

ВЕСТНИК ВОРОНЕЖСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77 – 74159 от 02.11.2018).

Учредитель: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Подписной индекс в «Каталоге периодических изданий. Газеты и журналы» ГК «Урал Пресс» - 41891. Физические лица могут оформить подписку в интернет-магазине «Деловая пресса» <http://www.ural-press.ru/dlya-fizicheskikh-lits/>

Журнал «Вестник Воронежского государственного технического университета» включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Журнал выходит шесть раз в год

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Главный редактор В.Р. Петренко, д-р техн. наук – Воронеж

Заместитель главного редактора И.Г. Дроздов, д-р техн. наук – Воронеж

Ответственный секретарь Ю.В. Татаренко – Воронеж

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

В.Н. Бурков – д-р техн. наук – Москва;
Д.А. Новиков – д-р техн. наук – Москва;
С. Лухан-Мора – проф. – Испания;
А.К. Погодаев – д-р техн. наук – Липецк;
А.Ф. Тузовский – д-р техн. наук – Москва;
С.Л. Подвальный – д-р техн. наук – Воронеж;
В.Л. Бурковский – д-р техн. наук – Воронеж;
В.В. Куц – д-р техн. наук – Курск;
А.Г. Ивахненко – д-р техн. наук – Курск;
В.П. Смоленцев – д-р техн. наук – Воронеж;
С.Г. Бишутин – д-р техн. наук – Брянск;
В.В. Пешков – д-р техн. наук – Воронеж;
О.Н. Кириллов – д-р техн. наук – Воронеж;
О.Ю. Макаров – д-р техн. наук – Воронеж;
В.П. Пашинцев – д-р техн. наук – Ставрополь;
Ю.Г. Пастернак – д-р техн. наук – Воронеж;
А.В. Ашихмин – д-р техн. наук – Воронеж;
П.П. Чураков – д-р техн. наук – Пенза
А.А. Гладких – д-р техн. наук – Ульяновск;
А.В. Башкиров – д-р техн. наук – Воронеж

Ответственность за подбор и изложение фактов, цитат, статистических данных и прочих сведений несут авторы публикаций. Статьи, поступающие в редакцию, рецензируются. Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов материалов. При перепечатке статей ссылка на журнал обязательна.

Адрес редакции: 394026, Воронеж, Московский проспект, дом 14, комн. 212

Телефон: +7 (473) 246-28-63

E-mail: vestnik@vorstu.ru

Издатель: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Адрес издателя: 394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84

© ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2022

12+

BULLETIN OF VORONEZH STATE TECHNICAL UNIVERSITY

The journal is registered by the Federal service for supervision of communications, information technology, and mass media (registration certificate PI № FS 77 – 74159 02 November 2018)

Founder: Federal State State-Financed Comprehensive Institution of High Education “Voronezh State Technical University”

Subscription index in the «Catalog of periodicals. Newspapers and magazines» of the «Ural Press» Group of Companies – 41891. Individuals can subscribe to it in the online store "Business Press" <http://www.ural-press.ru/dlya-fizicheskikh-lits/>

The journal "Bulletin of Voronezh State Technical University" is included into the list of peer-reviewed editions in which the results of dissertations for obtaining degrees of a Full Doctor and PhD are published.

The journal is published six times a year

EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief V.R. Petrenko, Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh
Deputy Editor-in-Chief I.G. Drozdov, Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh

Executive secretary Yu.V. Tatarenko – Voronezh

MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:

V.N. Burkov – Dr. Sc. (Tech.) – Moscow;
D.A. Novikov – Dr. Sc. (Tech.) – Moscow;
Sergio Lujan Mora – Professor – Spain;
A.K. Pogodaev – Dr. Sc. (Tech.) – Lipetsk;
A.F. Tuzovskiy – Dr. Sc. (Tech.) – Moscow;
S.L. Podvalny – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
V.L. Burkovskiy – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
V.V. Kuts – Dr. Sc. (Tech.) – Kursk;
A.G. Ivakhnenko – Dr. Sc. (Tech.) – Kursk;
V.P. Smolentsev – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
S.G. Bishutin – Dr. Sc. (Tech.) – Bryansk;
V.V. Peshkov – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
O.N. Kirillov – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
O.Yu. Makarov – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
V.P. Pashintsev – Dr. Sc. (Tech.) – Stavropol;
Yu.G. Pasternak – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
A.V. Ashihmin – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
P.P. Churakov – Dr. Sc. (Tech.) – Penza;
A.A. Gladkikh – Dr. Sc. (Tech.) – Ulyanovsk;
A.V. Bashkurov – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh

