Table 4

Расстояния между цифровыми портретами произведений из коллекции текстов и фрагментами, извлеченными из «окончания» романа С. Айни «Дохунда»

Distances between digital portraits of works from the collection of texts and fragments extracted from the "end" of the Dohunda novel by S. Aini

Авторы (произв.)		Длина фрагментов (в символах)								
		40 000	**20 000**	**10 000**	**5000**	**2500**	**1200**	**600**	**300**	**100**
АФ	**P&C**	0.5628	0.6208	0.5537	0.6202	0.6871	0.9209	0.8734	1.7209	1.9824
	Б&М	0.6697	0.7422	0.6638	0.7522	0.8067	0.9392	0.8917	1.7392	2.0540
ЧР	**ММ1**	0.7293	0.7597	0.7709	0.8398	0.9750	1.1842	1.1367	1.9842	1.8407
	ММ2	0.7834	0.8120	0.8192	0.8353	1.0301	1.1866	1.1438	1.9587	1.8086
АС	**Д1**	0.5978	0.5670	0.7384	0.5152	0.8140	1.0133	0.9722	1.8133	2.1899
	Д2	0.4811	0.3955	0.4918	0.5168	0.8001	1.0124	0.9649	1.8124	2.0716
СТ	**Н**	0.5052	0.4906	0.6405	0.4039	0.6616	0.9098	0.9120	1.7098	2.2713
	ПКР	0.6484	0.6176	0.7889	0.5160	0.4772	0.6742	1.0508	1.8593	2.3876
СА	**О**	**0.3654**	**0.3270**	**0.4934**	**0.4218**	**0.4954**	**0.7064**	**0.9380**	**1.9927**	**2.5028**
	АД	**0.5793**	**0.4900**	**0.6613**	**0.5182**	**0.5652**	**0.8035**	**1.0971**	**2.2048**	**2.7042**
	Д	**0.2219**	**0.1888**	**0.3601**	**0.3788**	**0.5171**	**0.7438**	**0.7492**	**1.8338**	**2.3522**
	МС	**0.2999**	**0.2691**	**0.4404**	**0.4816**	**0.5185**	**0.7634**	**0.9229**	**1.9314**	**2.4918**

Для фрагментов из «конца» романа «Дохунда» (размерами не менее 5000 и 600 символов) основной результат тот же, что и в двух предыдущих случаях: ближайшими для них соседями служат только произведения С. Айни. Кроме того, всего лишь один фрагмент (размером в 100 символов) оказался ближайшим соседом для поэмы Дж. Руми «Маснавии Маънави, Дафтари 2». Интересно, что 3 других фрагмента (размерами в 2500, 1200 и 300) оказались ближайшими соседями для произведений С. Турсуна «Повести Камони Рустам» и «Нисфирузи».

Таблица 5

Table 5

Расстояния между цифровыми портретами произведений из коллекции текстов и фрагментами, извлеченными из «начала» поэмы А. Фирдоуси «Рустам ва Сухроб»

Distances between digital portraits of works from the collection of texts and fragments extracted from the "beginning" of the Rustam & Suhrob poem by A. Firdousi

Авторы (произв.)		Длина фрагментов (в символах)								
		40 000	**20 000**	**10 000**	**5000**	**2500**	**1200**	**600**	**300**	**100**
АФ	**P&C**	**0.1546**	**0.1875**	**0.4082**	**0.4992**	**0.5481**	**0.8051**	**1.1439**	**1.3656**	**4.5971**
	Б&М	**0.2449**	**0.2787**	**0.4306**	**0.4558**	**0.5225**	**0.7216**	**0.9941**	**1.3299**	**4.6489**
ЧР	**ММ1**	0.4687	0.5032	0.6811	0.8072	0.8467	1.1006	1.3661	1.5885	4.2512
	ММ2	0.5336	0.5681	0.7458	0.8851	0.9092	1.1616	1.4271	1.6495	4.2329
АС	**Д1**	0.9457	0.9818	1.1572	1.2691	1.3285	1.5824	1.8478	2.0703	4.8321
	Д2	0.7414	0.7701	0.9494	1.0648	1.1243	1.3782	1.6435	1.8661	4.6062
СТ	**Н**	0.8734	0.9063	1.0663	1.2237	1.2471	1.4468	1.7121	1.9346	4.7704
	ПКР	1.0088	1.0431	1.2001	1.3605	1.3809	1.5375	1.8316	2.0216	4.8087
СА	**О**	0.8587	0.8447	1.0526	1.1802	1.2274	1.2817	1.6181	1.7696	5.0472
	АД	0.9738	0.9976	1.1677	1.3137	1.3856	1.5231	1.8619	1.9381	5.1542
	Д	0.6547	0.6429	0.8486	0.9774	1.0246	1.2165	1.5178	1.7043	4.8671
	МС	0.7363	0.7583	0.9302	1.0455	1.1163	1.2878	1.5532	1.7757	4.9891

В табл. 5–7 девять фрагментов выбираются из поэмы А. Фирдоуси «Рустам ва Сухроб». Закрашенные ячейки этой таблицы показывают, что из восьми фрагментов, взятых из «начала» поэмы А. Фирдоуси «Рустам ва Сухроб», 3 оказались ближайшими соседями для самой поэмы, а 5 – ближайшими соседями для «Бежан бо Манижа». Кроме того, всего лишь один фрагмент (размером в 100 символов) оказался ближайшими соседом для поэмы Дж. Руми «Маснавии Маънави, Дафтари 2».

Таблица 6

Table 6

Расстояния между цифровыми портретами произведений из коллекции текстов и фрагментами, извлеченными из «середины» поэмы А. Фирдоуси «Рустам ва Сухроб»

Distances between digital portraits of works from the collection of texts and fragments extracted from the "middle" of the Rustam & Suhrob poem by A. Firdousi

Авторы (произв.)		Длина фрагментов (в символах)								
		40 000	**20 000**	**10 000**	**5000**	**2500**	**1200**	**600**	**300**	**100**
АФ	**P&C**	**0.0801**	**0.2232**	**0.3465**	**0.7885**	**0.6762**	**0.6125**	**0.7236**	**2.4113**	**1.5991**
	Б&М	**0.2058**	**0.2326**	**0.3856**	**0.7948**	**0.6072**	**0.5566**	**0.7761**	**2.3231**	**1.7191**
ЧР	**ММ1**	0.5624	0.5867	0.7125	1.1195	1.1087	0.9869	1.1738	2.5881	1.3655
	ММ2	0.6155	0.6345	0.7721	1.1617	1.1349	1.0401	1.2224	2.6382	1.4321
АС	**Д1**	0.8553	0.8839	0.7788	0.6378	0.7845	0.8601	1.0698	3.0289	1.8648
	Д2	0.6511	0.6599	0.5745	0.7457	0.7249	0.7512	0.8533	2.8102	1.6723
СТ	**Н**	0.7526	0.8194	0.6739	0.6135	0.6888	0.7802	0.9861	2.9363	1.7576
	ПКР	0.8871	0.9548	0.8106	0.6946	0.8351	0.9169	1.1228	3.0518	1.8553
СА	**О**	0.8573	0.8623	0.6692	0.4569	0.5918	0.7255	0.9591	2.9402	1.5882
	АД	0.9826	0.9774	0.7842	0.5721	0.7092	0.8406	1.0741	3.1706	1.9954
	Д	0.6533	0.6583	0.4652	0.5612	0.4701	0.5329	0.7551	2.8259	1.5417
	МС	0.7349	0.7399	0.5467	0.4473	0.4866	0.6031	0.8366	2.8478	1.5855

Закрашенные ячейки этой таблицы показывают, что из пяти фрагментов, взятых из «середины» поэмы А. Фирдоуси «Рустам ва Сухроб», 4 оказались ближайшими соседями для самой поэмы, а один фрагмент – ближайшим соседом для «Бежан бо Манижа». Кроме того, всего лишь один фрагмент (размером в 100 символов) оказался ближайшим соседом для поэмы Дж. Руми «Маснавии Маънави, Дафтари 1». Интересно, что три других фрагмента (размерами в 5000, 2500 и 1200) оказались ближайшими соседями произведений С. Айни «Марги судхур» и «Дохунда».

Как видно из табл. 6, для восьми фрагментов, взятых из «конца» поэмы А. Фирдауси «Рустам ва Сухроб», 6 оказались ближайшими соседями для самой поэмы, а 2 – ближайшими соседями для «Бежан бо Манижа». Кроме того, всего лишь один фрагмент (размером в 300 символов) оказался ближайшим соседом для произведения С. Айни «Ахмади Девбанд».

Таблица 7

Table 7

Расстояния между цифровыми портретами произведений из коллекции текстов и фрагментами, извлеченными из «окончания» поэмы А. Фирдоуси «Рустам ва Сухроб»

Distances between digital portraits of works from the collection of texts and fragments extracted from the "end" of the Rustam & Suhrob poem by A. Firdousi

Авторы (произв.)		Длина фрагментов (в символах)								
		40 000	**20 000**	**10 000**	**5000**	**2500**	**1200**	**600**	**300**	**100**
АФ	**P&C**	**0.1246**	**0.1531**	**0.1984**	**0.4345**	**0.4677**	**0.4627**	**0.6423**	**1.3389**	**4.0598**
	Б&М	**0.2475**	**0.2311**	**0.2388**	**0.4905**	**0.3773**	**0.4905**	**0.6784**	**1.3789**	**3.9715**
ЧР	**ММ1**	0.6055	0.5878	0.5971	0.7289	0.5801	0.9481	1.0529	1.5929	4.2365
	ММ2	0.5417	0.5269	0.5818	0.7849	0.6361	0.9959	0.9873	1.6322	4.2867
АС	**Д1**	0.7065	0.7092	0.8487	0.9051	0.8217	0.6754	1.0173	1.1852	4.6725
	Д2	0.5022	0.4627	0.6021	0.6585	0.7147	0.5423	0.8131	1.2518	4.5101
СТ	**Н**	0.6137	0.6284	0.7771	0.8261	0.7274	0.5776	0.9403	1.2659	4.5848
	ПКР	0.7473	0.7637	0.9105	0.9556	0.8722	0.7261	1.0225	1.1005	4.7781
СА	**О**	0.7797	0.7396	0.7767	1.0118	0.9397	0.8122	1.0347	1.3253	4.8335
	АД	0.9465	0.9064	0.9214	1.1816	1.1531	0.9964	1.0721	1.0502	4.9397
	Д	0.6013	0.5612	0.5762	0.8271	0.7557	0.7469	1.0266	1.3011	4.6307
	МС	0.7167	0.6766	0.6916	0.9486	0.8765	0.7351	0.9432	1.2235	4.6988

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, результаты, представленные в таблицах, показывают, что ближайшими соседями по отношению к выбранным фрагментам являются в основном произведения именно того же автора, из произведения которого извлекались сами фрагменты. В иной интерпретации это значит, что методом ближайшего соседа путем вычисления расстояний по формуле (1) представляется возможным установить авторство достаточно малого фрагмента литературного произведения, причем для поэтических произведений (в сравнении с прозаическими) более успешно.

Для художественных текстов можно предложить оценку эффективности применяемого метода, опираясь на вполне естественную гипотезу, согласно которой фрагмент, извлекаемый из какого-либо произведения, должен быть «однородным» с любыми произведениями одного и того же автора. На языке «расстояний» этому соответствует утверждение о том, что ближайшими соседями искомого фрагмента являются, прежде всего, произведения того же автора.

Для прозаического произведения по данным табл. 2 метод ближайшего соседа безошибочно определяет автора фрагментов, состоящих из не менее 5000 символов.

По данным табл. 3 метод безошибочно определяет автора восьми фрагментов из девяти и для одного фрагмента (размером 600 символов) допускает ошибку.

По данным табл. 4 метод ближайшего соседа безошибочно определяет автора пяти фрагментов из девяти и для четырех фрагментов (размерами 2500, 1200, 300 и 100 символов) допускает ошибку.

Для поэтического произведения по данным табл. 5 метод ближайшего соседа безошибочно определяет автора восьми фрагментов из девяти и для одного фрагмента (размером 100 символов) допускает ошибку.

По данным табл. 6 метод безошибочно определяет автора пяти фрагментов из девяти и для четырех фрагментов размерами 5000, 2500, 1200 и 300 символов допускает ошибку.

По данным табл. 7 метод ближайшего соседа безошибочно определяет автора восьми фрагментов из девяти и для одного фрагмента размером 300 символов допускает ошибку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Усманов З.Д.* Классификатор дискретных случайных величин // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2017. – Т. 60, № 7–8. – С. 291–300.

2. *Усманов З.Д.* Алгоритм настройки кластеризатора дискретных случайных величин // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2017. – Т. 60, № 9. – С. 392–397.

3. *Косимов А.А., Рахмонов Ф.А.* О распознавании автора текста на основе частотности буквенных биграмм // Конференсияи илми-амалии омузгорон, мухаккикони чавон, докторантон PhD, магистрантон ва донишчуён бахшида ба эълон гардидани солхои 2019–2021 «Солхои рушди дехот, сайёхи ва хунархои мардуми», солхои 2020–2040 «Бистсолаи омузиш ва рушди фанхои табиатшиноси, дакик ва риёзи дар сохаи илму маориф», Рузи илми точик ва 30-солагии Истиклолияти давлатии Чумхурии Точикистон, ДПДТТХ ба номи М.С. Осими. – Хучанд, 2020. – 11 с.

4. *Косимов А.А.* О минимальном объеме текста, необходимого для распознавания его автора // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2017. – Т. 60, № 9. – С. 398–401.

5. О распознавании автора текста на основе частотности буквенных униграмм / А.А. Косимов, Р.Ш. Умарализода, А.А. Хасанов, Ш.С. Саидов // Конференсияи чумхуриявии илми-амалии «Илм – асоси рушди инноватсиони», Донишгохи техникии Точикистон ба номи академик М.С. Осими, 27–28 апрели соли 2021. – Душанбе, 2021. – С. 322–326.

6. *Воронцов К.В.* Математические методы обучения по прецедентам. – URL: http://www.machinelearning.ru/wiki/images/6/6d/Voron-ML-1.pdf (дата обращения: 11.02.2022).

7. *Дьяконов А.Г.* Анализ данных, обучение по прецедентам, логические игры, системы WEKA, RapidMiner и MatLab (Практикум на ЭВМ кафедры математических методов прогнозирования): учебное пособие. – М.: ВМК МГУ им. М.В. Ломоносова, 2010. – 278 с.

8. *Каримов А.А.* О цифровом портрете текстовой информации // Политехнический вестник. Серия: Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2019. – № 1 (45). – С. 7–10.

9. *Каюмов М.М.* О цифровом портрете текстовой информации, основанном на частотности знаков пунктуации // Политехнический вестник. Серия: Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2019. – № 1 (45). – С. 20–23.

10. *Каюмов М.М.* О распознавании автора текста на основе частотности αβ-кодов словоформ // Политехнический вестник. Серия: Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2020. – № 2 (50). – С. 29–36.

11. *Ашурова Ш.Н.* Оценка эффективности использования словесных биграмм при идентификации текста // Роль ИКТ в инновационном развитии экономики Республики Таджикистан: материалы международной научно-практической конференции. – Душанбе: Бахманруд, 2017. – С. 292–297.

12. *Ашурова Ш.Н.* Оценка эффективности использования словесных триграмм при идентификации текста // Вестник Технологического университета Таджикистана. – 2017. – № 4 (31). – С. 51–58.

13. *Ашурова Ш.Н., Тошхуджаев Х.А.* О распознавании автора текста на основе частотности словесных биграмм // Политехнический вестник. Серия: интеллект, инновации, инвестиции. – 2020. – 2(50). – С. 57–61.

14. *Бахтеев К.С.* О применимости укороченных цифровых портретов для идентификации автора текста // Политехнический вестник. Серия: Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2020. – № 2 (50). – С. 25–28.

15. *Бахтеев К.С.* О распознавании авторства по усеченным цифровым портретам текста // Известия Академии наук Республики Таджикистан. Отделение физико-математических, химических, геологических и технических наук. – 2018. – № 4 (173). – С. 82–92.

16. *Романов А.С., Шелупанов А.А., Мещеряков Р.В.* Разработка и исследование математических моделей, методик и программных средств информационных процессов при идентификации автора текста. – Томск: В-Спектр, 2011. – 188 с.

DOI: 10.17212/2782-2001-2022-1-73-82

On the recognition of the author of a text fragment based on the frequency of alphabetic bigrams[*]

A.A. KOSIMOV

Tajik Technical University named after Acad. M.S. Osimi, 10 Acad. Radjabov Prospekt, Dushanbe, 734042

abdunabi_kbtut@mail.ru

Abstract

On the example of a model collection of Tajik literary works, the problem of the possibility of determining the authorship of a fragment of the text of the minimum size extracted from the collection is studied. A model collection of texts in the Tajik language composed of works of classical poetry and modern prose in Cyrillic graphics is considered. Each piece is associated with a digital portrait - the distribution of the frequencies of symbolic bigrams. To solve the problem of identifying the authors of texts, bigrams are quite acceptable quantitative characteristics. A γ-classifier is used as a tool for implementing the task, which allows the authors of textual information to be identified by the frequency of elements of alphabetic bigrams with a sufficiently high degree of efficiency. The mathematical model of the γ-classifier is represented as a triad. Its first component is a digital portrait (DP) of the text - the distribution of the frequency of bigrams in the text; the second component is formulas for calculating the distances between the DP texts and the third is a machine learning algorithm. The tuning of the algorithm using a table of paired distances between all products of the model collection consisted in determining an optimal value of the real parameter γ, for which the error of violation of the "homogeneity" hypothesis is minimized. It was also found that with the help of a γ-classifier by a digital portrait, it is possible to identify the authors of works in the Tajik language. By using the metric classifier and the method of the nearest (in terms of distance) neighbor, it was possible to identify the authors of decreasing sequences of text fragments from 7000 words (40,000 characters) up to 20 words (100 characters). The minimum volume of a sample of words or symbols for recognition of the author of a Tajik text has been determined. The results of experiments with a minimum sample size of words (characters) for recognizing the author of a text are described.

Keywords: text, fragment, symbol, words, bigram, digital portrait of text, frequency, nearest neighbor, classifier, identification

REFERENCES

1. Usmanov Z.D. Klassifikator diskretnykh sluchainykh velichin [The classifier of discrete random variables]. *Doklady Akademii nauk Respubliki Tadzhikistan = Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan*, 2017, vol. 60, no. 7–8, pp. 291–300.

2. Usmanov Z.D. Algoritm nastroiki klasterizatora diskretnykh sluchainykh velichin [Tuning the algorithm of the clasifier of discrete random variables]. *Doklady Akademii nauk Respubliki Tadzhikistan = Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan*, 2017, vol. 60, no. 9, pp. 392–397.

3. Kosimov A.A., Rakhmonov F.A. [On the recognition of the author of the text based on the frequency of alphabetic bigrams]. *Scientific-practical conference of teachers, young researchers, doctoral students PhD, undergraduates and students dedicated to the proclamation of 2019–2021 "Years of rural development, tourism and folk crafts", 2020–2040 "Twentieth anniversary of teaching and development of natural sciences, exact and mathematical sciences in the field of science and education", Tajik Science Day and 30th anniversary of the State Independence of the Republic of Tajikistan, Tajik Technical University named after M.S. Osimi*. Khujand, 2020. 11 p. (In Russian).

4. Kosimov A.A. O minimal'nom ob"eme teksta, neobkhodimogo dlya raspoznavaniya ego avtora [On the minimum amount of text required to recognize its author]. *Doklady Akademii nauk Respubliki Tadzhikistan = Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan*, 2017, vol. 60, no. 9, pp. 398–401. (In Russian).

[*] *Received 27 August 2021.*

5. Kosimov A.A., Umaralizoda R.Sh., Khasanov A.A., Saidov Sh.S. [*On recognition of the author of a text based on the frequency of alphabetic unigrams]. Republican scientific-practical conference "Science – the basis of innovative development"*. Tajik Technical University named after M.S. Osimi. Dushanbe, April 27–28, 2021, pp. 322–326. (In Russian).

6. Vorontsov K.V. *Matematicheskie metody obucheniya po pretsedentam* [Mathematical methods of teaching by precedents]. Available at: http://www.machinelearning.ru/wiki/images/6/6d/Voron-ML-1.pdf (accessed 11.02.2022).

7. D'yakonov A.G. *Analiz dannykh, obuchenie po pretsedentam, logicheskie igry, sistemy WEKA, RapidMiner i MatLab (Praktikum na EVM kafedry matematicheskikh metodov prognozirovaniya)* [Data analysis, training on precedents, logic games, WEKA, RapidMiner and MatLab systems (Workshop on the computer of the Department of Mathematical Forecasting Methods)]. Moscow, MSU Publ., 2010. 278 p.

8. Kayumov M.M. O tsifrovom portrete tekstovoi informatsii [On the digital portrait of text information]. *Politekhnicheskii vestnik. Seriya: Intellekt. Innovatsii. Investitsii = Polytechnic Bulletin. Series: Intelligence. Innovation. Investments*, 2019, no. 1 (45), pp. 7–10.

9. Kayumov M.M. O tsifrovom portrete tekstovoi informatsii, osnovannom na chastotnosti znakov punktuatsii [On the digital portrait of text information based on the frequency of punctuation marks]. *Politekhnicheskii vestnik. Seriya: Intellekt. Innovatsii. Investitsii = Polytechnic Bulletin. Series: Intelligence. Innovation. Investments*, 2019, no. 1 (45), pp. 20–23.

10. Kayumov M.M. O raspoznavanii avtora teksta na osnove chastotnosti αβ-kodov slovoform [On recognition of the author of a text based on the frequency of *αβ*-codes of word forms]. *Politekhnicheskii vestnik. Seriya: Intellekt. Innovatsii. Investitsii = Polytechnic Bulletin. Series: Intelligence. Innovation. Investments*, 2020, no. 2 (50), pp. 29–36.

11. Ashurova Sh.N. [Assessment of the effectiveness of the use of verbal bigrams in the identification of text]. *Rol' IKT v innovatsionnom razvitii ekonomiki Respubliki Tadzhikistan*: materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii [Materials of the international scientific-practical conference HER "The role of ICT in the innovative development of the economy of the Republic of Tajikistan"]. Dushanbe, Bahmanrud Publ., 2017, pp. 292–297. (In Russian).

12. Ashurova Sh.N. Otsenka effektivnosti ispol'zovaniya slovesnykh trigramm pri identifikatsii teksta [Efficiency evaluation of using word trigrams for a text identification]. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta Tadzhikistana = Bulletin of the Technological University of Tajikistan*, 2017, no. 4 (31), pp. 51–58. (In Russian).

13. Ashurova Sh.N., Toshkhudzhaev Kh.A. On recognition of the author of the text based on the frequency of verbal bigrams // Polytechnic Bulletin, Series: intelligence, innovation, investment. 2020. 2 (50). pp. 57–61 (in Russian).

14. Bakhteev K.S. O primenimosti ukorochennykh tsifrovykh portretov dlya identifikatsii avtora teksta [About the applicability of shortened digital portraits to identify the author's text]. *Politekhnicheskii vestnik. Seriya: Intellekt. Innovatsii. Investitsii = Polytechnic Bulletin. Series: Intelligence. Innovation. Investments*, 2020, no. 2 (50), pp. 25–28.

15. Bakhteev K.S. O raspoznavanii avtorstva po usechennym tsifrovym portretam teksta [On the recognition of authorship by truncated digital portraits of text]. *Izvestiya Akademii nauk Respubliki Tadzhikistan. Otdelenie fiziko-matematicheskikh, khimicheskikh, geologicheskikh i tekhnicheskikh nauk = News of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan. Department of physical, mathematical, chemical, geological and technical sciences*, 2018, no. 4 (173), pp. 82–92.

16. Romanov A.S., Shelupanov A.A., Meshcheryakov R.V. *Razrabotka i issledovanie matematicheskikh modelei, metodik i programmnykh sredstv informatsionnykh protsessov pri identifikatsii avtora teksta* [Development and research of mathematical models, methods and software for information processes in the identification of the author of the text]. Tomsk, V-Spektr Publ., 2011. 188 p.

Для цитирования:

Косимов А.А. О распознавании автора текстового фрагмента на основе частотности буквенных биграмм // Системы анализа и обработки данных. – 2022. – № 1 (85). – С. 73–82. – DOI: 10.17212/2782-2001-2022-1-73-82.

For citation:

Kosimov A.A. O raspoznavanii avtora tekstovogo fragmenta na osnove chastotnosti bukvennykh bigramm [On the recognition of the author of a text fragment based on the frequency of alphabetic bigrams]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2022, no. 1 (85), pp. 73–82. DOI: 10.17212/2782-2001-2022-1-73-82.

ISSN 2782-2001
Системы анализа
и обработки данных
том 85, № 1, 2022, с. 83–92

http://journals.nstu.ru/vestnik
Analysis and data
processing systems
Vol. 85, No. 1, 2022, pp. 83–92

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND MANAGEMENT

УДК 519.873

DOI: 10.17212/2782-2001-2022-1-83-92

Оценивание параметров дифференциального уравнения, описывающего процессы запуска и останова насосного агрегата*

А.В. МАЙСТРЕНКО [a], **А.А. СВЕТЛАКОВ** [b]

634050, РФ, г. Томск, пр. Ленина, 40, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

[a] *maestro67@mail.ru* [b] *svetlakov.38@mail.ru*

В настоящей статье приведены результаты исследования различных переходных режимов насосного агрегата нефтеперекачивающей станции, в частности, токи статора приводного электродвигателя и скоростной характеристики вращения его ротора. Характеристики насосного агрегата могут весьма существенно изменяться в процессе работы. Это обусловлено тем, что параметры перекачиваемой нефти практически непрерывно изменяются, также происходит физический износ деталей насосного агрегата, особенно подвержено износу рабочее колесо. Входной и выходной переменными данного объекта являются, соответственно, время и угловая скорость вращения его ротора. Совокупность приведенных выше факторов оказывает значительное влияние на изменение скорости вращения ротора в процессе эксплуатации, что может отрицательно сказаться на работе системы в целом. С целью устранения влияния внешних факторов на работу насосного агрегата зависимость между входной и выходной переменными была описана обыкновенным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами. Цель работы заключается в том, чтобы проиллюстрировать возможности и «технологию» применения алгоритма чувствительности для оценивания параметров данного уравнения и показать, что предложенные метод и реализующий его численный алгоритм позволяют вполне успешно решать рассматриваемую задачу, и они пригодны для решения многих подобных прикладных задач, связанных с оцениванием параметров обыкновенных дифференциальных уравнений.

По результатам работы предлагаемые метод и реализующий его численный алгоритм показали свою работоспособность и могут быть в дальнейшем использованы для автоматизации реальных объектов управления в различных отраслях науки и техники.

Ключевые слова: дифференциальное уравнение, алгоритм чувствительности, метрика, объект управления, асинхронный электродвигатель переменного тока, математическая модель, экстремальная задача, частоты вращения ротора

* *Статья получена 11 мая 2021 г.*

ВВЕДЕНИЕ

Как известно [1, 2], для описания количественных связей между переменными, характеризующими поведение динамических объектов во времени, часто применяются всевозможные классы дифференциальных уравнений [3–5]. Выбор класса такого уравнения должен учитывать известные теоретические представления в физике, химии, экономике и т. д., а также основополагающие процессы и механизмы, определяющие функционирование изучаемого объекта [6–9]. Определение значений параметров выбранного класса дифференциального уравнения при этом сводится к задаче минимизации какой-либо метрики, характеризующей расстояние между измеренными значениями выхода объекта и решениями дифференциального уравнения, вычисленными при тех же значениях входа объекта, соответствующих измеренным значениям его выхода [10–12].

Для нахождения значений параметров дифференциального уравнения воспользуемся алгоритмом чувствительности [13], суть которого приводится ниже.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В качестве исходных данных в выполненных нами исследованиях были использованы данные, полученные путем непосредственных измерений на реальном объекте в лаборатории НИИ ЭлеСи. На рис. 1–3 приведены зависимости момента, скорости вращения ротора и токов статора от времени приводного электродвигателя насосного агрегата (НА) при различных режимах его эксплуатации. Для исследований и моделирования были использованы файлы данных формата dat.

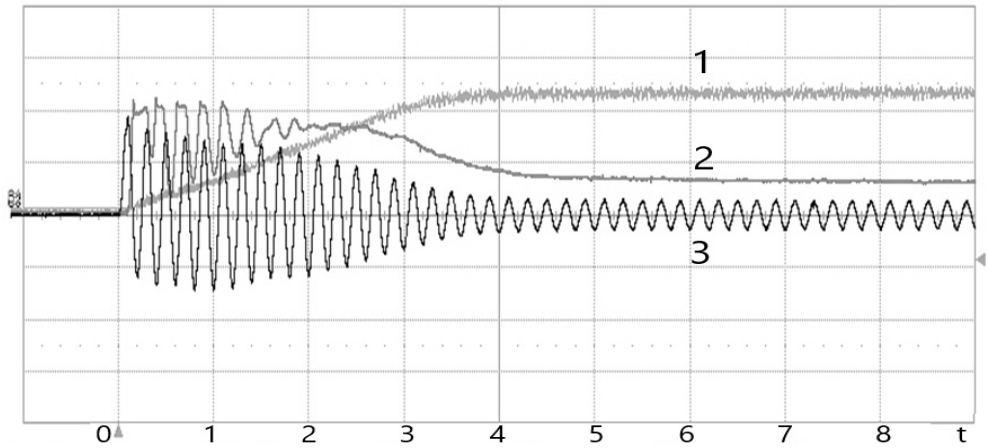


Рис. 1. Режим работы электродвигателя с номинальным моментом

Fig. 1. The operating mode of the electric motor with a rated torque

На рис. 1–3 цифрой 1 обозначена зависимость скорости вращения ротора НА от времени $\omega(t)$, цифрой 2 – переменное напряжение питания электродвигателя $u(t)$ и цифрой 3 – ток статора $i(t)$.

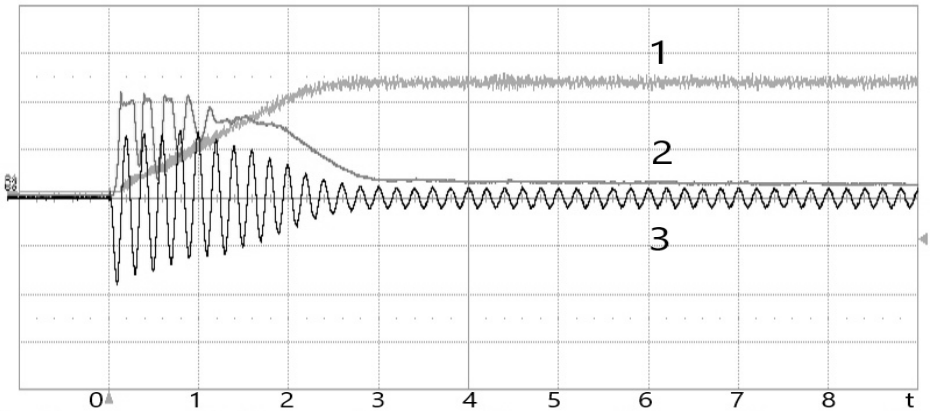


Рис. 2. Режим работы электродвигателя на холостом ходу

Fig. 2. The mode of operation of the electric motor at idle speed

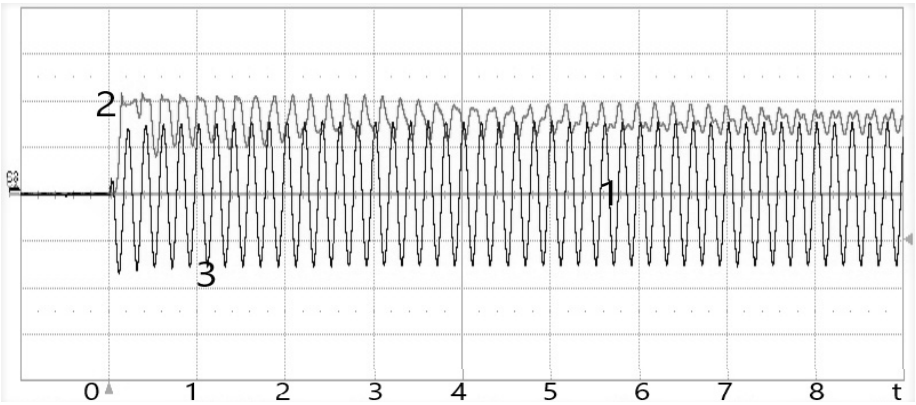


Рис. 3. Режим работы электродвигателя на упор

Fig. 3. The mode of operation of the electric motor at the stop

Кроме отмеченного выше, в качестве исходной информации были использованы некоторые данные, содержащиеся в руководящих документах (РД), определяющих требования к проектированию магистральных нефтепроводов.

2. ВЫБОР КЛАССА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ

Для решения поставленной задачи с учетом существующих ограниченных возможностей по сбору измеренных значений частоты вращения ротора приводящего электродвигателя или, что то же самое, вала насоса и тока статора было решено использовать один из классов дифференциальных уравнений.

Выбор дифференциального уравнения для моделирования процесса запуска и выхода на установившийся режим асинхронного электродвигателя, приводящего в действие насосный агрегат, осуществлялся исходя из физических особенностей процесса и объекта. Для реализации поставленной задачи были проведены экспериментальные исследования различных классов

дифференциальных уравнений, сравнительные характеристики применения которых для моделирования рассматриваемого процесса приведены в таблице. В результате проделанной работы было выбрано дифференциальное уравнение второго порядка с тремя слагаемыми (таблица), которое описывает исследуемый процесс с требуемой точностью. Определение значений параметров выбранного класса дифференциального уравнения сводилось к задаче минимизации квадратичной метрики [6].

Для реализации поставленной цели была написана программа в среде моделирования Matlab, с помощью которой были проведены все экспериментальные исследования.

Классы дифференциальных уравнений

Classes of differential equations

Вид дифференциального уравнения	*S*, шум 0 %	*S*, шум 5 %	*S*, шум 10 %
$\frac{d\omega}{dt} = a_1\omega + a_2 u(t) + \varepsilon(t)$	0,0042	0,01	0,08
$\frac{d\omega}{dt} = a_1\omega + \varepsilon(t)$	0,0045	0,01	0,08
$\frac{d^2\omega}{dt^2} = a_1\frac{d\omega}{dt} + a_2\omega + a_3 u(t) + \varepsilon(t)$	0,0037	0,008	0,04
$\frac{d^2\omega}{dt^2} = a_1\frac{d\omega}{dt} + a_2\omega + \varepsilon(t)$	0,0038	0,0082	0,041

В таблице S – метрика между измеренными и вычисленными значениями частоты вращения ротора при различных уровнях шумов; $u(t)$ – переменное напряжение питание электродвигателя, при моделировании данная функция использовалась еще и как единичная функция $u(t) = 1$; $\varepsilon(t)$ – функция, характеризующая внешнее возмущение, задавалась с помощью специальной программы, генерирующей шумы с нормальным законом распределения.

Объектом исследования является разгонная характеристика электродвигателя. Входной и выходной переменными объекта являются время и скорость вращения ротора двигателя, связь между данными переменными описывается обыкновенным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами, определяемым с точностью до набора его постоянных коэффициентов, численные значения которых нам неизвестны. Для нахождения этих коэффициентов была сформулирована следующая вычислительная задача.

Во-первых, в результате экспериментов было установлено, что скорость вращения ротора электродвигателя ω от времени t с высокой точностью описывается при помощи следующего дифференциального уравнения:

$$\frac{d^2\omega}{dt^2} = a_1\frac{d\omega}{dt} + a_2 w + \varepsilon(t), \qquad (1)$$

где $\varepsilon(t)$ – функция, определяющая внешнее воздействие.

Во-вторых, предполагалось, что существует конечное число N пар измерений вида

$$\tilde{\omega}_i, t_i, \ i=\overline{1,N}, \tag{2}$$

где $\tilde{\omega}_i$ – значение скорости вращения вала в момент времени t_i.

В-третьих, для оценки ошибки описания измерений уравнением (1) воспользуемся хорошо известной евклидовой метрикой S, вычисляемой в соответствии с соотношением

$$S=\left[\sum_{i=1}^{N}\left(\tilde{\omega}_i-\omega(\vec{a},\ t_i)\right)^2\right]^{1/2}, \tag{3}$$

где $\tilde{\omega}_i$ и $\omega(\vec{a},\ t_i)$ – соответственно измеренные и вычисленные значения частоты вращения ротора электродвигателя.

Как непосредственно видно из равенства (3), метрика S является функцией оценок $\vec{a}$ неизвестных параметров уравнения (1), и, таким образом, ее использование позволяет свести задачу отыскания данных оценок к решению экстремальной задачи вида

$$\vec{a}=\arg\min S. \tag{4}$$

В равенстве (4) символ $\arg\min$ означает, что необходимо выбирать такие оценки $\vec{a}$, при которых метрика S принимает минимальное значение. Выбор именно таких оценок $\vec{a}$ в оговоренных выше условиях является, очевидно, вполне разумным и логически обоснованным.

3. НОВЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ ЗАДАЧИ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Для решения экстремальной задачи (4) применим хорошо известный алгоритм чувствительности, основанный на использовании функций чувствительности $W_i(\vec{a},\ t)$ по оценкам параметров a_i, определяемых соотношениями

$$W_i(\vec{a},\ t)=\frac{\partial\omega(\vec{a},\ t)}{\partial a_i},\ \ i=\overline{1,4}. \tag{5}$$

Данный алгоритм является итерационным, на каждой итерации выполняется последовательность численных операций, необходимых для формирования и решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) [14, 15] относительно оценок $\vec{a}$. Допустим, что уже выполнено $l-1$ итераций и вектор оценок $\vec{a}^{l-1}$ вычислен. Представим вектор новых оценок параметров $\vec{a}^{l}$ соотношением вида

$$\vec{a}^{l}=\vec{a}^{l-1}+\Delta\vec{a}^{l}, \tag{6}$$

где $\Delta\vec{a}^{l}$ – вектор поправок оценок $\vec{a}^{l-1}$.

Разложим функцию $\omega(\vec{a}^{\,l},\ t)$ в окрестности значений $\vec{a}^{\,l-1}$ в ряд Тейлора, ограничившись линейным приближением. В результате получим

$$w(\vec{a}^{\,l},\ t) \approx w(\vec{a}^{\,l-1},\ t) + \frac{\partial \omega(\vec{a}^{\,l-1},\ t)}{\partial a_1}\Delta a_1 + \ldots + \frac{\partial \omega(\vec{a}^{\,l-1},\ t)}{\partial a_4}\Delta a_4,\ \ i = \overline{1,N}. \quad (7)$$

Воспользовавшись соотношениями (5), представим выражение (7) равенством вида

$$w(\vec{a}^{\,l},\ t) \approx w\left(\vec{a}^{\,l-1},\ t_i\right) + W_1\left(\vec{a}^{\,l-1},\ t_i\right)\Delta a_1 + \ldots + W_4\left(\vec{a}^{\,l-1},\ t_i\right)\Delta a_4,\ \ i = \overline{1,4}. \quad (8)$$

Проанализировав равенство (8), легко увидеть следующее:

1) оно является линейным уравнением относительно поправок $\Delta\vec{a}^{\,l}$ при любых значениях аргумента *t*;

2) если функция $\omega(\vec{a}^{\,l-1},\ t)$ и функции чувствительности $W_i(\vec{a}^{\,l-1},\ t)$ известны, можно скомпилировать достаточно большое количество СЛАУ относительно поправок $\Delta\vec{a}^{\,l}$.

Одну из таких СЛАУ можно получить, если в качестве ее решения использовать поправки $\Delta\vec{a}^{\,l}$, являющиеся решением экстремальной задачи (4). Для этого достаточно: 1) заменить в (3) значения $\omega\left(\vec{a},\ t_i\right)$ правыми частями равенств (6); 2) вычислить производные полученной функции по поправкам $\Delta a_i^l,\ i = \overline{1,4},$ и производные $\partial S / da_i^l$ при этом приравнять нулю.

Выполнив все расчеты, получим СЛАУ вида

$$B\Delta\vec{a}^{\,l} = \Delta\omega^l, \quad (9)$$

где $\Delta\omega^l$ – четырехмерный вектор и матрица *B* размером 4×4, определяемые равенствами:

$$\Delta\omega^l = (W_l)^T \Delta\vec{a}^{\,l}; \quad (10)$$

$$B = (W_l)^T W_l, \quad (11)$$

где W_l – матрица, элементы которой вычисляются в соответствии с равенствами

$$w_{ij} = \frac{\partial\omega\left(a^{l-1},\ t_i\right)}{\partial a_j},\ \ i = \overline{1,N},\ \ j = \overline{1,4}. \quad (12)$$

Здесь w_{ij} – значения функций чувствительности W_j в момент времени t_i; *T* – символ операции транспонирования векторов и матриц.

Поскольку оценки $\vec{a}^{\,l-1}$ известны, заменим ими неизвестные коэффициенты уравнения (1), задав при этом начальные условия. В результате получим задачу Коши, для ее решения воспользуемся хорошо известным методом Рунге – Кутты. Этим же методом можно вычислить и функции чувствительности $W_i(\vec{a}^{\,l-1},\ t)$, $i = \overline{1,4}$, и, таким образом, получить все исходные данные, необходимые для формирования СЛАУ. Решив полученную СЛАУ, будем иметь поправки $\Delta\vec{a}^{\,l}$ и, воспользовавшись равенством (6), можем вычислить новые оценки $\vec{a}^{\,l}$. И на этом *l*-ю итерацию решения задачи (3) заканчиваем.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 4 приведены результаты экспериментальных исследований, характеризующие точность и работоспособность синтезированной математической модели; изображена зависимость скорости вращения вала насосного агрегата ω от времени t и соответствующая ей оценка, вычисленная с помощью предложенного алгоритма значения коэффициентов уравнения (1):

$$a_1 = -20{,}1492;\ a_2 = -297{,}1612;\ a_3 = 647{,}2839;\ a_4 = 1499{,}2696.$$

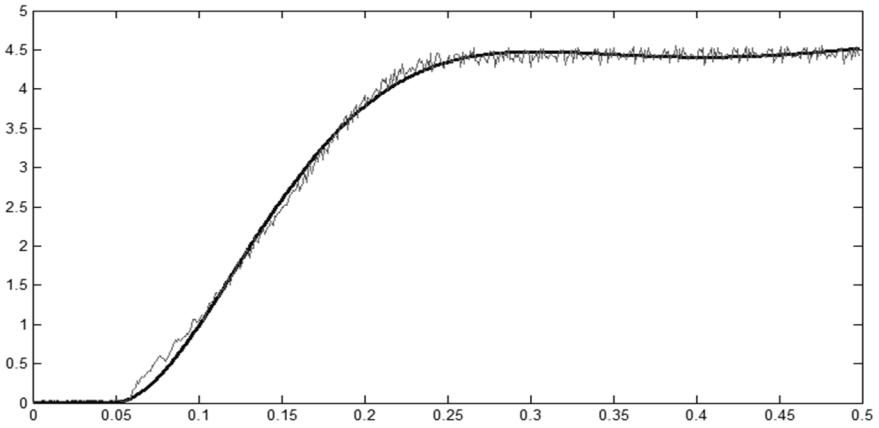


Рис. 4. Результаты моделирования по $u(t)$

Fig. 4. Simulation results for $u(t)$

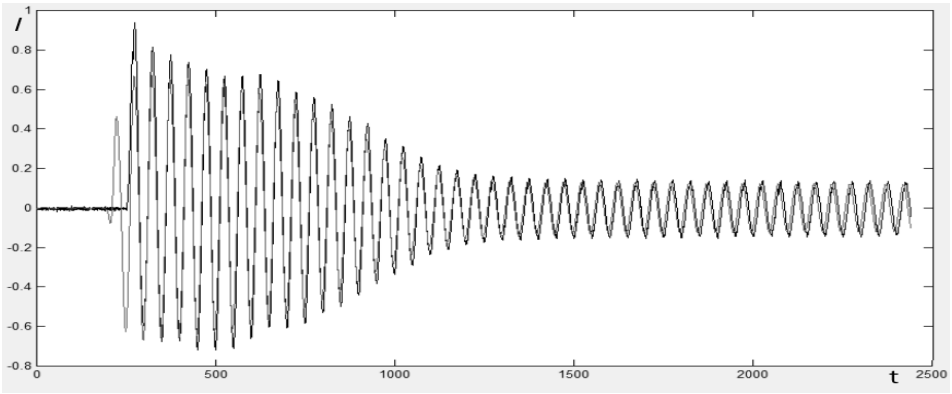


Рис. 5. Результаты моделирования по $i(t)$

Fig. 5. Simulation results for $i(t)$

Выбор дифференциального уравнения для моделирования токов статора приводного электродвигателя насосного агрегата осуществлялся исходя из тех же физических особенностей процесса и объекта, но применительно к данной конкретной задаче. Взяв за основу подход, описанный в предыдущем разделе, удалось построить математическую модель, которая с достаточной точностью

описывает токи статора приводного электродвигателя, результаты экспериментальных исследований для этой части работы приведены на рис. 5. Математическая модель при этом имела следующий вид:

$$\frac{d^2 i}{dt^2} = a_1 \frac{di}{dt} + a_2 i + a_3 u(t) + \varepsilon(t), \tag{13}$$

где a_1, a_2, a_3 – вычисляемые коэффициенты уравнения; $u(t)$ – переменное напряжение питание электродвигателя, которое при моделировании использовалось и как функция времени, и как единичная функция; $\varepsilon(t)$ – функция, характеризующая внешнее возмущение, задавалась с помощью специальной программы, генерирующей шумы с нормальным законом распределения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные выше результаты показывают, что предложенные метод и реализующий его численный алгоритм позволяют вполне успешно решать рассматриваемую задачу, и они пригодны для решения многих подобных прикладных задач, связанных с оцениванием параметров обыкновенных дифференциальных уравнений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Эйкхофф П.* Основы идентификации систем управления: оценивание параметров и состояния. – М.: Мир, 1975. – 680 с.

2. *Юревич Е.И.* Теория автоматического управления. – 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2016. – 560 с.

3. *Васин В.В.* Об устойчивом вычислении производной в пространстве C(−∞,∞) // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1973. – Т. 13, № 6. – С. 1383–1389.

4. *Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.* Методы решения некорректных задач. – 2-е изд. – М.: Наука, 1979. – 286 с.

5. *Фихтенгольц Г.М.* Основы математического анализа: учебник для вузов. В 2 ч. Ч. 1. – СПб.: Лань, 2001. – 440 с.

6. *Майстренко А.В.*, *Светлаков А.А.* Косвенное измерение расхода жидкости, перекачиваемой насосными агрегатами // Доклады ТУСУРа. – 2014. – № 4 (34). – С. 215–220.

7. *Майстренко А.В.*, *Светлаков А.А., Старовойтов Н.В.* Цифровое дифференцирование сигналов в реальном масштабе времени с применением скользящей квадратичной аппроксимации // Омский научный вестник. – 2006. – № 7 (43). – С. 110–113.

8. *Майстренко А.В.*, *Светлаков А.А., Старовойтов Н.В.* Цифровое дифференцирование сигналов на основе скользящей квадратичной аппроксимации и его применение в синтезе ПИД-регуляторов аппроксимации // Омский научный вестник. – 2016. – № 1 (145). – С. 73–77.

9. *Жабо В.В., Уваров В.В.* Гидравлика и насосы. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 327 с.

10. *Тихонов А.Н.* О некорректных задачах линейной алгебры и устойчивом методе их решения // Доклады Академии наук СССР. – 1965. – Т. 163, № 3. – С. 591–594.

11. *Майстренко А.В.*, *Светлаков А.А., Старовойтов Н.В.* Регуляризация простейшего алгоритма цифрового дифференцирования сигналов аппроксимации // Научный вестник НГТУ. – 2006. – № 4 (25). – С. 53–65.