The authors of publications are responsible for the selection and presentation of facts, quotations, statistics and other information. The articles coming to the editorial office are reviewed. The opinion of the editors may not coincide with the opinion of the authors of the materials. When reprinting articles, the link to the journal is obligatory.

Address: 394026, Voronezh, Moskovskiy prospekt, 14, office 212

Phone number: +7(473)246-28-63

E-mail: vestnik@vorstu.ru

Publisher: Federal State State-Financed Comprehensive Institution of High Education “Voronezh State Technical University”

Publisher address: 394006, Voronezh, 20-letiya Oktyabrya str., 84

© Voronezh State Technical University, 2022

12+

СОДЕРЖАНИЕ

Информатика, вычислительная техника и управление

Точечная оптимизация ламинарного течения вязкой жидкости в сетевом носителе С.Л. Подвальный, В.В. Провоторов, В.Н. Хоанг, З. Тран.....	7
Определение параметров конфигурации нейронной сети для аппроксимации экспериментальных диаграмм растяжения Л.В. Хливненко, В.В. Елисеев, А.М. Гольцев, Н.С. Переславцева.....	17
Гистерезисная модель влагообмена в подстилающей поверхности В.И. Ряжских, Ж.Б. Холмуродов, В.С. Ножкин, О.И. Канищева.....	25
Освещение и рендеринг моделей с импортируемой геометрией в сборочных узлах цифровых макетов изделий А.Н. Юров.....	33
Многоуровневая сигнальная адаптация в нестационарных системах управления С.Л. Подвальный, Е.М. Васильев.....	38
Определение шаблона движения пользователя на тренажере А.А. Сиухин, С.В. Карпушкин.....	48
Методика расчета дальности действия инфракрасных сканирующих систем пассивного типа Д.А. Смирнов, А.М. Делендик, А.В. Николенко, С.Ю. Вахмин, К.В. Николенко.....	56
Коэффициентная обратная задача в математической модели кинетики процесса нефтепереработки Лэ Ван Хуен.....	64
Позиционирование нормалей на топологических поверхностях моделей деталей сборочных узлов А.Н. Юров.....	73
Прямая и обратная задачи для пассивных зон конвейерной обработки протяженного объекта Н.М. Мишачев, А.М. Шмырин, И.И. Супрунов.....	78
Исследование передачи трафика в программно-конфигурируемой сети с использованием Cisco Packet Tracer К.И. Никишин.....	85
О применении регуляризации структуры больших данных для распределенной системы сбора и прогнозирования параметров объектов наблюдений С.С. Колмогорова, Н.О. Голубятникова.....	91

Радиотехника и связь

Разработка схемы оптимального управления высокочастотным усилителем класса D А.В. Башкиров, И.В. Свиридова, Р.Н. Хорошайлов.....	100
Цифровой измеритель действующего значения сигнала В.П. Литвиненко, Ю.В. Литвиненко, Д.В. Шатилов.....	108

Исследование сдвоенного сферического датчика напряженности электрического поля с составными чувствительными элементами

С.В. Бирюков, А.В. Тюкин, Л.В. Тюкина..... 113

Методика взаимодействия каналов поездной радиосвязи, обеспечивающая безопасность передачи данных

М.В. Хорошайлова, А.В. Турецкий, Р.Н. Хорошайлов..... 124

Машиностроение и машиноведение

Непрофилированный электрод-инструмент для комбинированного удаления заусенцев в местах соединения сопряженных гребенчатых поверхностей