12. *Майстренко А.В.*, *Светлаков А.А., Старовойтов Н.В.* Цифровое дифференцирование измеряемых сигналов с применением интегральных уравнений В. Вольтерра и его регуляризация // Омский научный вестник. – 2013. – № 2 (120). – С. 308–312.

13. *Томович Р.*, *Вукобратович М.* Общая теория чувствительности. – М.: Советское радио, 1972. – 240 с.

14. *Ильин В.А.* Основы математического анализа. В 2 ч. Ч. 1. – М.: Физматлит, 2005. – 648 с.

15. *Cruceanu S.* Regularisation pour les problemes a operateurs monotones et la methode de Galerkine // Commentationes Mathematicae Universitatis Carolinae. – 1971. – Vol. 12, N 1. – P. 1–13.

Майстренко Андрей Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Компьютерные системы в управлении и проектировании» Томского государственного университета автоматизированных систем управления и радиоэлектроники. Основное направление научных исследований – автоматизация технологических процессов. Имеет более 50 печатных работ и учебных пособий. E-mail: maestro67@mail.ru

Светлаков Анатолий Антонович, доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерные системы в управлении и проектировании» Томского государственного университета автоматизированных систем управления и радиоэлектроники. Основное направление научных исследований – автоматизация технологических процессов. Имеет более 200 печатных работ и учебных пособий. E-mail: svetlakov.38@mail.ru

Maistrenko Andrey V., PhD. (Eng.), associate professor at the Department of Computer Systems in Management and Design of Tomsk State University of Automated Control Systems and Radioelectronics. His research interests are currently focused on automation of technological processes. He has more than 50 publications and teaching manuals. E-mail: maestro67@mail.ru

Svetlakov Anatoly A., D.Sc. (Eng.), professor, Department of Computer Systems in Management and Design of Tomsk State University of Automated Control Systems and Radioelectronics. His research interests are currently focused on automation of technological processes. He has more than 200 publications and teaching manuals. E-mail: svetlakov.38@mail.ru

DOI: 10.17212/2782-2001-2022-1-83-92

Estimation of parameters of the differential equation describing the processes of starting and stopping the pumping unit[*]

A.V. MAISTRENKO[a], *A.A. SVETLAKOV*[b]

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40 Lenin Prospekt, Tomsk, 634050, Russian Federation

[a] *maestro67@mail.ru* [b] *svetlakov.38@mail.ru*

Abstract

This article presents the results of the study of various transient modes of the pumping unit of an oil pumping station, in particular, the stator currents of the drive motor and the speed characteristic of its rotor rotation. The characteristics of the pumping unit can change quite significantly during operation. This is due to the fact that the parameters of the pumped oil change almost continuously, physical wear of the parts of the pumping unit also occurs, and the impeller is especially susceptible to wear. The input and output variables of this object are, respectively, the time and the angular velocity of rotation of its rotor. The combination of the above factors has a significant impact on the change in the speed of rotation of the rotor during operation, which can adversely affect the operation of the system as a whole. In order to eliminate the influence of external factors on the operation of the pumping unit, the relationship between the input and output variables was described by an ordinary differential equation with constant coefficients. The purpose of this work is to illustrate the possibilities and "technology" of applying the sensitivity algorithm for estimating the parameters of a given equation and to show that the proposed method and the numerical algorithm that implements it allow us to quite successfully solve the problem under consideration and they are suitable for solving many similar applied problems related to estimation of parameters of ordinary differential equations.

Based on the results of the work, the proposed method and the numerical algorithm that implements it have shown their efficiency and can be further used to automate real control objects in various fields of science and technology.

Keywords: differential equation, sensitivity algorithm, metric, controlled object, asynchronous AC motor, mathematical model, extremal problem, rotor speed

[*] *Received 11 May 2021.*

REFERENCES

1. Eykhoff P. *System identification: parameter and state estimation*. London, John Wiley and Sons, 1974. 555 p. (Russ. ed.: Eikkhoff P. *Osnovy identifikatsii sistem upravleniya: otsenivanie parametrov i sostoyaniya*. Moscow, Mir Publ., 1975. 680 p.).

2. Yurevich E.I. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* [Theory of automatic control]. 4th ed., rev. St. Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2016. 560 p.

3. Vasin V.V. Ob ustoichivom vychislenii proizvodnoi v prostranstve C(−∞,∞) [The stable evaluation of a derivative in space C(−∞, ∞)]. *Zhurnal vychislitel'noi matematiki i matematicheskoi fiziki = USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 1973, vol. 13, no. 6, pp. 1383–1389. (In Russian).

4. Tikhonov A.N., Arsenin V.Ya. *Metody resheniya nekorrektnykh zadach* [Methods for solving ill-posed problems]. 2nd ed. Moscow, Nauka Publ., 1979. 286 p.

5. Fikhtengol'ts G.M. Osnovy matematicheskogo analiza. V 2 ch. Ch. 1 [Fundamentals of mathematical analysis. Pt. 1]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2001. 440 p.

6. Maistrenko A.V., Svetlakov A.A. Kosvennoe izmerenie raskhoda zhidkosti perekachivaemoi nasosnymi agregatami [The indirect measurement of oil flow rate, delivered with a pump unit]. *Doklady TUSUR = Proceedings of TUSUR University*, 2014, no. 4 (34), pp. 215–220.

7. Maistrenko A.V., Svetlakov A.A., Starovoitov N.V. Tsifrovoe differentsirovanie signalov v real'nom masshtabe vremeni s primeneniem skol'zyashchei kvadratichnoi approksimatsii [Digital differentiation of signals in real time with moving square approximation]. *Omskii nauchnyi vestnik = Omsk Scientific Bulletin*, 2006, no. 7 (43), pp. 110–113.

8. Maistrenko A.V., Svetlakov A.A., Starovoitov N.V. Tsifrovoe differentsirovanie signalov na osnove skol'zyashchei kvadratichnoi approksimatsii i ego primenenie v sinteze PID-regulyatorov approksimatsii [Digital differentiation signals based on moving quadratic approximation and its application in the synthesis of PID-regulators]. *Omskii nauchnyi vestnik = Omsk Scientific Bulletin*, 2016, no. 1 (145), pp. 73–77.

9. Jabo V.V., Uvarov V.V. *Gidravlika i nasosy* [Hydraulics and pumps]. 2nd ed., rev. Moscow, Energoatomizdat, 1984. 327 p.

10. Tikhonov A.N. O nekorrektnykh zadachakh lineinoi algebry i ustoichivom metode ikh resheniya [On incorrect problems of linear algebra and a stable method for their solution]. *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1965, vol. 163, no. 3, pp. 591–594. (In Russian).

11. Maistrenko A.V., Svetlakov A.A., Starovoitov N.V. Regulyarizatsiya prosteishego algoritma tsifrovogo differentsirovaniya signalov [Regularization of the elementary algorithm of digital differentiation of signals]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science Bulletin of the Novosibirsk State Technical University*, 2006, no. 4 (25), pp. 53–65.

12. Maistrenko A.V., Svetlakov A.A., Starovoitov N.V. Tsifrovoe differentsirovanie izmeryaemykh signalov s primeneniem integral'nykh uravnenii V. Vol'terra i ego regulyarizatsiya [Digital differentiation of measured signals with application of the integrated equations of V. Volterra and its regularization]. *Omskii nauchnyi vestnik = Omsk Scientific Bulletin*, 2013, no. 2 (120), pp. 308–312.

13. Tomović R., Vukobratović M. *Obshchaya teoriya chuvstvitel'nosti* [General sensitivity theory]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1972. 240 p. (In Russian).

14. Il'in V.A. *Osnovy matematicheskogo analiza*. V 2 ch. Ch. 1 [Fundamentals of mathematical analysis. In 2 pt. Pt. 1]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2005. 648 p.

15. Cruceanu S. Regularisation pour les problemes a operateurs monotones et la methode de Galerkine. *Commentationes Mathematicae Universitatis Carolinae*, 1971, vol. 12, no. 1, pp. 1–13. (In French).

Для цитирования:

Майстренко А.В., Светлаков А.А. Оценивание параметров дифференциального уравнения, описывающего процессы запуска и останова насосного агрегата // Системы анализа и обработки данных. – 2022. – № 1 (85). – С. 83–92. – DOI: 10.17212/2782-2001-2022-1-83-92.

For citation:

Maistrenko A.V., Svetlakov A.A. Otsenka parametrov differentsial'nogo uravneniya, opisyvayushchego protsessy zapuska i ostanova nasosnogo agregata [Estimation of parameters of the differential equation describing the processes of starting and stopping the pumping unit]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2022, no. 1 (85), pp. 83–92. DOI: 10.17212/2782-2001-2022-1-83-92.

ISSN 2782-2001
Системы анализа
и обработки данных
том 85, № 1, 2022, с. 93–108

http://journals.nstu.ru/vestnik
Analysis and data
processing systems
Vol. 85, No. 1, 2022, pp. 93–108

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND MANAGEMENT

УДК 621.865.8+62-503.53 DOI: 10.17212/2782-2001-2022-1-93-108

Полиномиальный метод синтеза регуляторов по задающему и возмущающим воздействиям*

В.Ю. ФИЛЮШОВ

630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет

filiushov.vladislav@gmail.com

Линейные объекты управления с одним входом и одним выходом (single input – single output, SISO) и объекты с несколькими входами и несколькими выходами (multi input – multi output, MIMO) имеют различные формализованные алгоритмы синтеза регуляторов. При этом объекты с неравным количеством входов и выходов во многих случаях строятся разработчиком интуитивно при изменении существующих алгоритмов расчета под каждый объект управления, поэтому разработка формализованного алгоритма расчета для такого типа объектов является актуальной. В рамках настоящей работы предлагается распространить методику синтеза для многоканальных объектов, которой является полиномиальная методика синтеза, на объекты с меньшим количеством входов по сравнению с количеством выходов, а именно на объекты с одним входом и несколькими выходами (single input – multi output, SIMO).

Приводится пример расчета электромеханической системы регулирования натяжения в зоне транспортирования материала поточной линии, которая имеет один вход – напряжение, подаваемое на электродвигатель, и пять выходов: ток якоря, скорость вращения вала электродвигателя, скорость вращения валка, натяжение в рассматриваемой зоне и упругий момент. Натяжение в рассматриваемой зоне является регулируемой координатой. Использование полиномиального метода синтеза для объектов с неквадратной матричной функцией позволило расположить полюса замкнутой системы в заданном положении, передаточная функция по заданию не содержит нулей. Также удалось задать нули замкнутой системы по возмущению таким образом, что получен астатизм второго порядка.

Ключевые слова: полиномиальный метод синтеза, полиномиальное матричное разложение, синтез, многоканальный регулятор, электромеханическая система, компенсация возмущений, астатизм, компенсация возмущений

* *Статья получена 18 августа 2021 г.*

ВВЕДЕНИЕ

Полиномиальный метод синтеза изначально применялся для объектов с одним входом и одним выходом, далее нашел свое развитие в синтезе многоканальных регуляторов, в работах [1–4] рассмотрены объекты с равным количеством входов и выходов. В работе [5] рассмотрено математическое описание, а также анализ областей применимости и вопросы синтеза объектов с избыточным вектором управления, которые относятся к объектам с большим количеством входов по сравнению с выходами. Целью настоящей работы является синтез регуляторов для объектов с неквадратной матричной передаточной функцией с меньшим количеством входов по сравнению с количеством выходов.

Возрастающие требования к качеству систем управления вынуждают использовать более продвинутые методы синтеза. Основными элементами производственного процесса являются электродвигатели различных производственных механизмов. Несмотря на повышение интенсификации производства, основными используемыми видами управления являются П, ПИ, ПИД-регуляторы, а также системы подчиненного регулирования [6], которые для относительно простых объектов невысокого порядка справляются с выполнением поставленных требований системы управления, но для более сложных объектов необходимо разрабатывать алгоритмы синтеза регуляторов, учитывающие внутренние связи объекта.

Одним из подходов, используемых для более сложных объектов, является метод аналитического синтеза систем с управлением по выходу и воздействиям (задающим и возмущающим) [7], который позволяет рассчитывать регуляторы для многоканальных объектов с использованием полиномиального матричного разложения матричных передаточных функций. Данный метод позволяет рассчитывать регуляторы для объектов с равным количеством входов и выходов, а также для объектов с одним входом и несколькими выходами. В работе [8] рассмотрен вопрос реализации селективной инвариантности системы управления объектом с одним входом и несколькими выходами к регулярным возмущениям. Это достигается за счет нахождения преобразования Лапласа регулярного возмущения и расчета регулятора с его учетом, что повышает точность синтезируемой системы. Для схожего объекта в работах [9–11] рассмотрен вопрос робастности системы управления, которая при модальном регуляторе заключается в выборе желаемого расположения полюсов системы в соответствии с полюсами и нулями объекта.

В работе [12] рассмотрен вопрос применения полиномиального метода синтеза для объектов с одним входом и несколькими выходами на примерах одного перевернутого маятника на тележке и двух перевернутых маятников на тележке. Задачей синтеза ставилась стабилизация нулевого положения маятников при перемещении тележки в заданное положение. Эта задача была успешна решена путем перехода от неквадратной матричной передаточной функции к полиномиальному разложению. В работах [13, 14] показано преобразование системы подчиненного регулирования к виду многоканальной системы, что позволило повысить порядок астатизма по возмущению после применения полиномиального метода синтеза.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Существуют различные виды описания объектов управления. По аналогии с [7] покажем процедуру перехода от описания объекта в пространстве состояний к описанию в виде полиномиального матричного разложения. В отличие от [7], объект имеет неравное количество входов и выходов. Рассмотрим многоканальный объект управления с количеством входов m и количеством выходов p, описываемый в пространстве состояний в виде, где для удобства последующих преобразований, в отличие от [7], где вектор возмущения разделен на две части (одна в уравнении состояний, другая в уравнении выхода), используем один вектор состояния для обоих уравнений:

$$\dot{x} = Ax + Bu + G_1 f\,, \qquad y = Cx + G_2 f\,, \tag{1}$$

где $x \in R^{n\times 1}$ – вектор состояния; $u \in R^{m\times 1}$ – вектор входа; $y \in R^{p\times 1}$ – вектор выхода; $f \in R^{r\times 1}$ – вектор неизмеряемых возмущений; n – порядок объекта; r – количество возмущений; $A \in R^{n\times n}$, $B \in R^{n\times m}$, $C \in R^{p\times n}$ – матрицы коэффициентов объекта; $G_1 \in R^{n\times r}$, $G_2 \in R^{p\times r}$ – матрицы коэффициентов возмущающих сигналов.

Выполним переход от записи объекта в пространстве состояний (1) к записи в операторном виде:

$$\begin{gathered} y(s) = W_u(s)u(s) + W_f(s)f(s), \\ W_u(s) = C(sI - A)^{-1}B, \qquad W_f(s) = C(sI - A)^{-1}G_1 + G_2, \end{gathered} \tag{2}$$

где $W_u(s) \in R(s)^{p\times m}$ – матричная передаточная функция (МПФ) между входом и выходом объекта; $W_f(s) \in R(s)^{p\times r}$ – МПФ между возмущением и выходом объекта; $R(s)^{p\times m}$ – множество матриц размером $p \times m$, элементы которых – рациональные функции от s с вещественными коэффициентами. Заметим, что при $p \neq m$ матрица $W_u(s)$ неквадратная.

Построим систему автоматического управления с двухпараметрическим регулятором [7], показанным на рис. 1, в которой задающее воздействие $v(s)$ имеет размерность, равную размерности вектора выхода p. При меньшем количестве входов по сравнению с количеством выходов некоторые элементы вектора задания необходимо сделать равными нулю, иными словами, не задавать вовсе. Помимо задающего воздействия присутствует возмущающее воздействие, которое влияет на вектор состояния и на выход, что показано в формуле (1).

Приведем уравнения замкнутой системы по заданию $W_y^v(s) = \left(I + W_u(s)R_2(s)\right)^{-1} W_u(s)R_1(s)$ и по возмущению $W_y^f(s) = \left(I + W_u(s) \times \right.$ $\left. \times R_2(s)\right)^{-1} W_f(s)$.

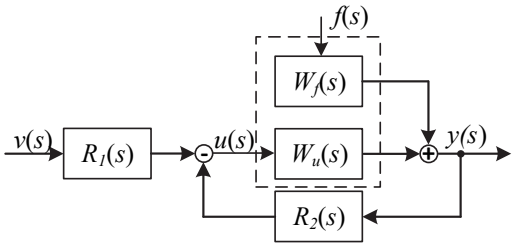


Рис. 1. Структурная схема «объект – регулятор»

Fig. 1. An object-controller structural scheme

Построение системы управления выполним с использованием полиномиальной методики синтеза [15]. Для этого необходимо найти полиномиальное матричное разложение матричной передаточной функции объекта и регулятора, то есть найти полиномиальное матричное описание (ПМО) объекта и регулятора. Это позволит представить многоканальную МПФ аналогично одноканальной с матричным «числителем»[1] и «знаменателем», что приводит к потере свойства коммутативности и необходимости использования двух вариантов записи разложения МПФ – левого и правого. У левого разложения «знаменатель» слева, у правого – справа. Например, для объекта и регулятора описания следующие:

$$W_u(s) = \tilde{D}^{-1}(s)\tilde{N}(s) = N(s)D^{-1}(s), \quad R_1(s) = \tilde{Y}^{-1}(s)\tilde{Z}(s) = Z(s)Y^{-1}(s),$$

$$R_2(s) = \tilde{Y}^{-1}(s)\tilde{X}(s) = X(s)Y^{-1}(s),$$

где $\tilde{D}(s) \in R[s]^{p\times p}$, $D(s) \in R[s]^{m\times m}$ – «знаменатели» полиномиального описания объекта; $\tilde{N}(s)$, $N(s) \in R[s]^{p\times m}$ – «числители»; $\tilde{Y}(s) \in R[s]^{m\times m}$, $Y(s) \in R[s]^{p\times p}$ – «знаменатели» полиномиального описания регулятора (для удобной записи замкнутых систем у обоих регуляторов «знаменатели» должны быть равны); $\tilde{Z}(s)$, $Z(s)$, $\tilde{X}(s)$, $X(s) \in R[s]^{m\times p}$ – «числители», знак «~» ставится над полиномиальной матрицей для обозначения принадлежности к левому полиномиальному описанию, $R[s]^{m\times p}$ – множество матриц размером $m \times p$, элементы которых – полиномы от s с вещественными коэффициентами. Полиномиальная матрица является полиномом с матричными коэффициентами. Например, дана некоторая полиномиальная матрица $M(s) \in R[s]^{q\times d}$, ее можно записать в виде $M(s) = \sum_{i=1}^{k} M_i s^i$, где k – старшая степень при s у элементов $M_i \in R^{q\times d}$ полиномиальной матрицы $M(s)$.

Покажем уравнения замкнутой системы по заданию и по возмущению в полиномиальном матричном описании для правого ПМО объекта и левого ПМО регулятора, которое далее будет использовано при расчете регуляторов

[1] У матричных передаточных функций нет числителя и знаменателя, но для введения аналогии с одноканальными системами эти термины используются в кавычках.

для объекта с меньшим количеством входов по сравнению с количеством выходов:

$$y_v(s) = N(s)C^{-1}(s)\tilde{Z}(s)v(s); \tag{3}$$

$$y_f(s) = (I - N(s)C^{-1}(s)\tilde{X}(s))N_f(s)D_f^{-1}(s)f(s), \tag{4}$$

где МПФ по возмущению разложена на $W_f(s) = N_f(s)D_f^{-1}(s)$, а матричное полиномиальное уравнение (МПУ) $C(s) = \tilde{Y}(s)D(s) + \tilde{X}(s)N(s)$ описывает уравнение характеристической матрицы, имеющей размер $m \times m$.

В матричном полиномиальном уравнении известными являются полиномиальные матрицы объекта и желаемая характеристическая матрица (задается из условий требований качества системы управления), а неизвестными – полиномиальные матрицы второго регулятора. В результате решения этого уравнения характеристическая матрица будет равна желаемой характеристической матрице, которая задается диагональной, тогда полюса замкнутой системы являются корнями полиномов диагональных элементов. Полученное решение может содержать свободные параметры (параметры регулятора, без которых решение МПУ – единственное), которые являются коэффициентами при операторе s в элементах полиномиальных матриц «числителя» и «знаменателя» регулятора, изменение которых не влияет на $C(s)$. Определенный выбор свободных параметров за счет изменения нулей позволяет достичь дополнительных требований к САУ (например, астатизм по заданию, компенсация возмущения, задание ограничения на структуру регулятора [16] и другие). В данном исследовании с помощью свободных параметров зададим знаменатель регулятора, содержащий элемент $Q(s) = (s^2 + \omega^2)$.

Задачей синтеза ставим выполнение следующих требований к замкнутой системе автоматического управления:

– задание требуемого расположения полюсов;

– астатизм по заданию $W_{y_p}^{v_p}(0) = 1$;

– астатизм по возмущению $\sum_{i=1}^{r} W_{y_p}^{f_i}(0) = 0$.

2. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СИНТЕЗА

Рассмотрим задачу требуемого расположения полюсов замкнутой системы. Объект имеет меньшее количество входов, чем выходов $(p > m)$, поэтому характеристическая матрица $C(s)$ имеет меньшую размерность по сравнению с $\tilde{C}(s)$. Для решения задачи расположения полюсов замкнутой системы следует решать МПУ, соответствующее меньшей характеристической матрице. Решим его:

$$C(s) = \tilde{Y}(s)D(s) + \tilde{X}(s)N(s). \tag{5}$$

Одним из способов решения уравнения (5) является переход к системе линейных алгебраических уравнений, где матрицей системы является матрица Сильвестра $\mathfrak{I}$ [17–20]

$$\mathfrak{R}\mathfrak{I} = \aleph, \tag{6}$$

где $\mathfrak{I} = \mathrm{diag}(G, G, ..., G)$, $G = \begin{pmatrix} D_k & D_{k-1} & \dots & D_1 & D_0 \\ N_k & N_{k-1} & \dots & N_1 & N_0 \end{pmatrix}$, $\aleph = \begin{pmatrix} C_{k+q} & C_{k+q-1} \dots C_0 \end{pmatrix}$, $\mathfrak{R} = \begin{pmatrix} Y_q & X_q & Y_{q-1} & X_{q-1} \dots Y_0 & X_0 \end{pmatrix}$, k – старшая степень полиномиальной матрицы «знаменателя» взаимно простого ПМО объекта, q – старшая степень полиномиальной матрицы «знаменателя» взаимно простого ПМО регулятора (порядок полиномиального регулятора). Если матрица Сильвестра квадратная и полного ранга, то система уравнений (6) имеет единственное решение. При большем количестве неизвестных параметров регулятора, чем требуется для решения матричного полиномиального уравнения, решение будет содержать свободные параметры. В этом случае необходимо выбрать один из базисных миноров (минор, определяющий ранг матрицы) матрицы Сильвестра $\mathfrak{I}_1$, составить матрицу основных параметров регулятора $\mathfrak{R}_1$, тогда система уравнений (6) преобразуется к виду $\mathfrak{R}_1\mathfrak{I}_1 + \overline{\mathfrak{R}}\overline{\mathfrak{I}} = \aleph$, где $\overline{\mathfrak{R}}$ – матрица свободных параметров регулятора, $\overline{\mathfrak{I}}$ – столбцы матрицы Сильвестра, не вошедшие в базисный минор. Следовательно, систему уравнений (6) можно переписать в виде $\mathfrak{R}_1\mathfrak{I}_1 = \aleph_1$, где $\aleph_1 = \aleph - \overline{\mathfrak{R}}\overline{\mathfrak{I}}$. Запишем общее решение:

$$\mathfrak{R}_1 = \aleph_1\mathfrak{I}_1^{-1}. \tag{7}$$

Как видим, основные параметры регулятора $\mathfrak{R}_1$ зависят от свободных $\overline{\mathfrak{R}}$, поэтому далее необходимо их определить. Самым простым решением является приравнивание их к нулю, тогда в регуляторе останутся только основные параметры. Но в этом случае нет возможности добиваться дополнительных свойств САУ, в рамках настоящей работы это второе и третье требования к поставленной задаче синтеза.

Для достижения астатизма по заданию необходимо из $\mathfrak{R}_1$ составить полиномиальные матрицы регулятора $\tilde{Y}(s)$ и $\tilde{X}(s)$, также «числитель» первого регулятора $\tilde{Z}(s)$ подставить в $y_v(s) = N(s)C^{-1}(s)\tilde{Z}(s)v(s)$, где $W_y^v(s) = N(s)C^{-1}(s)\tilde{Z}(s)$, далее для выполнения условия $W_{y_p}^{v_p}(0) = 1$ необходимо вычислить требуемые свободные параметры.

Для достижения астатизма по возмущению необходимо решить уравнение (4), где находятся такие свободные параметры регулятора, при которых среди корней полиномов числителей передаточных функций по возмущению были корни, равные нулю. Этого можно добиться, например, задавая коэффициенты при свободных членах полиномов равными нулю. Рассмотрим полином

$$w(s) = s^3 + w_2 s^2 + w_1 s + w_0.$$

При $w_0 = 0$ полином $w(s)$ имеет один нулевой корень $w(s) = \left(s^2 + w_2 s + w_1\right)s$.

3. РЕШЕНИЕ ЧИСЛЕННОГО ПРИМЕРА

Рассмотрим процесс синтеза регулятора полиномиальным методом для электромеханической системы регулирования натяжения в зоне транспортирования материала поточной линии [6, 8]. Эта система имеет один вход – напряжение u, подаваемое на электродвигатель, и четыре измеряемых выхода: ток якоря $i_{\text{я}}$, скорость вращения вала электродвигателя ω_1, скорость вращения валка ω_2, натяжение в рассматриваемой зоне F. Регулируемой величиной является натяжение F. На объект воздействуют три возмущения: момент сопротивления на вал электродвигателя $M_{\text{с}}$, скорость транспортирования V_1, натяжение в соседней зоне $F_{\text{с}}$. В работах [7, 8] натяжение $F_{\text{с}}$ содержит в себе постоянную составляющую и периодическую $F_{\text{с}}(s) = M_0 + M_1 \sin(\omega t)$ с частотой $\omega = \sqrt{0.125}$, которые компенсируются далее за счет построения системы управления с селективной инвариантностью к гармонической составляющей возмущения. В рамках настоящей работы такая задача решаться не будет, поэтому в этом случае $F_{\text{с}}(s) = M_0$. Если обозначить вектор состояния как $x = (i_{\text{я}}\ \omega_1\ M_{\text{у}}\ \omega_2\ F)^T$, где $M_{\text{у}}$ – упругий момент, а вектор возмущений как $f = (M_{\text{с}}\ V_1\ F_{\text{с}})$, то в пространстве состояний (1) исследуемый объект примет следующий вид:

$$A = \begin{pmatrix} -20 & -280 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0 & -0.357 & 0 & 0 \\ 0 & 2000 & 0 & -2000 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -205 & -2 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 200 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$G_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 5000 & 0 \end{pmatrix}, \quad G_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Численные значения матриц взяты из работы [7], но изменено математическое представление с теми же параметрами объекта, более удобными для последующего рассуждения. Для применения полиномиального метода синтеза необходимо найти полиномиальное разложение матричной передаточной функции объекта. Выполним переход по формуле (2) от описания объекта в пространстве состояний к описанию в виде МПФ, при «знаменателе» ПМО объекта $D(s) = s^5 + 22s^4 + 1094s^3 + 20388s^2 + 64560s + 56000$ получим МПФ вида

$$W_u(s) =$$

$$= (200s(s^2+914)(s+2)100(s^2+200)(s+2)20\ 000(s+2)4\ 100\ 000)^T D^{-1}(s).$$

$$W_f(s) = \begin{pmatrix} \dfrac{19\ 992}{s^4+20s^3+1054s^2+18\ 280s+28\ 000} & 0 & 0 \\ \dfrac{-0.2(357s+7140)}{s^4+20s^3+1054s^2+18\ 280s+28\ 000} & 0 & 0 \\ \dfrac{-0.1(s^3+20s^2+854s+14\ 280)}{s^4+20s^3+1054s^2+18\ 280s+28\ 000} & 0 & 0 \\ \dfrac{0.5(41s^3+820s^2+35\ 014s+585\ 480)}{s^5+22s^4+1094s^3+20\ 388s^2+64\ 560s+56\ 000} & \dfrac{5000}{s+2} & 1 \end{pmatrix}.$$

Объект управления имеет один вход $m=1$ и четыре выхода $p=4$, поэтому для задания полюсов замкнутой системы используем характеристическую матрицу $C(s)$ меньшей размерности. Для одного входа характеристическая матрица скалярная, т. е. является характеристическим полиномом. Для решения матричного полиномиального уравнения (5) найдем правое ПМО объекта, в данном случае $W_u(s) = N(s)D^{-1}(s)$, где «числитель» ПМО объекта

$$N(s) = (200s(s^2+914)(s+2)100(s^2+200)(s+2)20\ 000(s+2)4\ 100\ 000)^T.$$

Найдем решение ***первой поставленной задачи*** – задание требуемого расположения полюсов. Минимальный порядок полиномиального регулятора, необходимый для решения матричного полиномиального уравнения (5), – первый, т. е. $q=1$. Для того чтобы регулятор содержал полином $Q(s) = s^2 + \sqrt{\omega}$, его порядок должен быть вторым, т. е. $q=2$, что больше минимального и, следовательно, допустимо. Составим систему уравнений (6) при порядке объекта («знаменатель» ПМО скалярный, поэтому его порядок совпадает с порядком объекта) $k=5$ и порядке регулятора $q=2$:

$$D_5=1,\quad D_4=22,\quad D_3=1094,\quad D_2=20\,388,\quad D_1=64\,560,\quad D_0=56\,000;$$

$$N_5=\begin{pmatrix}0\\0\\0\\0\end{pmatrix},\quad N_4=\begin{pmatrix}200\\0\\0\\0\end{pmatrix},\quad N_3=\begin{pmatrix}400\\100\\0\\0\end{pmatrix},\quad N_2=\begin{pmatrix}182\,800\\200\\0\\0\end{pmatrix},$$

$$N_1=\begin{pmatrix}365\,600\\20\,000\\20\,000\\0\end{pmatrix},\quad N_0=10^5\begin{pmatrix}0\\0.4\\0.4\\-41\end{pmatrix}.$$

Составим матрицу Сильвестра $\Im = \mathrm{diag}(G,G,G)$. Матрица коэффициентов регулятора $\Re = \left(\tilde{Y}_2\ \tilde{X}_2\ \tilde{Y}_1\ \tilde{X}_1\ \tilde{Y}_0\ \tilde{X}_0\right)$, $\tilde{Y}_i = \tilde{y}_i^{1,1}$, $\tilde{X}_i = \left(\tilde{x}_i^{1,1}\quad \tilde{x}_i^{1,2}\quad \tilde{x}_i^{1,3}\quad \tilde{x}_i^{1,4}\right)$, где $i = 0,1,2$. Характеристический полином замкнутой системы седьмого порядка $k+n=7$, зададим его с кратными корнями $C(s) = (s+q)^7$, тогда

$$\aleph = (1\ \ 7q\ \ 21q^2\ \ 35q^3\ \ 35q^4\ \ 21q^5\ \ 7q^6\ \ q^7).$$

В системе уравнений (6) матрица Сильвестра $\Im$ имеет размер 15×8, а ее ранг равен $\mathrm{rank}(\Im) = 8$, поэтому она содержит семь линейно зависимых строк, которые соответствуют свободным параметрам регулятора в матрице $\Re$. Так как матрица Сильвестра содержит линейно зависимые строки, то найдем общее решение матричного полиномиального уравнения (5) путем перехода к решению системы линейных алгебраических уравнений (7). Для этого выберем один из возможных базисных миноров (например, состоящий из строк $\{1, 2, 5, 7, 10, 12, 13, 15\}$), тогда

$$\Im_1 = \begin{array}{c|} 1 \\ 2 \\ 5 \\ 7 \\ 10 \\ 12 \\ 13 \\ 15 \end{array} \left\| \begin{pmatrix} 1 & 22 & 1094 & 20388 & 64560 & 56000 & 0 & 0 \\ 0 & 200 & 400 & 182800 & 365600 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -4100000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 200 & 400 & 182800 & 365600 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -4100000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 200 & 400 & 182800 & 365600 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 100 & 200 & 20000 & 40000 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -4100000 \end{pmatrix} \right.,$$

где для наглядности слева от матрицы показаны номера строк $\Im$. Тогда матрица линейно зависимых строк будет следующая:

$$\overline{\Im} = \begin{array}{c|} 3 \\ 4 \\ 6 \\ 8 \\ 9 \\ 11 \\ 14 \end{array} \left\| \begin{pmatrix} 0 & 0 & 100 & 200 & 20000 & 40000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 20000 & 40000 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 22 & 1094 & 20388 & 64560 & 56000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 100 & 200 & 20000 & 40000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 20000 & 40000 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 22 & 1094 & 20388 & 64560 & 56000 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 20000 & 40000 \end{pmatrix} \right..$$

Матрица коэффициентов регулятора

$$\Re = \left(y_2^{1,1}\ x_2^{1,1}\ x_2^{1,2}\ x_2^{1,3}\ x_2^{1,4}\ y_1^{1,1}\ x_1^{1,1}\ x_1^{1,2}\ x_1^{1,3}\ x_1^{1,4}\ y_0^{1,1}\ x_0^{1,1}\ x_0^{1,2}\ x_0^{1,3}\ x_0^{1,4}\right).$$

Составим из нее матрицы основных и свободных параметров регулятора

$$\Re_1 = \left(y_2^{1,1}\ x_2^{1,1}\ x_2^{1,4}\ x_1^{1,1}\ x_1^{1,4}\ x_0^{1,1}\ x_0^{1,2}\ x_0^{1,4} \right),\ \ \overline{\Re} = \left(x_2^{1,2}\ x_2^{1,3}\ y_1^{1,1}\ x_1^{1,2}\ x_1^{1,3}\ y_0^{1,1}\ x_0^{1,3} \right).$$

В качестве части свободных параметров были выбраны $y_1^{1,1}$ и $y_0^{1,1}$ целенаправленно для того, чтобы была возможность задать полюса знаменателю регулятора в соответствии с $Q(s)$.

Так как $Q(s) = s^2 + \omega$, а знаменатель регулятора равен $Y(s) = y_2^{1,1} s^2 + y_1^{1,1} s + y_0^{1,1}$, то для их равенства необходимо взять при $y_2^{1,1} = 1$ свободные параметры $y_1^{1,1} = 0$ и $y_0^{1,1} = \omega$. Таким образом, получим $Y(s) = Q(s)$. Подставим в $\overline{\Re}$ найденные свободные параметры знаменателя регулятора, тогда

$$\overline{\Re} = \left(x_2^{1,2}\ x_2^{1,3}\ 0\ x_1^{1,2}\ x_1^{1,3}\ \omega\ x_0^{1,3} \right).$$

Далее решим уравнение (7), в результате получим регулятор со свободными параметрами, который подставим в (5) и получим желаемую характеристическую матрицу $C(s) = (s+q)^7$. Сам регулятор, зависящий от свободных параметров, приводить не будем из-за громоздкости. Полученный регулятор решает первую поставленную задачу, а именно выполняет требуемое расположение полюсов в замкнутой системе.

Найдем решение ***второй задачи*** – астатизм по заданию. В уравнении (3) неизвестным является только числитель регулятора в прямой связи $Z(s)$, который зададим таким образом, чтобы числитель передаточной функции между четвертым заданием и четвертым выходом равнялся единице $num\left(W_{y_4}^{v_4}(s) \right) = 1$. Так как знаменатель регулятора $R_1(s)$ уже известен и равен $Y(s)$, то числитель найдем из вектора-столбца $N(s)C^{-1}(s)$, где элемент четвертой строки и первого столбца равен $-4\,100\,000 C^{-1}(s)$, тогда при $Z(s) = \left(0 \quad 0 \quad 0 \quad -4\,100\,000^{-1} q^7 \right)^T$ получим $num\left(W_{y_4}^{v_4}(s) \right) = 1$. Полученный регулятор решает задачу астатизма по заданию.

Найдем решение ***третьей задачи*** – астатизм по возмущению. В матрице коэффициентов свободных параметров $\overline{\Re}$ осталось пять неиспользуемых свободных параметров, откуда можно предположить, что удастся изменить пять коэффициентов в числителях трех передаточных функций по возмущению. Матричная передаточная функция по возмущению может быть получена по формуле (4). Полиномы числителей передаточных функций по возмущению и четвертому выходу запишем в следующем виде: $num\left(W_{f_j}^{y_4}(s) \right) = \sum_{i=0}^{n_j} w_i^{f_k} s^i$, где $n_1 = 5,\ n_2 = n_3 = 7.$

Составим систему линейных алгебраических уравнений, состоящую из младших коэффициентов полиномов числителей $w_i^{f_k}$:

$$\begin{cases} w_1^{f1} = 0 \to 1\,024\,590q^3 - 1\,229\,508q^2 - 186\,475\,380q + \\ + 53\,278\,680 - 2\,927\,400x_1^{1,2} = 0, \\ w_1^{f2} = 0 \to 10^7 \left(\begin{array}{l} 7q^4 - 14q^3 - 3822q^2 + 18\,6343.2 + \\ + 20x_0^{1,3} + 14\,280x_2^{1,2} - 4000x_2^{1,3} \end{array} \right) = 0, \\ w_1^{f3} = 0 \to 10^3 \left(\begin{array}{l} 14q^4 - 28q^3 - 7644q^2 + 5096q + \\ + 372\,686.4 + 40x_0^{1,3} + 28\,560x_2^{1,2} \end{array} \right) = 0, \\ w_0^{f1} = 0 \to 1435q^4 - 2870q^3 - 168\,756q^2 + 112\,504q + \\ + 7\,462\,656 - 82 \cdot 10^4 x_2^{1,3} = 0, \\ w_0^{f2} = 0 \to 10^5 \left(\begin{array}{l} 350q^4 + 2499q^3 - 194\,938.8q^2 - 45\,818q + \\ + 9\,483\,508 + 1000x_0^{1,3} - 7140x_1^{1,2} + \\ +2000x_1^{1,3} + 714\,000x_2^{1,2} - 200\,000x_2^{1,3} \end{array} \right) = 0, \\ w_0^{f3} = 0 \to 20 \left(\begin{array}{l} 350q^4 + 2499q^3 - 194\,938.8q^2 - \\ -45\,818q + 9\,483\,508 + 1000x_0^{1,3} - \\ -7140x_1^{1,2} + 2000x_1^{1,3} + 714\,000x_2^{1,2} - 200\,000x_2^{1,3} \end{array} \right) = 0. \end{cases}$$

В полученной системе уравнений пятое и шестое уравнения линейно зависимы. Решив ее, получим

$$x_2^{1,2} = 0.21q^2 - 0.14q - 10.5,$$

$$x_2^{1,3} = 5 \cdot 10^{-5}(35q^4 - 70q^3 - 4116q^2 + 2744q + 182\,016),$$

$$x_1^{1,2} = 7 \cdot 10^{-2}(5q^3 - 6q^2 - 910q + 260), \quad x_1^{1,3} = -x_1^{1,2}, \quad x_0^{1,3} = 0.$$

Таким образом, получен астатизм второго порядка по всем возмущениям. Астатизм по заданию и возмущению является решением третьей поставленной

задачи. Приведем передаточные функции синтезированных регуляторов, которые для краткости приведены в следующем виде:

$$Z(s)=\begin{pmatrix}Z_1(s) & Z_2(s) & Z_3(s) & Z_4(s)\end{pmatrix},\quad X(s)=\begin{pmatrix}X_1(s) & X_2(s) & X_3(s) & X_4(s)\end{pmatrix},$$

где $Z_1(s)=Z_2(s)=Z_3(s)=0$, $Z_4(s)=-4\,100\,000^{-1}q^7$,

$$X_1(s)=200^{-1}((22-7q)s^2+(s+20)\omega),$$

$$X_2(s)=-0.07((-3q^2+2q+150)s^2+(-5q^3+6q^2+910q-260)s+20\omega),$$

$$X_3(s)=\frac{(7(5q^4-10q^3-588q^2+392q)+182\,016)s^2-7\cdot10^3(q^3-1.2q^2-182q+52)s}{20\,000},$$

$$X_4(s)=-41^{-1}10^{-5}((21q^5-70q^4+140q^3-168q^2+112q-32)s^2+7q^6s+q^7).$$

Ниже приведем структурную схему синтезированной системы управления в среде Matlab Simulink, показанную на рис. 2. Реакцию на задание проверим, подав на вход v_4 единичный ступенчатый сигнал. На входы, соответствующие возмущающим сигналам, подадим единичные ступенчатые сигналы, а также линейно нарастающие сигналы.

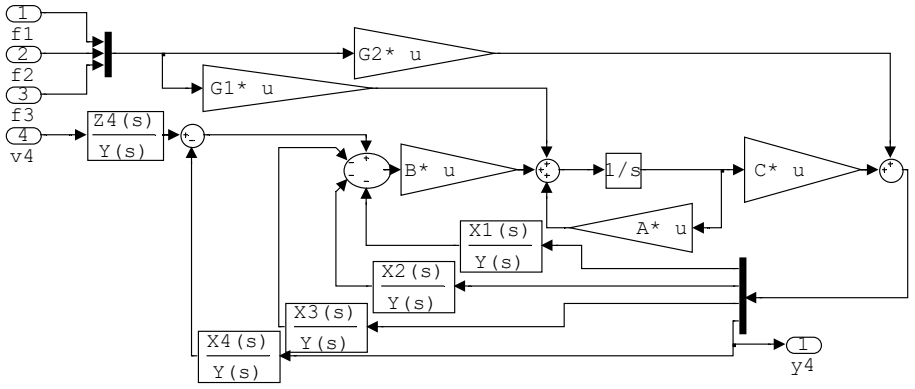
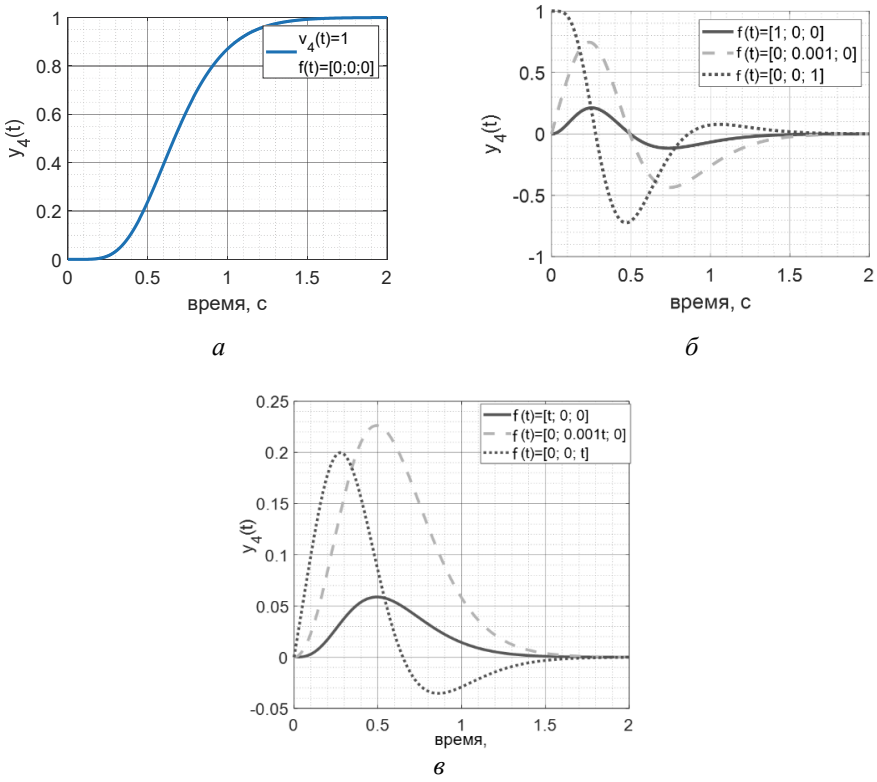


Рис. 2. Структурная схема синтезированной системы управления в пакете Matlab Simulinnk

Fig. 2. Structural scheme of the control system synthesized in the Matlab Simulink package

Приведем графики переходных процессов синтезированной системы автоматического управления при кратных вещественных полюсах на удалении от мнимой оси, равном $q=10$.

На рис. 3 показаны графики переходных процессов. На рис. 3, *б* видно, что достигнут астатизм по задающему сигналу, на рис. 3, *б*, *в* – что достигнут астатизм второго порядка по всем трем возмущениям. Следовательно, все поставленные задачи были выполнены.



а *б* *в*

Рис. 3. Реакция выхода $y_4(s)$ на задающее и возмущающее воздействия:

а – реакция на единичный ступенчатый сигнал задания; *б* – реакция на ступенчатый сигнал возмущения; *в* – реакция на линейно возрастающий сигнал возмущения

Fig. 3. Output response $y_4(s)$ to reference and disturbing signals:

a – response to a unit reference step signal; *b* – response to a step by step disturbing signal; *c* – response to a ramp disturbing signal

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен синтез системы автоматического управления электромеханической системы регулирования натяжения в зоне транспортирования материала поточной линии с применением полиномиального метода синтеза для объектов с меньшим количеством входов по сравнению с количеством выходов. Это позволило рассчитать регулятор второго порядка, обеспечивающий астатизм по заданию и астатизм второго порядка по возмущению. Для этого синтезируемая система управления рассматривалась как многоканальная с четырьмя заданиями v_1, v_2, v_3, v_4 и четырьмя выходами y_1, y_2, y_3, y_4. При этом регулируемой величиной был только выход y_4 – натяжение в зоне транспортирования, а задания – $v_1 = v_2 = v_3 = 0$. Четыре сигнала задания при одной регулируемой величине обусловлены применением методики синтеза регуляторов, разработанной для многоканальных объектов, к одноканальному объекту, что позволяет учитывать внутренние связи объекта более полно и повышать качественные характеристики

системы управления. Передаточная функция по заданию на натяжение не содержит нулей, а полюса – кратные в соответствии с желаемыми. Передаточные функции по всем возмущениям содержат по два корня полиномов числителя, равных нулю, что придает системе астатизм второго порядка по возмущению. Также все регуляторы получены аналитически и имеют явную зависимость от переменной q, определяющей желаемое расположение кратных полюсов замкнутой системы, что позволяет изменить динамические параметры системы управления без дополнительных расчетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Воевода А.А., Чехонадских А.В., Шоба Е.В.* Модальный метод синтеза с использованием полиномиального разложения: разделение движений при стабилизации трехмассовой системы // Научный вестник НГТУ. – 2011. – № 2 (43). – С. 39–46.

2. *Шоба Е.В.* Модальный метод синтеза многоканальных динамических систем с использованием полиномиального разложения: дис. … канд. техн. наук: 05.13.01. – Новосибирск, 2013. – 192 с.

3. *Вороной В.В.* Полиномиальный метод расчета многоканальных регуляторов пониженного порядка: дис. … канд. техн. наук: 05.13.01. – Новосибирск, 2013. – 173 с.

4. *Бобобеков К.М*. Полиномиальный метод синтеза многоканальных регуляторов с использованием матрицы Сильвестра: дис. … канд. техн. наук: 05.13.01. – СПб., 2019. – 168 с.

5. *Малышенко А.М.* Системы автоматического управления с избыточной размерностью вектора состояния. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 302 с.

6. *Шрейнер Р.Т.* Системы подчиненного регулирования электроприводов. В 2 ч. Ч. 1. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 1997. – 279 с.

7. *Гайдук А.Р.* Теория и методы аналитического синтеза систем автоматического управления (полиномиальный подход). – М.: Физматлит, 2012. – 360 с.

8. *Гайдук А.Р.* Синтез селективно инвариантных систем // Вестник ИГЭУ. – 2017. – № 1. – С. 46–54.

9. *Тютиков В.В., Тарарыкин С.В.* Робастное модальное управление технологическими объектами. – Иваново: ИГЭУ, 2006. – 255 с.

10. *Тарарыкин С.В., Тютиков В.В*. Робастное модальное управление динамическими системами // Автоматика и телемеханика. – 2002. – № 5. – С. 41–55.