О.Н. Кириллов, В.П. Смоленцев, Г.А. Сухочев, С.С. Юхневич, Е.В. Котуков..... 132

CONTENTS

Informatics, computer engineering and control

Point optimization of the laminar flow of a viscous fluid in a network carrier S.L. Podval'ny, V.V. Provotorov, V.N. Hoang, Z. Tran.....	7
Determination of neural network configuration parameters for approximation of experimental tensile curves L.V. Khlivnenko, V.V. Eliseev, A.M. Gol'tsev, N.S. Pereslavl'tseva.....	17
Hysteresis model of moisture exchange in the underlying surface V.I. Ryazhskih, G.B. Kholmurodov, V.S. Nozhkin, O.I. Kanishcheva.....	25
Lighting and model rendering with imported geometry in assembly units of digital product layouts A.N. Yurov.....	33
Multi-level signal adaptation in non-stationary control systems S.L. Podval'ny, E.M. Vasil'ev	38
Determining the user's movement pattern on a simulator A.A. Siukhin, S.V. Karpushkin.....	48
Method of calculating the range of infrared scanning systems of passive type D.A. Smirnov, A.M. Delendik, A.V. Nikolenko, S.Yu. Vakhmin, K.V. Nikolenko.....	56
Coefficient inverse problem in the mathematical model of the refining process kinetics Le Van Huyen.....	64
Positioning normals on the topological surfaces of assembly part models A.N. Yurov.....	73
Direct and inverse problems for passive zones of conveyor processing of extended object N.M. Mishachev, A.M. Shmyrin, I.I. Suprunov.....	78
Research of traffic transmission in a software defined network using Cisco Packet Tracer K.I. Nikishin.....	85
On the application of big data structure regularization in a distributed evaluation system for emergency parameters S.S. Kolmogorova, N.O. Golubyatnikova.....	91

Radio engineering and communication

Development of an optimal control scheme for a D-class high-frequency amplifier A.V. Bashkurov, I.V. Sviridova, R.N. Khoroshaylov.....	100
Digital meter of the effective value of the signal V.P. Litvinenko, Y.V. Litvinenko, D.V. Shatilov.....	108

Investigation of a dual spherical electric field strength sensor with composite sensitive elements S.V. Biryukov, A.V. Tyukin, L. V. Tyukina	113
--	------------

Method of interaction of train radio communication channels, ensuring the security of data transmission M.V. Khoroshaylova, A.V. Turetskiy, R.N. Khoroshaylov.....	124
--	------------

Mechanical engineering and science of machines

Unprofiled tool electrode for combined removal of burr in points of joining matching comb surfaces O.N. Kirillov, V.P. Smolentsev, G.A. Sukhochev, S.S. Yukhnevich, E.V. Kotukov.....	132
---	------------

Информатика, вычислительная техника и управление

DOI 10.36622/VSTU.2022.18.5.001

УДК 517.929.2

ТОЧЕЧНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЛАМИНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В СЕТЕВОМ НОСИТЕЛЕ

С.Л. Подвальный¹, В.В. Провоторов², В.Н. Хоанг², З. Тран²

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматривается задача точечной оптимизации дифференциально-разностной системы уравнений, формализмами которой представлен процесс ламинарного течения вязкой жидкости в сетевом носителе и дискретно изменяющейся временной переменной. При этом допускается анализ многофазовых сред. Представлены условия односторонней слабой разрешимости дифференциально-разностной системы и непрерывной зависимости слабого решения от исходных данных. Внешнее влияние на математическую модель процесса переноса (дифференциально-разностную систему) осуществляется с помощью воздействий, сосредоточенных во всех внутренних местах сопряжения (ветвления) сетевого носителя сплошной среды. Наблюдение состояния дифференциально-разностной системы осуществляется во всей области изменения пространственной переменной при дискретно изменяющейся временной переменной, минимизирующий функционал задается коэрцитивной квадратичной формой и положительным оператором, гарантирующим единственность решения оптимизационной задачи. В исследовании существенно используется сопряженное состояние и сопряженная система для исходной дифференциально-разностной системы уравнений. Получены необходимые и достаточные условия определения оптимума задачи точечной оптимизации дифференциально-разностной системы уравнений. Показана связь дифференциально-разностной системы уравнений с дискретно изменяющейся временной переменной и эволюционной дифференциальной системой уравнений с непрерывно изменяющейся временной переменной