11. Модальное управление взаимосвязанными электроприводами с упругими звеньями и зазорами в кинематических передачах / В.А. Иванков, С.В. Тарарыкин, В.В. Тютиков, Е.В. Красильникъянц // Вестник ИГЭУ. – 2006. – № 3. – С. 43–48.

12. *Воевода А.А., Филюшов В.Ю. Шипагин В.И.* Полиномиальный метод синтеза регуляторов для частного случая многоканальных объектов с одной входной переменной и несколькими выходными // Безопасность цифровых технологий. – 2021. – № 3 (102). С. 21–42. – DOI: 10.17212/2782-2230-2021-3-21-42.

13. *Воевода А.А., Филюшов В.Ю.* Многоконтурная система подчиненного регулирования в многоканальном неквадратном представлении // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2021. – № 2 (76). – С. 90–101.

14. *Voevoda A.A., Filiushov V.Yu., Bobobekov K.M*. Polynomial matrix and multiloop control methods synthesis comparation for a DC Drive // 2021 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – Sochi, Russian Federation, 2021. – P. 917–923.

15. *Воевода А.А., Филюшов В.Ю.* Полиномиальное матричное разложение при синтезе неквадратных САУ // Системы анализа и обработки данных. – 2021. – № 1 (81). – С. 21–38.

16. *Воевода А.А., Вороной В.В*. Полиномиальный метод расчета многоканальных регуляторов заданной структуры // Научный вестник НГТУ. – 2013. – № 2 (51). – С. 214–218.

17. *Chen C.T.* Linear system theory and design. – 2nd ed. – New York: Oxford University Press, 1999. – 334 p.

18. *Vidyasagar M.* Control system synthesis: a factorization approach. Pt. 1. – San Rafael, CA: Morgan and Claypool Publ., 2011. – 184 p.

19. *Vidyasagar M.* Control system synthesis: a factorization approach. Pt. 2. – San Rafael, CA: Morgan and Claypool Publ., 2011. – 227 p.

20. *Antsaklis P.J., Michael A.N.* Linear systems. – New York: McGraw-Hill, 1997. – 670 p.

Филюшов Владислав Юрьевич, ассистент Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – синтез многоканальных систем. Имеет более 30 печатных работ. E-mail: filiushov.vladislav@gmail.com

Filyushov Vladislav Yu., teaching assistant, Novosibirsk State Technical University. His research interests include multichannel systems synthesis. He has more than 30 publications. E-mail: filiushov.vladislav@gmail.com

DOI: 10.17212/2782-2001-2022-1-93-108

The polynomial method of controller synthesis based on reference and disturbing signals[*]

V.Yu. FILIUSHOV

Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

filiushov.vladislav@gmail.com

Abstract

Linear controlled objects with one input and one output (single input - single output, SISO), and objects with multiple inputs and multiple outputs (multi-input – multi-output, MIMO) have different formalized controller synthesis algorithms. At the same time, objects with an unequal number of inputs and outputs, in many cases, are built by the developer intuitively, when changing the existing calculation algorithms for each control object, therefore, the development of a formalized calculation algorithm for this type of objects is relevant. Within the framework of this work, it is proposed to extend the synthesis technique for multichannel objects, which is the polynomial synthesis technique, to objects with a smaller number of inputs compared to the number of outputs, namely, to objects with one input and several outputs (single input – multi-output, SIMO).

The reasoning developed in the work is an example of calculating an electromechanical tension control system in the material transportation zone of the production line, which has one input – the voltage supplied to the electric motor and four outputs–- the armature current, the rotation speed of the electric motor shaft, the rotation speed of the roll, the tension in the zone under consideration and the elastic moment. The tension in the considered zone is an adjustable coordinate. The use of the polynomial synthesis method for objects with a non-square matrix function made it possible to place the poles of a closed system in a given position, and the transfer function does not contain zeros according to the assignment. It was also possible to set the disturbance-stimulated zeros of the closed system in such a way that a second-order astatism is obtained.

Keywords: polynomial synthesis method, polynomial matrix decomposition, synthesis, multichannel controller, electromechanical system, disturbing rejection, astatism, disturbing compensation

REFERENCES

1. Voevoda A.A., Chekhonadskikh A.V., Shoba E.V. Modal'nyi metod sinteza s ispol'zovaniem polinomial'nogo razlozheniya: razdelenie dvizhenii pri stabilizatsii trekhmassovoi sistemy [Modal synthesis method using a polynomial decomposition: the separation of motions in the stabilization of the three-mass plant]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2011, no. 2 (43), pp. 39–46.

2. Shoba E.V. *Modal'nyi metod sinteza mnogokanal'nykh dinamicheskikh sistem s ispol'zovaniem polinomial'nogo razlozheniya*. Diss. kand. tekhn. nauk [The modal method for the synthesis of multichannel dynamic systems using a polynomial expansion. PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2013. 192 p.

3. Voronoi V.V. *Polinomial'nyi metod rascheta mnogokanal'nykh regulyatorov ponizhennogo poryadka*. Diss. kand. tekhn. nauk [Design of multi-channel reduced degree controllers. PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2013. 173 p.

4. Bobobekov K.M. *Polinomial'nyi metod sinteza mnogokanal'nykh regulyatorov s ispol'zovaniem matritsy Sil'vestra*. Diss. kand. tekhn. nauk [Polynomal control method for multi-channel dynamic system by Silvester matrix. PhD eng. sci. diss.]. St. Petersburg, 2019. 168 p.

[*] *Received 18 August 2021.*

5. Malyshenko A.M. *Sistemy avtomaticheskogo upravleniya s izbytochnoi razmernost'yu vektora upravleniya* [Automatic control systems with redundant dimension of control vector]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2005. 302 p.

6. Shreiner R.T. *Sistemy podchinennogo regulirovaniya elektroprivodov*. V 2 ch. Ch. 1 [Subordinate control systems. In 2 pt. Pt. 1]. Ekaterinburg, UGTU-UPI Publ., 1997. 279 p.

7. Gaiduk A.R. *Teoriya i metody analiticheskogo sinteza sistem avtomaticheskogo upravleniya (polinomial'nyi podkhod)* [The theory and methods of analytical synthesis of automatic control systems (polynomial approach)]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2012. 360 p.

8. Gaiduk A.R. Sintez selektivno invariantnykh sistem [Design of selectively invariant control systems]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta = Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*, 2017, no. 1, PP. 46–54.

9. Tyutikov V.V., Tararykin S.V. *Robastnoe modal'noe upravlenie tekhnologicheskimi ob"ektami* [Robust modal control of the technological plants]. Ivanovo, ISPU Publ., 2006. 255 p.

10. Tararykin S.V., Tyutikov V.V. A robust model control for dynamic systems. *Automation and Remote Control*, 2002, vol. 63, no. 5, pp. 730–742. DOI: 10.1023/A:1015489719323. Translated from *Avtomatika i telemekhanika*, 2002, no. 5, pp. 41–55.

11. Ivankov V.A., Tararykin S.V., Tyutikov V.V., Krasilnikyants E.V. Modal'noe upravlenie vzaimosvyazannymi elektroprivodami s uprugimi zven'yami i zazorami v kinematicheskikh peredachakh [Modal control of interconnected electrical drives with bumping links and gaps in kinematic transmissions]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta = Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*, 2006, no. 3, pp. 43–48.

12. Voevoda A.A., Filiushov V.Yu., Shipagin V.I. Polinomial'nyi metod sinteza regulyatorov dlya chastnogo sluchaya mnogokanal'nykh ob"ektov s odnoi vkhodnoi peremennoi I neskol'kimi vykhodnymi [Polynomial method for the synthesis of regulators for the special case of multichannel objects with one input variable and several output values]. *Bezopasnost' tsifrovykh tekhnologii = Digital Technology Security*, 2021, no. 3 (102), pp. 21–42. DOI: 10.17212/2782-2230-2021-3-21-42.

13. Voevoda A.A., Filyushov V.Yu. Mnogokonturnaya sistema podchinennogo regulirovaniya v mnogokanal'nom nekvadratnom predstavlenii [Multiloop subordinate control system in the non-square multivariable representation]. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Ryazan State Radio Engineering University*, 2021, no. 2 (76), pp. 90–101.

14. Voevoda A.A., Filiushov V.Yu., Bobobekov K.M. Polynomial matrix and multiloop control methods synthesis comparation for a DC Drive // 2021 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, Russian Federation, 2021, pp. 917–923.

15. Voevoda A.A., Filiushov V.Yu. Polinomial'noe matrichnoe razlozhenie pri sinteze nekvadratnykh SAU [Polynomial matrix decomposition for the synthesis of non-square control systems]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2021, no. 1 (81), pp. 21–38.

16. Voevoda A.A., Voronoi V.V. Polinomial'nyi metod rascheta mnogokanal'nykh regulyatorov zadannoi struktury [Polynomial method for calculating multi-channel controllers of a given structure]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2013, no. 2 (51), pp. 214–218.

17. Chen C.T. *Linear system theory and design*. 2nd ed. New York, Oxford University Press, 1999. 334 p.

18. Vidyasagar M. *Control system synthesis: a factorization approach*. Pt. 1. San Rafael, CA, Morgan and Claypool Publ., 2011. 184 p.

19. Vidyasagar M. *Control system synthesis: a factorization approach*. Pt. 2. San Rafael, CA, Morgan and Claypool Publ., 2011. 227 p.

20. Antsaklis P.J., Michael A.N. *Linear systems*. New York, McGraw-Hill, 1997. 670 p.

Для цитирования:

Филюшов В.Ю. Полиномиальный метод синтеза регуляторов по задающему и возмущающим воздействиям // Системы анализа и обработки данных. – 2022. – № 1 (85). – С. 93–108. – DOI: 10.17212/2782-2001-2022-1-93-108.

For citation:

Filiushov V.Yu. Polinomial'nyi metod sinteza regulyatorov po zadayushchemu i vozmushchayushchim vozdeistviya [The polynomial method of controller synthesis based on reference and disturbing signals]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2022, no. 1 (85), pp. 93–108. DOI: 10.17212/2782-2001-2022-1-93-108.

ISSN 2782-2001
Системы анализа и обработки данных
том 85, № 1, 2022, с. 109–120

http://journals.nstu.ru/vestnik
Analysis and data processing systems
Vol. 85, No. 1, 2022, pp. 109–120

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS, COMPPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

УДК 621.391.812.4 DOI: 10.17212/2782-2001-2022-1-109-120

Метод цифровых водяных символов для совершенствования объектов на базе кластеров и значения восприятия*

П.М. ШОНАЗАРОВ[1,a], Ф.Т. ХОЛОВ[2,b], Б.Б. САИДОВ[1,c]

[1] *454080, РФ, г. Челябинск, пр. Ленина, 86, Южно-Уральский государственный университет*
[2] *634050, РФ, г. Томск, пр. Ленина, 40, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники*

[a] *shonazarov1991@gmail.com* [b] *fozil_1990-90@mail.ru* [c] *mathem.1994@mail.ru*

Одна из наиболее важных проблем в области IoT – ограничения ресурсов, такие как источник питания, вычислительная мощность, объем памяти, диапазон беспроводной связи и ширина полосы беспроводной связи. Беспроводная маршрутизация с низкой пропускной способностью требует нескольких шагов для достижения пункта назначения. Интернет вещей (Internet of things, IoT) – это технология, которая состоит из набора объектов, подключенных через Интернет, и собирает информацию, генерируемую датчиками; IoT – это устройства, которые подключены в сеть и доступны «любому и ко всему» в любое время и в любом месте. Примерами таких устройств могут быть датчики температуры, датчики движения, датчики сердечного ритма, датчики энергопотребления и т. д. Например, датчик температуры может быть встроен в термостат, показатель количества потребляемой электроэнергии в домах и датчик уличного движения на светофоре. В этой статье предлагается схема, основанная на хрупком водяном знаке и улучшенной кластеризации, чтобы разрешить конфликт между безопасностью и ограниченными ресурсами уровня восприятия. Для повышения безопасности мы разрабатываем стратегию стохастического позиционирования, основанную на алгоритме кластеризации, чтобы вычислить положение, встроенное во временную динамику измерения данных. Таким образом, уязвимости безопасности, создаваемые стационарной встроенной ситуацией, могут не только эффективно устраняться, но и приводить к нулевому нарушению данных. Результаты исследований показывают, что предложенный алгоритм может эффективно обеспечивать интеграцию «недорогих» данных, а также снизить энергопотребление и увеличить время жизни сети.

Ключевые слова: интернет вещей, IoT, цифровая маркировка, цифровые водяные знаки, безопасность, передача данных, множественная маршрутизация, алгоритм кластеризации, временная динамика

* *Статья получена 03 сентября 2021 г.*

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных проблем в интернете вещей (IoT) является безопасность и конфиденциальность. Быстрое принятие IoT как неотъемлемой части повседневной жизни и открытость вызывает обеспокоенность в отношении безопасности независимых объектов, которые имеют функцию обмена данными для выполнения личных или коллективных задач [1–3]. Интернет вещей – это технология, которая состоит из набора объектов, связанных через Интернет, и собирает информацию, генерируемую датчиками. Все датчики отправляют информацию в контрольные блоки назначения для принятия решений на основе этой информации. Вполне возможно, что в ближайшем будущем будет большой объем взаимосвязей между компьютерами и другим электронным оборудованием, которые взаимосвязаны и обмениваются информацией через Интернет, тем самым уменьшая вмешательство человека [4–7].

В этой статье мы в основном рассматриваем защиту данных восприятия и беспроводные сенсорные сети (WSN) как уровень восприятия IoT. Беспроводные сенсорные сети организованы большим количеством микродатчиков с ограниченной вычислительной мощностью и малым зарядом батареи для формирования самоорганизующейся сети в беспроводной связи. Предложенный алгоритм водяного знака обеспечивает целостность данных и может эффективно предотвращать различные атаки, вызванные вредоносными узлами. Кроме того, предложенный алгоритм эффективно решает недостатки существующих технологий, такие как энергопотребление. Данный алгоритм сохраняет больше энергии, чем алгоритмы LSB и MultiMark, повышает эффективность аутентификации и безопасность, обеспечивает обратимое извлечение водяного знака.

Одной из наиболее важных проблем в области IoT являются ограничения ресурсов, такие как источник питания, вычислительная мощность, объем памяти, диапазон беспроводной связи и ширина полосы беспроводной связи. Беспроводная маршрутизация с низкой пропускной способностью требует нескольких шагов маршрутизации для достижения пункта назначения. Низкая вычислительная мощность и ограничения памяти на устройствах IoT требуют максимально возможной оптимизации процесса маршрутизации. Низкая пропускная способность связи создает ограничение: размер прямых пакетов должен быть небольшим. Из-за дефицита энергоснабжения будет трудно решить, какой узел будет двигаться дальше, потому что беспроводная связь будет определять потребление энергии устройствами IoT [8, 9]. На рис. 1 показана структура мониторинга энергии на основе интернета вещей.

Рис. 1. Структура IoT на уровне восприятия

Fig. 1. The structure of the IoT at the perception level

Уровень восприятия также указывается в этой форме. Этот простой уровень узлов сталкивается с серьезными проблемами безопасности, которые привлекают внимание большинства исследователей. Главная особенность функции уровня восприятия состоит в том, чтобы понимать информацию. Восприятие информации основано на приложениях IoT, которые генерируют информацию из физического мира. Таким образом, уровень восприятия является основной проблемой в области IoT.

1. ТЕХНОЛОГИЯ ЦИФРОВЫХ ВОДЯНЫХ ЗНАКОВ

Информация о восприятии играет важную роль в качестве связующего звена между IoT и реальным миром, состоящим из данных о восприятии и данных о местоположении. Раскрытие данных о восприятии может привести к раскрытию важной информации по всей сети, что приведет к непоправимым последствиям. Чтобы устранить недостатки традиционных методов аутентификации интеграции данных, исследователи внедрили технологию цифровых водяных знаков (ЦВЗ) в WSN для защиты целостности данных [9]. Технология ЦВЗ широко используется для защиты информации об авторских правах и интеграции контента цифровых мультимедийных произведений (изображений, аудио и видео и т. д.) [10]. По сравнению с традиционной технологией шифрования технология ЦВЗ имеет четыре преимущества:

1) ЦВЗ использует легкие вычисления, что приводит к низкому энергопотреблению;

2) информация о водяных знаках напрямую интегрируется в данные без дополнительных затрат на сетевую связь и емкость хранилища узлов в WSN;

3) методы шифрования теряют свое действие после дешифрования, но ЦВЗ остаются как неотъемлемая часть носителя и всегда могут гарантировать безопасность данных [11–15];

4) технология ЦВЗ может значительно уменьшить сквозную задержку, вызванную технологией шифрования.

В этой статье также используется кластеризация для сенсорной сети. Кластеризация относится к группированию выборок или наблюдений в классы похожих объектов. Кластер – это набор выборок, которые похожи друг на друга и отличаются от других выборок кластера. Кластеризация не пытается прогнозировать, оценивать или классифицировать выборки. Вместо этого алгоритмы кластеризации стремятся разбить все выборки на подгруппы или кластеры так, чтобы сходство между выборками в максимальном кластере и сходство с выборками в другом кластере было минимальным.

Кластеризация важна для интеллектуального анализа данных, группировки, принятия решений и машинного обучения, включая интеллектуальный анализ данных, поиск информации, сегментацию изображений и классификацию шаблонов. Кроме того, в тех случаях, когда базовых знаний о данных и принятии решений (статистических моделях) мало, кластеризация может дать предположения о данных.

Следует отметить, что кластеризация процессов является тематической в том смысле, что сходные наборы данных для разных задач часто классифицируются как разные кластеры. Это делает кластеризацию сложной проблемой, и поэтому только один алгоритм не подходит для решения каждой проблемы кластеризации. Кластеризация также может использоваться в качестве шага предварительной обработки для извлечения классов шаблонов.

Благодаря функциям контратаки цифровую маркировку можно разделить на хрупкую маркировку и стойкую маркировку [16]. Хрупкая маркировка не устойчива к изменениям и может использоваться для защиты авторских прав. Хрупкая маркировка очень чувствительна к манипуляциям, и любое изменение в носителе может привести к неадекватной маркировке, которая может быть использована для проверки данных [17]. В этой статье мы представляем хрупкую технику маркировки. Предложенный алгоритм динамически вычисляет внедренную позицию сигнала, используя время сбора данных от узлов датчиков, что не только повышает безопасность, но также экономит энергию и проверку данных в реальном времени.

2. ПРЕДЛАГАЕМЫЙ ПЛАН

По сравнению с проводными сетями WSN, развертываемые в жестких условиях, подвергаются большей угрозе, и, кроме того, протокол общедоступной связи, принятый WSN, увеличивает риск физических манипуляций. Воспринимающий узел обладает вычислительной мощностью и ограниченными энергетическими ресурсами, что увеличивает недостаток при разработке протоколов безопасности. Мы суммируем основные модели атак на пять категорий.

1. Манипулирование пакетами: злонамеренный узел добавляется к пакетам WSN и отправляет манипулированные пакеты, что в некоторых случаях может иметь очень серьезные последствия.

2. Подделка пакетов: злонамеренный узел, добавленный в WSN, продолжает отправлять поддельные пакеты другим узлам, значительно увеличивая сетевой трафик и, таким образом, тратя всю энергию WSN.

3. Выборочный транспорт: злонамеренный узел, добавленный в WSN, удаляет частичные пакеты и передает некоторые пакеты в пункт назначения. Потеря информации может привести к плохой ситуации, когда узел приемника не может предоставить правильный ответ.

4. Распределение пакетов: злонамеренный узел, добавленный в WSN, передает пакеты, отправленные один или несколько раз, на другие узлы, вызывая перегрузку и потерю энергии.

5. Задержка при передаче: злонамеренный узел, добавленный в WSN, доставляет пакеты позже заданного времени, что приводит к тому, что узел приемника покидает пакеты.

3. МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЙ

В настоящей статье представлена новая стратегия защиты целостности данных WSN, основанная на хрупких методах цифровой разметки. Этот алгоритм сначала делит данные зондирования на группы одинакового размера (количество, которого не могут достичь данные зондирования) по отношению к определителю; создает последовательность SN для каждой группы и помещает ее в группу с целью определения функции удаления или добавления групп. Цифровая запись была получена с помощью хэш-функции (HASH) через ключ K, групповые данные и серийный номер группы. Чтобы предотвратить повторную атаку, алгоритм помещает текущую группу в предыдущую группу,

а затем объединяет все группы с цифровой маркировкой. Предлагается алгоритм, основанный на хрупкой цифровой разметке, для защиты данных датчиков от вышеуказанных категорий моделей атак. Предложенный алгоритм использует признаки, которые являются хрупкой маркировкой, чувствительной к модификации. После изменения данных хоста отметка печати исчезает. Вредоносные узлы не могут эффективно извлекать реальные данные без предварительного знания алгоритмов маркировки. Манипулирование данными и подмена данных схожи, и их можно рассматривать как вредоносные данные, генерируемые вредоносными узлами. Предложенный алгоритм вводит порядковый номер пакета SN, который используется для определения местоположения добавленных или удаленных пакетов. Алгоритм маркировки состоит из трех процессов, а именно: создание цифрового знака, внедрение цифрового знака и извлечение цифрового знака, как показано на рис. 2. На первом этапе каждый узел датчика собирает данные датчика и выдает цифровой сигнал в соответствии с алгоритмом хрупкой маркировки. Затем разметка объединяется с данными датчика по заранее заданному правилу, чтобы сформировать пакет данных, который передается на узел приемника через узел передачи.

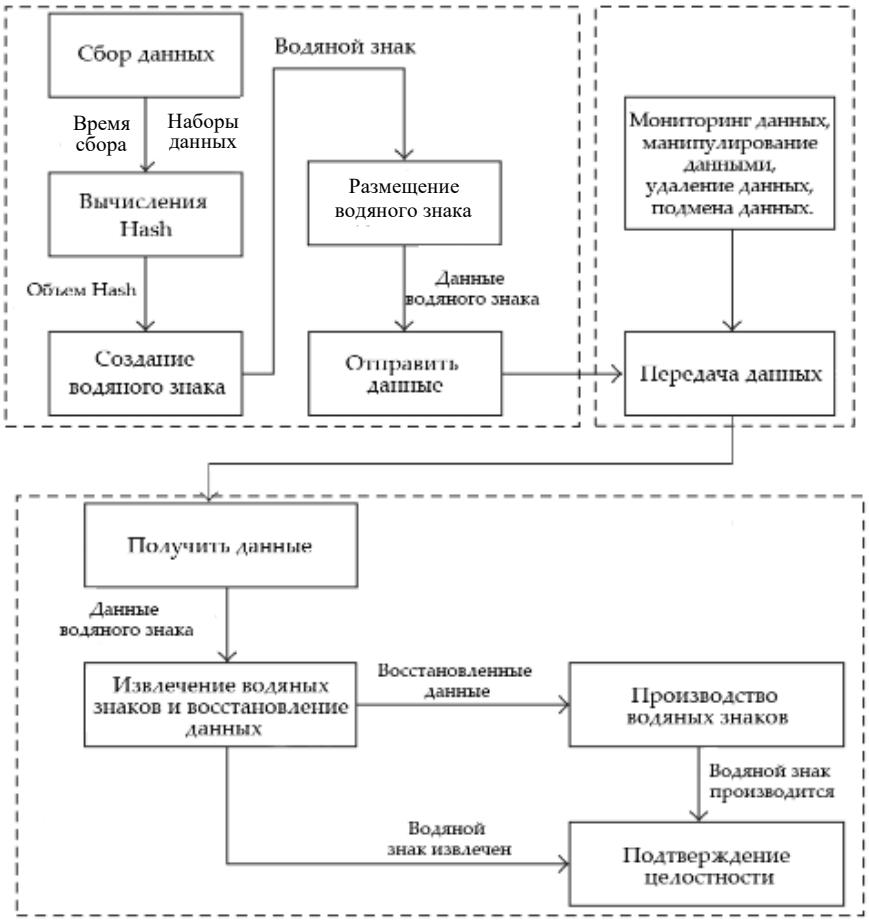


Рис. 2. Модель реализации предложенного алгоритма хрупкой маркировки

Fig. 2. An implementation model of the proposed fragile marking algorithm

Пакет может столкнуться с ненадежной передачей и различными типами атак. Затем узел приемника принимает данные, извлекает водяной знак и обнаруженные данные в соответствии с предопределенным правилом.

Существует также общий процесс кластеризации для беспроводной сенсорной сети.

1. Отображение шаблонов, которые обычно включают выделение или извлечение атрибута.

2. Определение метрики оценки аналогично определению области данных.

3. Процесс кластеризации или группировки.

4. Суммирование данных при необходимости.

5. Проверка системы.

На рис. 3 показаны первые три шага этого процесса, включая обратную связь с результатами кластеризации на первых двух шагах.

Шаблоны представляют количество классов, количество доступных выборок, а также количество, тип и масштаб объектов в алгоритме кластеризации. Обратите внимание, что часть этой информации не контролируется пользователем.

Рис. 3. Процесс кластеризации для беспроводной сенсорной сети

Fig. 3. The clustering process for a wireless sensor network

Выбор функций – это процесс определения подмножества наиболее эффективных функций кластеризации и извлечения функций, процесс изменения некоторых существующих функций и создания новых функций. Оба этих метода предназначены для достижения правильного набора функций и повышения эффективности кластеризации.

Близость выборок обычно измеряется функцией расстояния между парой входных шаблонов. Простой критерий измерения, такой как евклидово расстояние, обычно используется, чтобы показать несоответствие между двумя образцами, а другие критерии оценки также могут быть использованы для определения концептуального сходства между образцами [5].

4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование было проведено в среде MathLab 2017a. Результаты моделирования показаны на рис. 4. Этот рисунок наглядно демонстрирует превосходство предложенного алгоритма с точки зрения пропускной способности по сравнению с методами Multi-Marker и LSB. Встраивание с самой низкой разметкой битов (LSB), представленное в [19, 20], не только ограничивает емкость встраивания, но также нарушает целостность данных, что крайне опасно для высокоточных приложений. Метод множественных меток в [18] может гарантировать точность данных, но количество пустых символов ограничено, что уменьшает емкость разметки.

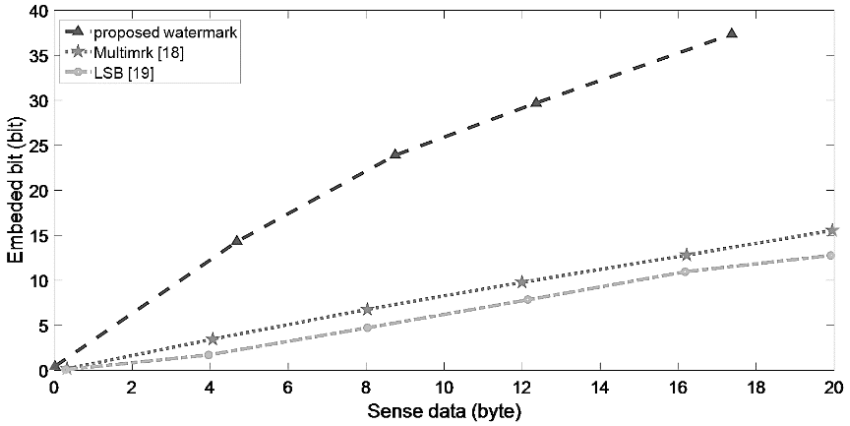


Рис. 4. Водяной знак встроенной емкости

Fig. 4. A built-in tank watermark

На рис. 5 показана диаграмма энергопотребления, которая четко показывает, что предлагаемый алгоритм сохраняет больше энергии, чем алгоритмы LSB и MultiMark.

На рис. 6 показано количество узлов для беспроводной сенсорной сети. Видно, что предлагаемый способ на основе кластеризации и водяного знака имеет больше узлов.

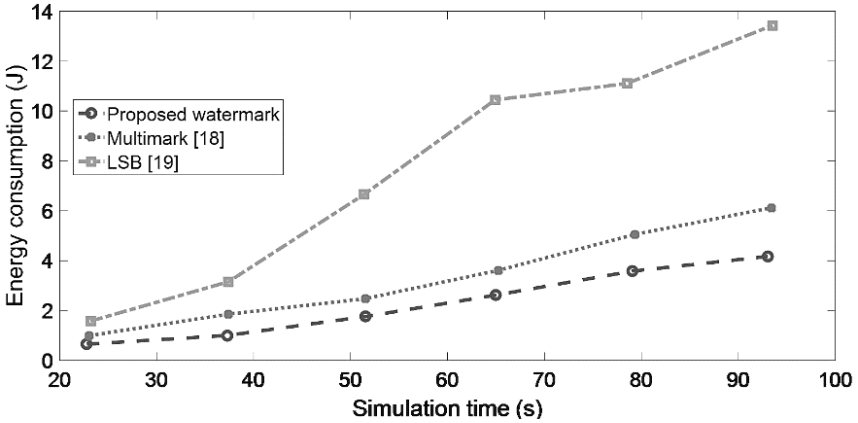


Рис. 5. Диаграмма энергопотребления

Fig. 5. A power consumption diagram

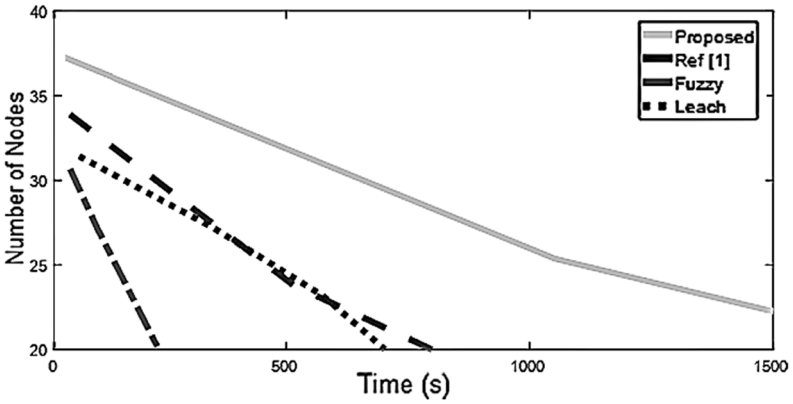


Рис. 6. График количества узлов

Fig. 6. Graph of the number of nodes

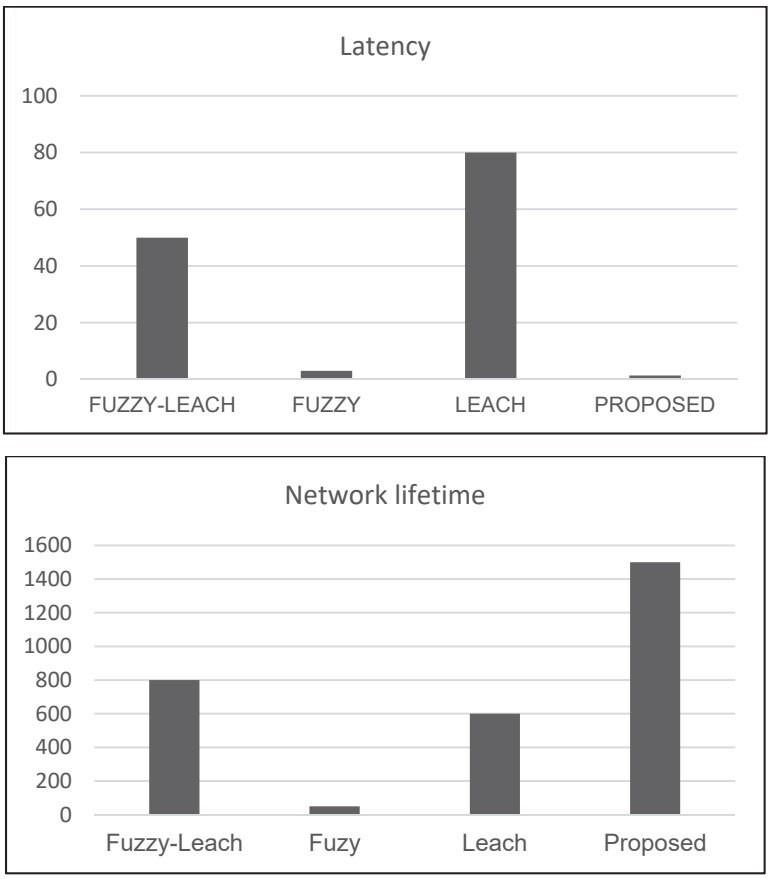


Рис. 7. Диаграмма задержки и времени жизни сети

Fig. 7. Network latency and lifetime diagram

График задержки и времени жизни сети показан на рис. 7. Результаты показывают, что предлагаемый способ имеет меньшую задержку и более длительный срок службы WSN.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этой статье представлен усовершенствованный алгоритм цифровой разметки, а также новый алгоритм кластеризации для интеграции данных уровня восприятия IoT, улучшения энергопотребления и времени жизни сети. Предложенный алгоритм может эффективно предотвращать различные атаки, такие как спуфинговые атаки, атаки с пересылкой пакетов, атаки с манипулированием пакетами, атаки с повторением пакетов и атаки с задержкой пакетов из-за вредоносных узлов. Кроме того, предлагаемый алгоритм эффективно устраняет недостатки существующих технологий. Это не только упрощает вычислительную сложность и повышает эффективность и безопасность, но также обеспечивает обратимое извлечение из маркировки и поиска без данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tolibovich K.F., Aleksandrovich S.A., Mahmadnazarovich S.P.* A new algorithm watermark for improving objects based on clusters and perceptions // 2020 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT). – Yekaterinburg, Russia, 2020. – P. 520–523. – DOI: 10.1109/USBEREIT48449.2020.9117762.

2. Blockchain for IoT security and privacy: the case study of a smart home / A. Dorri, S.S. Kanhere, R. Jurdak, P. Gauravaram // 2017 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops). – Kona, HI, USA, 2017. – P. 618–623. – DOI: 10.1109/PERCOMW.2017.7917634.

3. *Dorri A., Kanhere S.S., Jurdak R.* Towards an optimized blockchain for IoT // 2017 IEEE/ACM Second International Conference on Internet-of-Things Design and Implementation (IoTDI). – Pittsburgh, PA, USA, 2017. – P. 173–178.

4. Fuzzy comprehensive evaluation method for energy management systems based on an internet of things / Y. Li, Z. Sun, L. Han, N. Mei // IEEE Access. – 2017. – Vol. 5. – P. 21312–21322. – DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2728081.

5. *Yuan D., Kanhere S.S., Hollick M.* Instrumenting wireless sensor networks a survey on the metrics that matter // Pervasive and Mobile Computing. – 2017. – Vol. 37. – P. 45–62. – DOI: 10.1016/j.pmcj.2016.10.001.

6. *Lee I., Lee K.* The internet of things (IoT): applications, investments, and challenges for enterprises // Business Horizons. – 2015. – Vol. 58 (4). – P. 431–440. – DOI: 10.1016/j.bushor.2015.03.008.

7. *Jeba N., Kamala V.* A survey on routing protocols for internet of things // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. – 2016. – Vol. 3 (5). – P. 1993–1996.

8. Review of the present technologies concurrently contributing to the implementation of the internet of things (IoT) paradigm: RFID, green electronics, WPT and energy harvesting / L. Roselli, C. Mariotti, P. Mezzanotte, F. Alimenti, G. Orecchini, M. Virili, N.B. Carvalho // 2015 IEEE Topical Conference on Wireless Sensors and Sensor Networks (WiSNet). – San Diego, CA, 2015. – P. 1–3. – DOI: 10.1109/WISNET.2015.7127402.

9. *Maghfur H.* A state of the art review on the internet of things (IoT) // Buletin Inovasi ICT and Ilmu Komputer. – 2015. – Vol. 2 (1).

10. *Bouaziz M., Rachedi A.* A survey on mobility management protocols in Wireless Sensor Networks based on 6LoWPAN technology // Computer Communications. – 2016. – Vol. 74. – P. 3–15. – DOI: 10.1016/j.comcom.2014.10.004.

11. *Truong C., Römer K.* Efficient geocasting to multiple regions in large-scale wireless sensor networks // 37th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks. – Clearwater Beach, FL, 2012. – P. 453–461. – DOI: 10.1109/LCN.2012.6423661.

12. *Fei C., Kundur D., Kwong R.H.* Analysis and design of secure watermark-based authentication systems // IEEE Transactions on Information Forensics and Security. – 2006. – Vol. 1 (1). – P. 43–55. – DOI: 10.1109/TIFS.2005.863505.

13. Digital watermarking and steganography / I. Cox, M. Miller, J. Bloom, J. Fridrich. – Morgan Kaufmann, 2007.

14. Watermarking security: a survey / L. Pérez-Freire, P. Comesaña, J.R. Troncoso-Pastoriza, F. Pérez-González // Transactions on Data Hiding and Multimedia Security I. – Berlin; Heidelberg: Springer, 2006. – P. 41–72. – DOI: 10.1007/11926214_2.

15. *Li W., Song H., Zeng F.* Policy-based secure and trustworthy sensing for internet of things in smart cities // IEEE Internet of Tings Journal. – 2018. – Vol. 5 (2). – P. 716–723. – DOI: 10.1109/JIOT.2017.2720635.

16. *Li W., Song H.* ART: an attack-resistant trust management scheme for securing vehicular ad hoc networks // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2016. – Vol. 17 (4). – P. 960–969. – DOI: 10.1109/TITS.2015.2494017.

17. *Anbuchelian S., Lokesh S., Baskaran M.* Improving security in Wireless Sensor Network using trust and metaheuristic algorithms // Proceedings of the 3rd International Conference on Computer and Information Sciences, ICCOINS 2016. – Kuala Lumpur, Malaysia, 2016. – P. 233–241. – DOI: 10.1109/ICCOINS.2016.7783220.

18. *Feng J., Potkonjak M.* Real-time watermarking techniques for sensor networks // Security and Watermarking of Multimedia Contents V. – SPIE, 2003. – P. 391–402. – DOI: 10.1117/12.479736.

19. *Guo H., Li Y., Jajodia S.* Chaining watermarks for detecting malicious modifications to streaming data // Information Sciences. – 2007. – Vol. 177 (1). – P. 281–298.

20. *Kamel I., Juma H.* Simplified watermarking scheme for sensor networks // International Journal of Internet Protocol Technology. – 2010. – Vol. 5 (1). – P. 101–111.

Шоназаров Парвиз Махмадназарович, аспирант кафедры инфокоммуникационных технологий Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск. E-mail: shonazarov1991@gmail.com

Холов Фозил Толибович, аспирант кафедры защиты информации Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. E-mail: Fozil_1990-90@mail.ru

Саидов Бехруз Бдридинович, аспирант кафедры инфокоммуникационных технологий Южно-Уральского государственного университета, г. Челябинск. E-mail: mathem.1994@mail.ru

Shonazarov Parviz M., postgraduate student at the Department of Infocommunication Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk. E-mail: shonazarov1991@gmail.com

Kholov Fozil T., postgraduate student at the Department of Information Security, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. E-mail: Fozil_1990-90@mail.ru

Saidov Bekhruz B., postgraduate student at the Department of Infocommunication Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk. E-mail: mathem.1994@mail.ru

DOI: 10.17212/2782-2001-2022-1-109-120

The method of digital watermarking for improving objects based on clusters and perception values[*]

P.M. SHONAZAROV [1,a], *F.T. KHOLOV* [2,b], *B.B. SAIDOV* [1,c]

[1] *South Ural State University, 86 Lenin Prospekt, Chelyabinsk, 454080, Russian Federation*
[2] *Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40 Lenin Prospekt, Tomsk, 634050, Russian Federation*

[a] *shonazarov1991@gmail.com* [b] *fozil_1990-90@mail.ru* [c] *mathem.1994@mail.ru*

Abstract

One of the most important IoT concerns is resource constraints such as power supply, processing power, memory capacity, wireless range, and wireless bandwidth. Low bandwidth wireless routing requires multiple routing steps to reach a destination. The Internet of things (Internet of things, IoT) is a technology that consists of a set of objects that are connected via the Internet

[*] *Received 03 September 2021.*

and collect information generated by sensors. IoT devices are devices that are networked and accessible to anyone and everything anytime and anywhere. Examples of such devices include temperature sensors, motion sensors, heart rate sensors, energy consumption sensors, etc. For example, a temperature sensor can be built into a thermostat, an indicator of the amount of electricity consumed in homes, and a traffic sensor at a traffic light. This article proposes a scheme based on fragile watermarking and improved clustering to resolve the conflict between security and limited perceptual resources. To improve security, we are developing a stochastic positioning strategy based on a clustering algorithm to compute the position embedded in the temporal dynamics of the data measurement. Thus, security vulnerabilities created by a stationary embedded situation can not only be effectively addressed but also result in zero data disturbance. Our research results show that the proposed algorithm can effectively integrate low-cost data, as well as reduce power consumption and increase network life.

Keywords: Internet of Things, IoT, digital marking, digital watermarking, security, data transmission, multiple routing, clustering algorithm, temporal dynamics

REFERENCES

1. Tolibovich K.F., Aleksandrovich S.A., Mahmadnazarovich S.P. A new algorithm watermark for improving objects based on clusters and perceptions. *2020 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT)*, Yekaterinburg, Russia, 2020, pp. 520–523. DOI: 10.1109/USBEREIT48449.2020.9117762.

2. Dorri A., Kanhere S.S., Jurdak R., Gauravaram P. Blockchain for IoT security and privacy: the case study of a smart home. *2017 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops)*, Kona, HI, USA, 2017, pp. 618–623. DOI: 10.1109/PERCOMW.2017.7917634.

3. Dorri A., Kanhere S.S., Jurdak R. Towards an optimized blockchain for IoT. *2017 IEEE/ACM Second International Conference on Internet-of-Things Design and Implementation (IoTDI)*, Pittsburgh, PA, USA, 2017, pp. 173–178.

4. Li Y., Sun Z., Han L., Mei N. Fuzzy compre-hensive evaluation method for energy management systems based on an internet of things. *IEEE Access*, 2017, vol. 5, pp. 21312–21322. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2728081.

5. Yuan D., Kanhere S.S., Hollick M. Instrumenting wireless sensor networks a survey on the metrics that matter. *Pervasive and Mobile Computing*, 2017, vol. 37, pp. 45–62. DOI: 10.1016/j.pmcj.2016.10.001.

6. Lee I., Lee K. The internet of things (IoT): applications, investments, and challenges for enterprises. *Business Horizons*, 2015, vol. 58 (4), pp. 431–440. DOI: 10.1016/j.bushor.2015.03.008.

7. Jeba N., Kamala V. A survey on routing protocols for internet of things. *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*, 2016, vol. 3 (5), pp. 1993–1996.

8. Roselli L., Mariotti C., Mezzanotte P., Alimenti F., Orecchini G., Virili M., Carvalho N.B. Review of the present technologies concurrently contributing to the implementation of the internet of things (IoT) paradigm: RFID, green electronics, WPT and energy harvesting. *2015 IEEE Topical Conference on Wireless Sensors and Sensor Networks (WiSNet)*, San Diego, CA, 2015, pp. 1–3. DOI: 10.1109/WISNET.2015.7127402.

9. Maghfur H. A state of the art review on the internet of things (IoT). *Buletin Inovasi ICT and Ilmu Komputer*, 2015, vol. 2 (1).

10. Bouaziz M., Rachedi A. A survey on mobility management protocols in Wireless Sensor Networks based on 6LoWPAN technology. *Computer Communications*, 2016, vol. 74, pp. 3–15. DOI: 10.1016/j.comcom.2014.10.004.

11. Truong C., Römer K. Efficient geocasting to multiple regions in large-scale wireless sensor networks. *37th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks*, Clearwater Beach, FL, 2012, pp. 453–461. DOI: 10.1109/LCN.2012.6423661.

12. Fei C., Kundur D., Kwong R.H. Analysis and design of secure watermark-based authentication systems. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2006, vol. 1 (1), pp. 43–55. DOI: 10.1109/TIFS.2005.863505.

13. Cox I., Miller M., Bloom J., Fridrich J. *Digital watermarking and steganography*. Morgan Kaufmann, 2007.

14. Pérez-Freire L., Comesaña P., Troncoso-Pastoriza J.R., Pérez-González F. Watermarking security: a survey. *Transactions on Data Hiding and Multimedia Security I*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2006, PP. 41–72. DOI: 10.1007/11926214_2.

15. Li W., Song H., Zeng F. Policy-based secure and trustworthy sensing for internet of things in smart cities. *IEEE Internet of Tings Journal*, 2018, vol. 5 (2), pp. 716–723. DOI: 10.1109/JIOT.2017.2720635.

16. Li W., Song H. ART: an attack-resistant trust management scheme for securing vehicular ad hoc networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, vol. 17 (4), pp. 960–969. DOI: 10.1109/TITS.2015.2494017.

17. Anbuchelian S., Lokesh S., Baskaran M. Improving security in Wireless Sensor Network using trust and metaheuristic algorithms. *Proceedings of the 3rd International Confer-ence on Computer and Information Sciences, ICCOINS 2016*, Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 233–241. DOI: 10.1109/ICCOINS.2016.7783220.

18. Feng J., Potkonjak M. Real-time watermarking techniques for sensor networks. *Security and Watermarking of Multimedia Contents V*. SPIE, 2003, pp. 391–402. DOI: 10.1117/12.479736.

19. Guo H., Li Y., Jajodia S. Chaining watermarks for detecting malicious modifications to streaming data. *Information Sciences*, 2007, vol. 177 (1), pp. 281–298.

20. Kamel I., Juma H. Simplified watermarking scheme for sensor networks. *International Journal of Internet Protocol Technology*, 2010, vol. 5 (1), pp. 101–111.

Для цитирования:

Шоназаров П.М., Холов Ф.Т., Саидов Б.Б. Метод цифровых водяных символов для совершенствования объектов на базе кластеров и значения восприятия // Системы анализа и обработки данных. – 2022. – № 1 (85). – С. 109–120. – DOI: 10.17212/2782-2001-2022-1-109-120.

For citation:

Shonazarov P.M., Kholov F.T., Saidov B.B. Metod tsifrovykh vodyanykh simvolov dlya sovershenstvovaniya ob"ektov na baze klasterov i znacheniya vospriyatiya [The method of digital watermarking for improving objects based on clusters and perception values]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2022, no. 1 (85), pp. 109–120. DOI: 10.17212/2782-2001-2022-1-109-120.

ISSN 2782-2001
Системы анализа
и обработки данных
том 85, № 1, 2022, с. 121–139

http://journals.nstu.ru/vestnik
Analysis and data
processing systems
Vol. 85, No. 1, 2022, pp. 121–139

ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATICS,
COMPPUTER ENGINEERING
AND MANAGEMENT

УДК 519.111.3+004.823 DOI: 10.17212/2782-2001-2022-1-121-139

Методика использования базы знаний производящих функций двух переменных*

Д.В. КРУЧИНИН

634050, РФ, г. Томск, пр. Ленина, 40, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

kruchinindm@gmail.com

Базы математических знаний являются развитием классических математических справочников и энциклопедий, что, в свою очередь, делает их важным инструментом при проведении различных исследований в математических науках и смежных областях. В настоящее время существуют различные базы знаний математических объектов. В настоящей работе рассматривается база знаний производящих функций двух переменных, использование которой позволяет оперировать многомерными объектами. Актуальность и значимость данного исследования заключается в решении различных задач, связанных с применением математического аппарата производящих функций.

В работе рассмотрено использование разработанной базы знаний производящих функций двух переменных при решении следующих задач: оперирование производящими функциями двух переменных и получение явных выражений для коэффициентов композиции производящих функций двух переменных, коэффициентов взаимной и обратной производящих функций двух переменных, коэффициентов логарифмических производных производящих функций, а также их степеней. В дополнение рассмотрена обратная задача, направленная на получение производящих функций для явных выражений, описывающих их коэффициенты.

Кроме того, использование базы знаний производящих функций двух переменных способствует процессу построения алгоритмов комбинаторной генерации для сложных комбинаторных объектов, определяемых производящими функциями многих переменных. В качестве примера показано построение алгоритмов комбинаторной генерации для множеств, определяемых обобщенными числами Нараяны. Числа Нараяны описывают классы подмножеств для комбинаторных множеств, определяемых числами Каталана. В статье выбрана одна из комбинаторных интерпретаций для чисел Нараяны – множество путей Дика длиной n, у которых имеется m пиков.

Ключевые слова: база знаний, производящие функции двух переменных, композиция, явные выражения, пирамида, числа Каталана, числа Нараяны, комбинаторная генерация

* *Статья получена 17 ноября 2021 г.*

ВВЕДЕНИЕ

Базы математических знаний являются развитием классических математических справочников и энциклопедий, что, в свою очередь, делает их важным инструментом при проведении различных исследований в математических науках и смежных областях. Примерами таких баз знаний являются онлайн-энциклопедия целочисленных последовательностей [1], сервер комбинаторных объектов [2] и др.

Важным объектом описания в таких базах являются производящие функции, поскольку одной производящей функцией можно получить компактное представление дискретных структур [3, 4]. Разработанная методология решения задач, основанных на применении производящих функций многих переменных, позволила существенно расширить области их применения [5–7].

В настоящей работе рассматривается методика использования разработанной базы знаний производящих функций двух переменных. В основе указанной базы знаний лежат правила вычисления коэффициентов степеней производящих функций. Выделим следующий перечень задач, решение которых можно осуществить с помощью данной базы знаний:

1) получение явных выражений для коэффициентов композиции производящих функций двух переменных и их степеней;

2) получение явных выражений для коэффициентов взаимной производящей функции двух переменных и их степеней;

3) получение явных выражений для коэффициентов обратной производящей функции двух переменных и их степеней;

4) получение явных выражений для коэффициентов реверсивной производящей функции двух переменных и их степеней;

5) получение явных выражений для коэффициентов обратной реверсивной производящей функции двух переменных и их степеней;

6) получение производящих функций для явных выражений, описывающих их коэффициенты;

7) получение явных выражений для коэффициентов логарифмических производных производящих функций;

8) построение алгоритмов комбинаторной генерации.

1. ПОЛУЧЕНИЕ ЯВНЫХ ВЫРАЖЕНИЙ ДЛЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ КОМПОЗИЦИИ ПРОИЗВОДЯЩИХ ФУНКЦИЙ ДВУХ ПЕРЕМЕННЫХ

Рассмотрим решение первой задачи, направленной на получение явных выражений для коэффициентов композиции производящих функций двух переменных и их степеней. Для этого воспользуемся правилами получения явных выражений для разных вариантов композиций производящих функций (данные из табл. 1 в работе [7]), а также общим правилом нахождения коэффициентов степеней композиций производящих функций двух переменных (теорема 2 в работе [7]). В результате получим перечень правил получения явных выражений для коэффициентов степеней композиций производящих функций двух переменных, часть которых представлена в табл. 1.

Структура табл. 1 имеет следующий вид: в первом столбце таблицы записаны примеры вариантов композиций производящих функций одной и двух переменных, во втором столбце – явные выражения для коэффициентов *k*-й степени композиций производящих функций через соответствующие формулы для коэффициентов *k*-й степени производящих функций, образующих данную композицию. При подстановке $k = 1$ получается явное выражение для коэффициентов самой композиции производящих функций.

Таблица 1

Table 1

Правила получения явных выражений для коэффициентов степеней композиций производящих функций двух переменных

Rules for obtaining explicit expressions for the coefficients of powers of the compositions of generating two-variable functions

Номер правила	Композиция	Коэффициент
1	$G(x,y)^k = H(A(x),y)^k$	$g(n,m,k) = \sum_{q=0}^{n} A^{\Delta}(n,q)\,h(q,m,k)$
2	$G(x,y)^k = H(x,B(y))^k$	$g(n,m,k) = \sum_{r=0}^{m} B^{\Delta}(m,r)\,h(n,r,k)$
3	$G(x,y)^k = H(A(x,y))^k$	$g(n,m,k) = \sum_{q=0}^{n+m} A^{\Delta}(n,m,q)\,h(q,k)$
4	$G(x,y)^k = H(A(x,y),y)^k$	$g(n,m,k) = \sum_{q=0}^{n+m}\sum_{r=0}^{m} A^{\Delta}(n,m-r,q)\,h(q,r,k)$
5	$G(x,y)^k = H(x,B(x,y))^k$	$g(n,m,k) = \sum_{q=0}^{n}\sum_{r=0}^{n+m-q} B^{\Delta}(n-q,m,r)\,h(q,r,k)$
6	$G(x,y)^k = H(A(x),B(y))^k$	$g(n,m,k) = \sum_{q=0}^{n}\sum_{r=0}^{m} A^{\Delta}(n,q)B^{\Delta}(m,r)\,h(q,r,k)$
7	$G(x)^k = H(x,B(x))^k$	$g(n,k) = \sum_{q=0}^{n}\sum_{r=0}^{n-q} B^{\Delta}(n-q,r)\,h(q,r,k)$

Для выполнения композиции $G(x,y) = H(A(x,y),y)$ необходимо, чтобы выполнялось следующее условие для внутренней функции: $A(0,0) = 0$. Поскольку в разработанной базе знаний содержится информация о большом количестве производящих функций двух переменных, имеющих свободный член (т. е. $A(0,0) \neq 0$), то для выполнения требуемого условия можно воспользоваться следующими способами:

1) домножить производящую функцию на переменную в виде монома $x^a y^b$, где $a,b \in \Gamma$, $a \geq 0$, $b \geq 0$, $a + b > 0$;

2) вычесть из производящей функции свободный член $A(0,0)$.

Например, производящую функцию двух переменных

$$G(x,y)=\frac{xy-1}{xy+x^2+x-1},$$

у которой свободный член не равен нулю, можно представить как

$$G(x,y)=\frac{1}{1-\dfrac{x+x^2}{1-xy}}=H(A(x,y)),$$

где

$$H(x)=\frac{1}{1-x},\quad A(x,y)=\frac{x+x^2}{1-xy}.$$

В базе знаний формируем запрос по производящей функции

$$U(x,y)=\frac{1+x}{1-y}.$$

Получаем пирамиду под номером 17 (рис. 1).

Generating function:	$U_{17}(x,y)=\frac{1+x}{1-y}$
Formula:	$T_{17}(n,m,k)=\binom{k}{n}\binom{m+k-1}{m}$
Data:	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

Рис. 1. Информация из базы знаний о пирамиде под номером 17

Fig. 1. Information from the knowledge base about the pyramid with number 17

Тогда для коэффициентов k-й степени производящей функции $xU(x,y)=x\dfrac{1+x}{1-y}$ будет верна формула

$$T_{17}(n-k,m,k)=\begin{pmatrix}k\\ n-k\end{pmatrix}\begin{pmatrix}m+k-1\\ m\end{pmatrix}.$$

Далее выполним умножение переменной y на x, т. е. рассмотрим случай $A(x,y) = xU(x,xy)$, получим

$$A^{\Delta}(n,m,k) = T_{17}(n-m-k,m,k) = \begin{pmatrix} k \\ n-k \end{pmatrix}\begin{pmatrix} m+k-1 \\ m \end{pmatrix}.$$

На основании правила под номером 3 из табл. 1 при $k = 1$ находим

$$g(n,m) = \sum_{k=0}^{n+m} A^{\Delta}(n,m,k) = \sum_{k=0}^{n-m}\begin{pmatrix} k \\ n-m-k \end{pmatrix}\begin{pmatrix} m+k-1 \\ m \end{pmatrix}.$$

Таким образом, получили явное выражение для числового треугольника последовательности A055830 из OEIS [1], описывающей класс путей на решетке [8].

2. ПОЛУЧЕНИЕ ЯВНЫХ ВЫРАЖЕНИЙ ДЛЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВЗАИМНОЙ ПРОИЗВОДЯЩЕЙ ФУНКЦИИ ДВУХ ПЕРЕМЕННЫХ

Рассмотрим решение второй задачи, направленной на получение явных выражений для коэффициентов взаимной производящей функции двух переменных и их степеней.

Пусть задана производящая функция вида

$$G(x,y) = \frac{x - \sqrt{x^2 - 2x^2 y + 2\sqrt{1-4x}\cdot x^2 y}}{2x^2 y},$$

тогда взаимной производящей функцией к ней будет являться производящая функция вида

$$A(x,y) = \frac{1}{G(x,y)}.$$

Для получения явного выражения для коэффициентов взаимной производящей функции с использованием разработанной базы знаний, разложим данную производящую функцию $G(x,y)$ в ряд Тейлора в точке $x = 0$ и $y = 0$. В результате получим следующую матрицу значений коэффициентов данного разложения:

$$\begin{aligned} &1 \\ &+(1 + y + \cdots)x \\ &+(2 + 2y + 2y^2 + \cdots)x^2 \\ &+(5 + 5y + 6y^2 + 5y^3 + \cdots)x^3 \\ &+(14 + 14y + 18y^2 + 20y^3 + 14y^4 + \cdots)x^4 + \cdots \end{aligned}$$

Заметим, что данная функция описывает треугольник, где $G(0,0)=1$. Представим данную функцию как $H\left(x,\ \frac{y}{x}\right)$. Используя базу знаний, можно получить соответствующую данному разложению производящую функцию и матричное представление в виде пирамиды под номером 69 (рис. 2).

Generating function:	$U_{69}(x,y)=\frac{x-\sqrt{x^2-2xy+2\sqrt{1-4x}xy}}{2xy}$						
Formula:	$T_{69}(n,m,k)=\frac{k\binom{2m+k-1}{m}\binom{2n+m+k-1}{n}}{n+m+k}$						
Data:	1	1	2	5	14	42	132
	1	2	6	20	70	252	924
	2	5	18	70	280	1134	4620
	5	14	56	240	1050	4620	20328
	14	42	180	825	3850	18018	84084
	42	132	594	2860	14014	68796	336336
	132	429	2002	10010	50960	259896	1319472

Рис. 2. Информация из базы знаний о пирамиде под номером 69

Fig. 2. Information from the knowledge base about the pyramid with number 69

Тогда для исходной производящей функции будет верно выражение

$$G(x,y)=\sum_n\sum_m T_{69}(n-m,m,k)x^n y^m.$$

Для получения явного выражения для коэффициентов взаимной производящей функции можно воспользоваться следующей формулой [9]:

$$T_r(n,m,k)=\sum_{j=0}^{m+n}T(0,0,1)^{-j-k}(-1)^j\binom{j+k-1}{j}T(n,m,j)\binom{k+m+n}{m+n-j},$$

где $T(n,m,k)$ – матрица значений для исходной производящей функции при условии, что $T(0,0,0)=1$ и $T(n,m,0)=0$.

Запишем для исходной функции

$$T(n,m,k)=T_{69}(n-m,m,k)=\frac{k}{n+k}\binom{2m+k-1}{m}\binom{2n+k-1}{n-m}.$$

Тогда явное выражение для коэффициентов взаимной производящей функции будет определяться как

$$T_r(n,m,k)=\sum_{j=0}^{m+n}(-1)^j\binom{j+k-1}{j}\frac{j}{n+j}\binom{2m+j-1}{m}\binom{2n+j-1}{n-m}\binom{k+m+n}{m+n-j}.$$

3. ПОЛУЧЕНИЕ ЯВНЫХ ВЫРАЖЕНИЙ ДЛЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОБРАТНОЙ ПРОИЗВОДЯЩЕЙ ФУНКЦИИ ДВУХ ПЕРЕМЕННЫХ

Рассмотрим решение третьей задачи, направленной на получение явных выражений для коэффициентов обратной производящей функции двух переменных и их степеней.

Пусть задана производящая функция вида

$$G(x,y)=\frac{x}{1-x-x^2(1+y)}.$$

Найдем коэффициенты разложения обратной производящей функции $A(x,y)$, удовлетворяющей уравнению

$$G(A(x,y),y)=x.$$

Введем производящую функцию вида $G(x,y)=xG_x(x,y)$, тогда уравнение примет вид

$$A(x,y)=\frac{x}{G_x(A(x,y),y)}.$$

Теперь выполним подстановку $A(x,y)=xA_x(x,y)$, получим

$$A_x(x,y)=\frac{1}{G_x(xA_x(x,y),y)}.$$

В данном случае обратную производящую функцию можно найти через использование взаимной производящей функции

$$G_r(x,y)=1-x-x^2(1+y)=(1-x(1+x+xy).$$

Далее для производящей функции $F(x,y)=(1+x+xy)$ найдем представление в виде пирамиды под номером 37 (рис. 3):

$$T_r(n,m,k)=\sum_{i=0}^{n+m}T_{37}(n-i,m,i)\binom{k}{i}(-1)^i=\sum_{i=0}^{n+m}\binom{i}{n-i}\binom{n-i}{m}\binom{k}{i}(-1)^i=$$

$$=\sum_{i=0}^{n}\binom{i}{n-i}\binom{n-i}{m}\binom{k}{i}(-1)^i.$$

Тогда коэффициенты для $A_x(x,y)^k$ будут равны

$$T_{A_x}(n,m,k)=\frac{k}{n+k}T_r(n,m,n+k)=\frac{k}{n+k}\sum_{i=0}^{n}\binom{i}{n-i}\binom{n-i}{m}\binom{k+n}{i}(-1)^i.$$

Generating function:	$U_{37}(x,y) = 1 + x + x\,y$
Formula:	$T_{37}(n,m,k) = \binom{k}{n}\binom{n}{m}$
Data:	1 0 0 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

Рис. 3. Информация из базы знаний о пирамиде под номером 37

Fig. 3. Information from the knowledge base about the pyramid with number 37

4. ПОЛУЧЕНИЕ ПРОИЗВОДЯЩИХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ ЯВНЫХ ВЫРАЖЕНИЙ, ОПИСЫВАЮЩИХ ИХ КОЭФФИЦИЕНТЫ

Рассмотрим решение шестой задачи, направленной на получение производящих функций для явных выражений, описывающих их коэффициенты. Данная задача является обратной предыдущим, т. е. по виду функции коэффициентов производящей функции требуется определить выражение для производящей функции.

Пусть задано явное выражение вида

$$\sum_{k=0}^{m}\binom{n+m-k+2}{k}\binom{n+m-k}{n}.$$

Выполним ряд преобразований с целью получить одну из композиционных формул, представленных в [7], получим

$$\sum_{k=0}^{m}\binom{n+m-k+2}{k}\binom{m-k+n}{n}.$$

Далее заменим порядок суммирования с k на $m-k$, тогда

$$\sum_{k=0}^{m}\binom{n+k+2}{m-k}\binom{k+n}{n}.$$

Также с учетом преобразований индекса k получим

$$\sum_{k=n}^{n+m}\binom{k+2}{n+m-k}\binom{k}{n}$$

или

$$\sum_{k=0}^{n+m}\binom{k+2}{n+m-k}\binom{k}{k-n}.$$

Введем новую переменную $j=n+m-k$ и используем символ Кронекера:

$$\sum_{k=0}^{n+m}\sum_{j=0}^{m}\delta_{j,n+m-k}\binom{k+2}{j}\binom{-j+n+m}{m-j}.$$

Сравним полученный результат с композиционной формулой

$$g(n,m)=\sum_{k=0}^{n+m}\sum_{j=0}^{m}A^{\Delta}(n,m-j,k)h(k,j).$$

Заметим, что для нашего случая

$$A^{\Delta}(n,m-j,k)=\delta_{j,n+m-k}\binom{-j+n+m}{m-j},$$

откуда

$$A^{\Delta}(n,m,k)=\delta_{k,n+m}\binom{n+m}{m}.$$

Используя базу знаний, найдем пирамиду под номером 1, производящей функцией которой является $(x+y)$.

Далее найдем производящую функцию для

$$h(n,m)=\binom{n+2}{m}.$$

Используя базу знаний, найдем пирамиду под номером 42 (рис. 4).

Generating function:	$U_{42}(x,y)=\frac{(1+y)^2}{1-x(1+y)}$						
Formula:	$T_{42}(n,m,k)=\binom{n+k-1}{n}\binom{n+2k}{m}$						
Data:	1	2	1	0	0	0	0
	1	3	3	1	0	0	0
	1	4	6	4	1	0	0
	1	5	10	10	5	1	0
	1	6	15	20	15	6	1
	1	7	21	35	35	21	7
	1	8	28	56	70	56	28

Рис. 4. Информация из базы знаний о пирамиде под номером 42

Fig. 4. Information from the knowledge base about the pyramid with number 42

Откуда искомая производящая функция будет равна

$$A(x,y) = U_{42}(x+y,y) = \frac{(1+y)^2}{1-(x+y)(1+y)}.$$

5. ПОЛУЧЕНИЕ ЯВНЫХ ВЫРАЖЕНИЙ ДЛЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЛОГАРИФМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДНЫХ ПРОИЗВОДЯЩИХ ФУНКЦИЙ

Рассмотрим решение седьмой задачи, направленной на получение явных выражений для коэффициентов логарифмических производных производящих функций.

1. Пусть дано функциональное уравнение вида

$$A(x,y) = G(x\,A(x,y),y)$$

и известно явное выражение коэффициентов *k*-й степени производящей функции $G(x,y)$

$$T_G(n,m,k) = [x^n\,y^m]G(x,y)^k,$$

тогда коэффициенты логарифмической частной производной производящей функции $A(x,y)$ по *x* будут выражаться через коэффициенты $T_G(n,m,k)$:

$$T_{lx}(n,m) = [x^n\,y^m]\frac{1}{A(x,y)}\frac{\partial A(x,y)}{\partial x} = T_G(n,m,n).$$

2. Пусть дано функциональное уравнение вида

$$A(x,y) = G(x,y\,A(x,y))$$

и известно явное выражение коэффициентов *k*-й степени производящей функции $G(x,y)$

$$T_G(n,m,k) = [x^n\,y^m]G(x,y)^k,$$

тогда коэффициенты логарифмической частной производной производящей функции $A(x,y)$ по *y* будут выражаться через коэффициенты $T_G(n,m,k)$:

$$T_{ly}(n,m) = [x^n\,y^m]\frac{1}{A(x,y)}\frac{\partial A(x,y)}{\partial y} = T_G(n,m,m).$$

В качестве примера найдем коэффициенты логарифмической производной производящей функции $U_{139}(x,y)$. Соответствующий ей фрейм в базе знаний показан на рис. 5.

Generating function:	$U_{139}(x,y)=\frac{1-2x-y-\sqrt{1-4x-(2-4x)y+y^2}}{2x^2}$						
Formula:	$T_{139}(n,m,k)=\frac{k\binom{n+m+k}{m}\binom{2n+2k}{n}}{n+m+k}$						
Data:	1	1	1	1	1	1	1
	2	4	6	8	10	12	14
	5	15	30	50	75	105	140
	14	56	140	280	490	784	1176
	42	210	630	1470	2940	5292	8820
	132	792	2772	7392	16632	33264	60984
	429	3003	12012	36036	90090	198198	396396
Right on y:	UU0138(x,y)						
Left on x:	UU0059(x,y)						
Left on y:	UU0060(x,y)						
Change x y:	UU0359(x,y)						

Рис. 5. Информация из базы знаний о пирамиде под номером 139

Fig. 5. Information from the knowledge base about the pyramid with number 139

Далее необходимо перейти по связанной ссылке на фрейм в базе знаний с информацией о пирамиде под номером 59 и получить явное выражение для коэффициентов *k*-й степени производящей функции $U_{59}(x,y)$

$$T_{59}(n,m,k)=\frac{k\binom{2k}{n}\binom{k+m}{m}}{k+m}.$$

Для искомой логарифмической производной получим

$$G(x,y)=\frac{1}{A(x,y)}\frac{\partial A(x,y)}{\partial x}=1-2x^2-\frac{2x^2}{U(x,y)}+\frac{x^2(4-4y)}{2U(x,y)\sqrt{1-4x-(2-4x)y+y^2}},$$

где

$$U(x,y)=1-2x-y-\sqrt{1-4x-(2-4x)y+y^2}\ .$$

Тогда коэффициенты будут иметь следующее явное выражение:

$$g(n,m)=T_{59}(n,m,n)=\frac{n\binom{2n}{n}\binom{m+n}{m}}{m+n}=\binom{2n}{n}\binom{n+m-1}{m}.$$

6. ПОСТРОЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ГЕНЕРАЦИИ ДЛЯ КОМБИНАТОРНЫХ МНОЖЕСТВ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫХ ОБОБЩЕННЫМИ ЧИСЛАМИ НАРАЯНЫ

Рассмотрим классические числа Нараяны, заданные следующей производящей функцией двух переменных [10]:

$$F_N(x,y)=\frac{1-x-xy-\sqrt{1-2x+x^2+(-2x-2x^2)y+x^2y^2}}{2x}.$$

В базе знаний пирамида, соответствующая данной производящей функции в виде $\frac{F_N(x,y)}{xy}$, находится под номером 25 (рис. 6). Подробное исследование этого обобщения представлено в работе [11].

Generating function:	$U_{25}(x,y)=\frac{1-x-xy-\sqrt{1-2x+x^2+(-2x-2x^2)y+x^2y^2}}{2x^2y}$
Formula:	$T_{25}(n,m,k)=\frac{k\binom{n+k}{m}\binom{n+k}{n-m}}{n+k}$
Data:	1 0 0 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0 0 1 3 1 0 0 0 0 1 6 6 1 0 0 0 1 10 20 10 1 0 0 1 15 50 50 15 1 0 1 21 105 175 105 21 1

Рис. 6. Информация из базы знаний о пирамиде под номером 25

Fig. 6. Information from the knowledge base about the pyramid with number 25

Тогда коэффициенты k-й степени производящей функции будут определяться выражением

$$F^{\Delta}(n,m,k)=[x^n y^m]F_N(x,y)^k=T_{25}(n-k,m-k,k)=\frac{k}{n}\binom{n}{m-k}\binom{n}{m}.$$

Рассмотрим комбинаторную интерпретацию обобщенных чисел Нараяны. Заметим, что

$$xU_{25}(x,1)=\frac{1-\sqrt{1-4x}-2x}{2x}=\sum_{n\geqslant 1}C_n x^n,$$

где C_n – числа Каталана. Тогда

$$\sum_{m=1}^{n}N(n,m)=C_n.$$

Это означает, что числа Нараяны описывают классы подмножеств для комбинаторных множеств, определяемых числами Каталана. Известно более

200 комбинаторных множеств, определяемых числами Каталана [12]. Это классы перестановок и путей Дика, двоичные деревья, полные двоичные деревья, распределение скобок, множество триангуляций треугольников и т. д. Одна из комбинаторных интерпретаций для чисел Нараяны – это множество путей Дика длиной n, у которых имеется m пиков [13].

В общем случае для вычисления коэффициентов $F_N(x,y)^k$ можно воспользоваться прямым способом вычисления, основанным на формуле

$$F^{\Delta}(n,m,k) = \sum_{\lambda_1+\lambda_2+\ldots\lambda_k=n}\left(\sum_{\mu_1+\mu_2+\ldots\mu_k=m}\left(\prod_{i=1}^{k} f(\lambda_i,\mu_i)\right)\right),$$

где $\lambda_i > 0$ и $\mu_k > 0$. Здесь суммирование ведется по всем композициям чисел n и m. Это имеет большую вычислительную сложность, с другой стороны, дает комбинаторную интерпретацию для множеств, описываемых обобщенными числами Нараяны. Это все k-кортежи из элементов множеств, описываемых числами Нараяны. Например, если это пути Дика длиной n и числом пиков m, то $F^{\Delta}(n,m,k)$ описывает пути, которые образованы из k путей Дика общей длиной n и общим числом пиков m. Число множеств, определяемых обобщенными числами Нараяны, многократно возрастает, если элементы кортежа будут соответствовать разным комбинаторным множествам, определяемым числами Нараяны. Для обобщенных чисел Нараяны существует рекуррентное соотношение следующего вида [11]:

$$F^{\Delta}(n,m,k) =$$

$$= F^{\Delta}(n-1,m-1,k-1) + F^{\Delta}(n,m-1,k) + F^{\Delta}(n-1,m-1,k) + F^{\Delta}(n-1,m,k+1).$$

Откуда, имея явную формулу для $T_{25}(n,m,k)$ (рис. 6) и данную рекуррентную формулу, можно построить эффективные алгоритмы комбинаторной генерации для множеств, определяемых числами Нараяны [14, 15]. Для построения алгоритмов комбинаторной генерации необходимо по рекуррентной формуле построить схему рекурсивной композиции деревьев И/ИЛИ [16]. Анализируя приведенную выше формулу, в которой нет мономов с операцией умножения, получим схему в которой нет И-узлов (рис. 7).

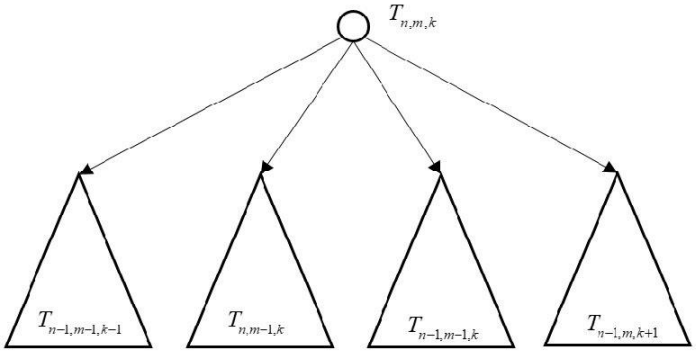


Рис. 7. Схема рекурсивной композиции деревьев И/ИЛИ

Fig. 7. Recursive composition of AND/OR trees

Правила построения комбинаторного объекта по рекуррентной формуле следующие.

1. Пусть объект описывается параметрами $(n-1,m-1,k-1)$ и $k-1$ означает число элементов в кортеже. Тогда в кортеж добавляется новый объект с параметрами $(1,1)$.

2. Пусть объект описывается параметрами $(n,m-1,k)$ и k означает число элементов в кортеже. Тогда заданный элемент кортежа изменяется так, что его $N(i,j)$ становится $N(i,j+1)$.

3. Пусть объект описывается параметрами $(n-1,m-1,k)$ и k означает число элементов в кортеже. Тогда заданный элемент кортежа изменяется так, что его $N(i,j)$ становится $N(i+1,j+1)$.

4. Пусть объект описывается параметрами $(n-1,m,k+1)$ и $k+1$ означает число элементов в кортеже. Тогда два элемента кортежа объединяются с добавлением одно узла.

Рассмотрим алгоритм генерации скобочной структуры, определяемой обобщенными числами Нараяны, представленный в виде псевдокода. Алгоритм GenGenerNarayna имеет входные параметры:

– *num* – номер скобочной структуры, изменяется от нуля до $F^{\Delta}(n,m,k)-1$;

– *n* – число пар скобок ();

– *m* – число скобочных подструктур, заключенных в скобки (str), где *str* – любая правильная запись скобок, в том числе и пустая;

– *k* – число элементов в кортеже.

Алгоритм GenGenerNarayna носит рекурсивную структуру, а генерируемая скобочная структура представлена двойным списком $s=\{s_0,s_1,\ldots,s_k\}$, где s_i содержит правильную скобочную структуру, определяемую числами Нараяны. Операция + означает добавление скобки или пары скобок в список s_i.

Алгоритм GenGenerNarayna для генерации множеств, определяемых обобщенными числами Нараяны:

```
1   algorithm GenGenerNarayna(num, n, m, k)
2   begin
3       if n < k or m < k or k < 0 or n < m then return []
4       if n = 1 and k = 1 then return [()]
5       if num < F^Δ(n-1, m-1, k-1)
6       then
            {совершаем рекурсивный спуск для первого левого «сына»}
7           s := GenGenerNarayna(num, n-1, m-1, k-1)
            {добавляем новый элемент кортежа}
8           s := s+[()]
9           return s
10      end
11      num := num - F^Δ(n-1, m-1, k-1)
12      if num < F^Δ(n, m-1, k)
13      then
```

```
                {совершаем рекурсивный спуск для второго левого «сына»}
14              s := GenGenerNarayna(num, n, m−1, k)
                {добавляем скобки в нулевой элемент кортежа}
15              s_0 := s_0 + ()
16              return s
17      end
18      num := num − F^Δ(n, m−1, k)
19      if num < F^Δ(n−1, m−1, k)
20      then
                {совершаем рекурсивный спуск для третьего левого «сына»}
21              s := GenGenerNarayna(num, n−1, m−1, k)
                {добавляем скобки в нулевой элемент кортежа}
22              s_0 := (+s_0+)
23              return s
24      end
25      num := num − F^Δ(n−1, m−1, k)
26      if num < F^Δ(n−1, m, k+1)
27      then
                {совершаем рекурсивный спуск для четвертого левого «сына»}
28              s := GenGenerNarayna(num, n−1, m, k+1)
                {добавляем скобки в первый элемент кортежа}
29              s_1 := (+s_1+)
                {объединяем нулевой и первый элементы кортежа}
30              s_0 := s_0 + s_1
                {удаляем первый элемент кортежа}
31              delete s_1
32              return s
33      end
34  end
```

В табл. 2 представлен пример работы алгоритма GenGenerNarayna для параметров $n=4$, $m=3$, $k=2$. Заметим, что если символ « (» заменить на *u* (это будет обозначать шаг вверх по диагонали), а символ «) » заменить на *d* (это будет обозначать шаг вниз по диагонали), то получим соответствующие пути Дика.

Таблица 2

Table 2

Пример работы алгоритма GenGenerNarayna для $n=4$, $m=3$, $k=2$

An example of using the GenGenerNarayna algorithm for $n=4$, $m=3$, $k=2$

num	Скобочная структура	Путь Дика
0	[()][(())()]	[ud][uuddud]
1	[()][(()())]	[ud][uududd]
2	[()][()(())]	[ud][uduudd]

Окончание табл. 2

End of Tab. 2

num	Скобочная структура	Путь Дика
3	[()()][(())]	[udud][uudd]
4	[(())()][()]	[uuddud][ud]
5	[(())][()()]	[uudd][udud]
6	[(()())][()]	[uududd][ud]
7	[()(())][()]	[uduudd][ud]

Рассмотрим вычислительную сложность данного алгоритма. Поскольку в дереве И/ИЛИ нет И-узлов, то генерация одного элемента комбинаторного множества, описываемого обобщенными числами Нараяны, будет кратна следу в дереве. Число узлов в следе не превышает числа n, этот вывод делается на основании того, что n – это число элементарных объектов, из которых строится комбинаторный объект (скобочная структура или путь Дика). Поэтому вычислительная сложность алгоритма будет линейной $O(n)$. Для подсчета числа узлов можно воспользоваться следующим соотношением, основанным на рекуррентной формуле для $F^{\Delta}(n,m,k)$:

$$V(n,m,k) = 1 + V(n-1,m-1,k-1) +$$

$$+ V(n,m-1,k) + V(n-1,m-1,k) + V(n-1,m,k+1).$$

Численные эксперименты показали, что

$$\frac{V(n,m,k)}{F^{\Delta}(n,m,k)} \leqslant n .$$

Алгоритм ранжирования также строится на основе рекурсивной композиции деревьев И/ИЛИ и имеет такую же вычислительную сложность.

ВЫВОДЫ

Предложенная методика использования базы знаний производящих функций двух переменных позволяет решать широкий круг задач оперирования производящими функциями двух переменных и их коэффициентами. Использование базы знаний обеспечивает построение алгоритмов комбинаторной генерации для более сложных комбинаторных объектов, определяемых производящими функциями многих переменных. Все полученные формулы и алгоритмы являются новыми.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sloane N.J.A.* The on-line encyclopedia of integer sequences // Notices of the American Mathematical Society. – 2018. – Vol. 65, N 9. – P. 1063–1074. – DOI: 10.1090/noti1734.

2. The combinatorial object server: website. – URL: http://combos.org (accessed: 28.02.2022).

3. *Srivastava H.M., Manocha H.L.* A treatise on generating functions. – USA: Ellis Horwood Limited, 1984. – 569 p.

4. *Wilf H.S.* Generatingfunctionology. – 2nd ed. – Boston: Academic Press, 1994. – 228 p.

5. *Kruchinin V.V., Kruchinin D.V.* Composita and its properties // Journal of Analysis and Number Theory. – 2014. – Vol. 2, N 2. – P. 37–44. – DOI: 10.12785/jant/020202.

6. *Kruchinin D.V., Kruchinin V.V.* Application of a composition of generating functions for obtaining explicit formulas of polynomials // Journal of Mathematical Analysis and Applications. – 2013. – Vol. 404, N 1. – P. 161–171. – DOI: 10.1016/j.jmaa.2013.03.009.

7. *Kruchinin D., Kruchinin V., Shablya Y.* Method for obtaining coefficients of powers of bivariate generating functions // Mathematics. – 2021. – Vol. 9, N 4. – Art. 428. – DOI: 10.3390/math9040428.

8. *Kimberling C.* Path-counting and Fibonacci numbers // Fibonacci Quarterly. – 2002. – Vol. 40, N 4. – P. 328–338.

9. *Kruchinin D.V., Kruchinin V.V.* Explicit formula for reciprocal generating function and its application // Advanced Studies in Contemporary Mathematics (Kyungshang). – 2019. – Vol. 29, N 3. – P. 365–372. – DOI: 10.17777/ascm2019.29.3.365.

10. *Stanley R.P.* Enumerative combinatorics. Vol. 2. – Cambridge: Cambridge University Press, 2001. – 595 p.

11. *Kruchinin D., Kruchinin V., Shablya Y.* On some properties of generalized Narayana numbers // Quaestiones Mathematicae. – 2021. – DOI: 10.2989/16073606.2021.1980448.

12. *Stanley R.P.* Catalan numbers. – Cambridge: Cambridge University Press, 2015. – 215 p.

13. *Petersen T.K.* Eulerian numbers. – New York: Birkhäuser, 2015. – 463 p.

14. *Kreher D.L., Stinson D.R.* Combinatorial algorithms: Generation, enumeration, and search. – Boca Raton, FL: CRC Press, 1999. – 329 p.

15. *Ruskey F.* Combinatorial generation. Working version (1j-CSC 425/520). – 2003. – 311 p. – URL: http://page.math.tu-berlin.de/~felsner/SemWS17-18/Ruskey-Comb-Gen.pdf (accessed: 28.02.2022).

16. *Кручинин В.В.* Представление множеств деревьями И/ИЛИ // Доклады ТУСУР. – 2008. – Т. 1, № 17. – С. 107–112.

Кручинин Дмитрий Владимирович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры компьютерных систем в управлении и проектировании Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Основное направление научных исследований – теория производящих функций, теоретические основы математики, системный анализ. Имеет более 100 печатных работ и учебных пособий. E-mail: kruchinindm@gmail.com

Kruchinin Dmitry V., PhD (Phys.&Math.), associate professor, Department of Computer Control and Design Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. His research interests are currently focused on the theory of generating functions, computer science and system analysis. He has more than 100 publications and teaching manuals. E-mail: kruchinindm@gmail.com

DOI: 10.17212/2782-2001-2022-1-121-139

Methodology for using the knowledge base of generating two-variable functions *

D.V. KRUCHININ

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40 Lenina Prospekt, Tomsk, 634050, Russian Federation

kruuchinindm@gmail.com

Abstract

Mathematical knowledge bases are the development of classical mathematical reference books and encyclopedias, which, in turn, makes them an important tool for conducting various research in mathematical sciences and related fields. At present, there are various knowledge bases of mathematical objects. In this paper, we consider the knowledge base of the generating functions of two variables, which allows us to operate with multivariate objects. The relevance and significance of the work lies in solving various problems related to the mathematical apparatus of generating functions.

In the paper we consider the use of the knowledge base of generating functions of two variables for solving problems of operating generating functions and obtaining coefficients for composition, reciprocal and compositional inverse generating functions of two variables and their powers, as well as obtaining explicit expressions for the coefficients of logarithmic derivatives of the generating functions. In addition, an inverse problem is considered aimed at obtaining generating functions for explicit expressions describing their coefficients.

The use of the knowledge base of generating two-variable functions contributes to the process of constructing combinatorial generation algorithms for combinatorial objects defined by generating functions of many variables. As an example, the construction of combinatorial generation algorithms for sets defined by the generalized Narayana numbers is shown. The Narayana numbers describe classes of subsets for combinatorial sets defined by the Catalan numbers. In this paper, one of the combinatorial interpretations for the Narayana numbers is chosen - the set of the Dyck paths of length n, which have m peaks.

Keywords: knowledge base, generating functions in two variables, composition, explicit expressions, pyramids, Catalan numbers, Narayana numbers, combinatorial generation

REFERENCES

1. Sloane N.J.A. The on-line encyclopedia of integer sequences. *Notices of the American Mathematical Society*, 2018, vol. 65, no. 9, pp. 1063–1074. DOI: 10.1090/noti1734.

2. The combinatorial object server: website. Available at: http://combos.org (accessed 28.02.2022).

3. Srivastava H.M., Manocha H.L. *A treatise on generating functions*. USA, Ellis Horwood Limited, 1984. 569 p.

4. Wilf H.S. *Generatingfunctionology.* 2nd ed. Boston, Academic Press, 1994. 228 p.

5. Kruchinin V.V., Kruchinin D.V. Composita and its properties. *Journal of Analysis and Number Theory*, 2014, vol. 2, no. 2, pp. 37–44. DOI: 10.12785/jant/020202.

6. Kruchinin D.V., Kruchinin V.V. Application of a composition of generating functions for obtaining explicit formulas of polynomials. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 2013, vol. 404, no. 1, pp. 161–171. DOI: 10.1016/j.jmaa.2013.03.009.

* *Received 17 November 2021.*

7. Kruchinin D., Kruchinin V., Shablya Y. Method for obtaining coefficients of powers of bivariate generating functions. *Mathematics*, 2021, vol. 9, no. 4, art. 428. DOI: 10.3390/math9040428.

8. Kimberling C. Path-counting and Fibonacci numbers. *Fibonacci Quarterly*, 2002, vol. 40, no. 4, pp. 328–338.

9. Kruchinin D.V., Kruchinin V.V. Explicit formula for reciprocal generating function and its application. *Advanced Studies in Contemporary Mathematics (Kyungshang)*, 2019, vol. 29, no. 3, pp. 365–372. DOI: 10.17777/ascm2019.29.3.365.

10. Stanley R.P. *Enumerative combinatorics.* Vol. 2. Cambridge, Cambridge University Press, 2001. 595 p.

11. Kruchinin D., Kruchinin V., Shablya Y. On some properties of generalized Narayana numbers. *Quaestiones Mathematicae*, 2021. DOI: 10.2989/16073606.2021.1980448.

12. Stanley R.P. *Catalan numbers*. Cambridge, Cambridge University Press, 2015. 215 p.

13. Petersen T.K. *Eulerian numbers*. New York, Birkhäuser, 2015. 463 p.

14. Kreher D.L., Stinson D.R. *Combinatorial algorithms: Generation, enumeration, and search*. Boca Raton, FL, CRC Press, 1999. 329 p.

15. Ruskey F. *Combinatorial generation*. Working version (1j-CSC 425/520). 2003. 311 p. Available at: http://page.math.tu-berlin.de/~felsner/SemWS17-18/Ruskey-Comb-Gen.pdf (accessed 28.02.2022).

16. Kruchinin V.V. Predstavlenie mnozhestv derev'yami I/ILI [Presentation of set by meant of tree AND/OR]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki = Proceedings of TUSUR University*, 2008, vol. 1, no. 17, pp. 107–112.

Для цитирования:

Кручинин Д.В. Методика использования базы знаний производящих функций двух переменных // Системы анализа и обработки данных. – 2022. – № 1 (85). – С. 121–139. – DOI: 10.17212/2782-2001-2022-1-121-139.

For citation:

Kruchinin D.V. Metodika ispol'zovaniya bazy znanii proizvodyashchikh funktsii dvukh peremennykh [Methodology for using the knowledge base of generating two-variable functions]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2022, no. 1 (85), pp. 121–139. DOI: 10.17212/2782-2001-2022-1-121-139.

Правила для авторов

Журнал «Научный вестник НГТУ» основан в 1995 году на базе Новосибирского государственного технического университета. Печатная версия журнала зарегистрирована в Министерстве РФ по делам печати, телевещания и средств массовых коммуникаций в 2000 году. Свидетельство о регистрации ПИ № 77-1599 от 10.02.2000. Периодичность выхода издания – один раз в три месяца (четыре номера в год). В 2021 году был переименован в «Системы анализа и обработки данных». Научно-технические статьи, направленные в адрес журнала, проходят рецензирование и редактирование.

В журнале «Системы анализа и обработки данных» публикуются оригинальные статьи по следующим группам специальностей:

1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки);

2.2.6 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы (технические науки);

2.2.11 – Информационно-измерительные и управляющие системы (технические науки);

2.2.12 – Приборы, системы и изделия медицинского назначения (технические науки);

2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки);

2.3.5 – Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки).

Разделы журнала: информатика, вычислительная техника и управление; приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы.

Рекомендуемый объем статьи 10–16 страниц. Статьи объемом, не превышающим 8 страниц, могут быть размещены в разделе «Краткие сообщения». Возможна публикация дискуссионного материала в разделе «Дискуссии». В информационном разделе возможно размещение сообщений о состоявшихся и планируемых конференциях, семинарах и симпозиумах, сведений о факультетах и специальностях, научных разработках и научных школах. Статьи обзорного характера, как правило, не публикуются.

Website: http://journals.nstu.ru/vestnik

Условия приема статей

В редакцию журнала представляются следующие материалы.

1. Статья, подготовленная в соответствии с правилами оформления, – печатная версия, два экземпляра, подписанных авторами.

2. Контактная информация (телефоны рабочий и сотовый, адреса электронной почты, место работы, адрес места работы, должность, ученая степень, ученое звание автора, ORCID) – печатная версия, два экземпляра.

3. Описание статьи для базы данных «Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)», подготовленное в соответствии с правилами оформления, – печатная версия, один экземпляр.

4. Лицензионный договор, заполненный и подписанный, отправляется со всем пакетом документов; сканированный заполненный договор записывается на диск.

5. Электронная версия статьи, контактной информации, описания статьи для базы данных РИНЦ и сканированный лицензионный договор – в отдельных файлах на CD.

6. Экспертное заключение о возможности опубликования.

Плата за публикацию рукописей не взимается.

Требования к оформлению статьи

Формат оригинала **– A4**. Шрифт **– Times New Roman**. Текст набирается в русифицированном редакторе **Microsoft Word**. Параметры страницы (см):

левое поле – 3,3 верхнее поле – 4,0

правое поле – 3,3 нижнее поле – 3,9.

текстовое поле 22 × 14,4

Межстрочные интервалы одинарные. Перед УДК оставляется четыре пустые строки размером 12. УДК набирается прописными буквами кеглем 8. После УДК перед заголовком оставляется пустая строка размером 8. Название статьи набирается кеглем 14 полужирным строчным шрифтом с отступом слева 1,8 см, без переносов слов, с выравниванием влево. После заголовка оставляется пустая строка размером 12. Фамилии автора – прописным шрифтом кеглем 8. После фамилий оставляется пустая строка размером 7. Указатель сноски * после названия статьи устанавливается в верхнем индексе. В сноске дата поступления статьи указывается курсивным шрифтом кеглем 8. После ФИО авторов статьи набирается аннотация кеглем 8 с отступом первой строки на 0,8 см, межстрочный интервал с множителем 1,1. После аннотации оставляется пустая строка размером 4. **Ключевые слова** – кеглем 8.

Заголовки разделов обязательны (например, **Введение**, **Постановка задачи**, **Методы анализа**, **Основной результат**, **Выводы** или **Заключение**), набираются прописным полужирным прямым шрифтом кеглем 8 с отступом 1,8 см. Перед ними оставляется пустая строка размером 20, после них – пустая строка размером 10. Основной текст – кеглем 10.

Подзаголовки – прописным полужирным шрифтом кеглем 8 с отступом 1,8 см. Перед ними и после них – пустая строка размером 10.

Рисунки представляются в **Corel Draw 11** или **Microsoft Word (RUS)**. Рисунки в других редакторах не принимаются. Слово *Рис*. и его номер выделяются курсивом. Рисунки должны быть черно-белыми, в описании не должно быть ссылок на цвет.

Рисунки и таблицы нумеруются арабскими цифрами по порядку упоминания их в тексте. После номера должно следовать название **на русском и английском языках**. Подрисуночные подписи и названия таблиц – кеглем 9.

Все графы в таблицах должны иметь заголовки и разделяться вертикальными линиями. В головке таблицы по возможности указываются буквенные обозначения параметров и их единицы измерения.

Переменные в тексте набираются курсивным шрифтом кеглем 10. При написании формул использовать MathType версии не выше 6.0C. Формулы набирать по центру кеглем 11, надстрочные и подстрочные индексы – кеглем 9, знаки – кеглем 14 (латинские буквы – курсивным шрифтом, русские и греческие – прямым, цифры – прямым).

Например:

$$A(s) = \sum_{i=0}^{n^2+3} A_i s\lambda^{(i+1)^2} + \alpha\,.$$

Между текстом и формулами, а также между формулами оставляются пустые строки размером 4. Формулы не сжимать. Нумерацию формул указывать справа кеглем 10. Например:

$$D_f = D_c D + N_c N. \qquad (1)$$

Нумерация страниц осуществляется следующим образом: Вставка / Номера страниц...; установить **положение** «вверху страницы», **выравнивание** – «снаружи», без нумерации первой страницы.

Колонтитулы устанавливаются вверху (с отступом от верхнего края страницы 3 см). Чтобы колонтитулы на четной, нечетной и первой страницах отличались, нужно установить: Файл / Параметры страницы / Разметка; установить **разные четные и нечетные** и **первая отличается**.

Колонтитулы на четных страницах. Вид / Колонтитулы; набираются курсивным прописным шрифтом кеглем 8. Фамилия автора с инициалами впереди у правого края без отступа. Если авторов несколько, то указываются только два первых, далее «и др.».

Колонтитулы на нечетных страницах. Названия статьи с прописной буквы курсивным шрифтом кеглем 8, номера страниц – кеглем 10.

Перед списком литературы пустая строка размером 20. Заголовок «Список литературы» – кеглем 8 прописным полужирным шрифтом с отступом 1,8 см. После списка литературы пустая строка размером 10. Порядковый номер с красной строки кеглем 8 с интервалом 1,1. Фамилии и инициалы – кеглем 8 полужирным строчным шрифтом, название статьи (книги) – светлым тем же шрифтом. Оформление библиографического списка по ГОСТ Р.7.0.5–2008. Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления. – М.: Стандартинформ, 2008. – 19 с.

После списка литературы идет пустая строка размером 24. Далее приводятся краткие сведения об авторах кеглем 8 с интервалом 1,1 и отступом от левого края 1 см. Фамилия, имя, отчество – с красной строки курсивом. Последующий текст (ученая степень, ученое звание, членство в академиях и т. д.; основное направление научных исследований; количество имеющихся публикаций, в том числе монографий, учебных пособий; e-mail, рабочий телефон) – прямым шрифтом. **Информация предоставляется на русском и английском языках**.

Далее дается перевод на английский язык фамилии, имени, отчества автора и названия статьи, а также реферата и ключевых слов (обязательно).

Исправления, вносимые автором, при доработке статьи **выделять** желтым цветом.

Требования к оформлению РИНЦ

В описании статьи должна быть указана следующая информация.

1. Номера страниц, на которых размещена статья в сборнике.
2. Коды: УДК, и / или ББК, и / или DOI, и / или других классификационных индексов или систем регистрации.
3. Название статьи.
4. Фамилия, имя, отчество авторов.
5. Место работы каждого автора в именительном падеже. Указать должность автора по основному месту работы.
6. Контактная информация (почтовый адрес места работы, номер телефона, адрес электронной почты – обязательно).
7. Аннотация (не менее 320 и не более 640 знаков).
8. Ключевые слова: каждое слово или словосочетание отделяется от другого запятой (10–20 слов).
9. Пункты 3–8 на английском языке.
10. Список литературы.

Образец оформления приведен на сайте http://journal.nstu.ru/vestnik.