Ключевые слова: ориентированный граф, дифференциально-разностная система, сопряженная система, точечная оптимизация

Введение

Вопросы оптимизации дифференциальных систем, используемых в качестве математического описания различного типа сетеподобных процессов переноса сплошных сред, достаточно давно являются предметом исследования (см., например, [1–7]). При этом изучались и смежные вопросы: устойчивость и стабилизация волновых процессов [8, 9], управление волновыми процессами [10 – 12]. Переход к дифференциально-разностным системам и анализу задач оптимизации для них явился следующим естественным шагом исследования в попытке приблизиться к решению прикладных задач, имеющих свою специфику, открывающую широкие возможности алгоритмизации и цифровизации современных технологических процессов перемещения жидких сред и газов. Используемый метод полудискретизации

является достаточно универсальным методом, дающим эффективный инструмент моделирования указанных процессов формализмами дифференциально-разностной системы – математической модели ламинарного течения вязкой жидкости в сетевом носителе. Подробно рассматривается частный случай: задача точечной оптимизации дифференциально-разностной системы с помощью воздействий, сосредоточенных во всех внутренних местах сопряжения (ветвления) сетевого носителя сплошной среды. В исследовании существенно используется сопряженное состояние и сопряженная система для дифференциально-разностной системы – получены условия, достаточно просто проверяемые на практике, выполнение которых гарантирует определение оптимального точечного управления. Представленные результаты открывают пути анализа задач оптимального управления и родственных им задач.

Основные понятия, используемые утверждения

В качестве математического аналога

сетевого носителя ламинарного потока сплошной среды используется геометрический граф-дерево [1 – 3] со свойственной ему топологией.

Пусть Γ – ориентированный ограниченный граф, ребра которого параметризованы отрезком $[0,1]$; Γ_0 – совокупность всех ребер, параметризованных интервалом $(0,1)$ ($\bar{\Gamma}_0 = \Gamma$); $\partial\Gamma$ и $J(\Gamma)$ – множества граничных и внутренних узлов графа, соответственно (I – множество индексов внутренних узлов, J – число внутренних узлов).

В работе изучается задача оптимизации дифференциально-разностной системы уравнений

$$\begin{aligned} \frac{1}{\tau}(y(k) - y(k-1)) - \frac{d}{dx}\left(a(x)\frac{dy(k)}{dx}\right) + \\ + b(x)y(k) = f(k), \end{aligned} \quad (1)$$

$$k = 1, 2, \dots, M,$$

где $y(k) := y(x; k)$ и $f(k) := f(x; k)$, $k = 1, 2, \dots, M$ (система (1) подробно изучалась в работе [7]). Введем пространство состояний $y(k)$ ($k = 1, 2, \dots, M$) для уравнения (1). При этом будем использовать стандартные обозначения для классических пространств:

$L_p(\Gamma)$ ($p = 1, 2$) – пространство, элементы которого являются измеримые на Γ_0 функции, интегрируемые с p -й степенью на Γ_0 ; $W_2^1(\Gamma)$ – пространство функций $y(x) \in L_2(\Gamma)$ с обобщенной производной $\frac{dy}{dx} \in L_2(\Gamma)$.

На функциях $\mu, \nu \in W_2^1(\Gamma)$ рассмотрим функционал (билинейную форму)

$$\ell(\mu, \nu) = \int_{\Gamma} \left(a(x) \frac{d\mu(x)}{dx} \frac{d\nu(x)}{dx} + b(x)\mu(x)\nu(x) \right) dx, \quad (2)$$

где $a(x)$, $b(x)$ – измеримые ограниченные на Γ_0 функции суммируемыми с квадратом:

$$0 < a_* \leq a(x) \leq a^*, \quad |b(x)| \leq \beta, \quad x \in \Gamma_0,$$

a_* , a^* , β – фиксированные постоянные. Из результатов работы Следует отметить, что в $W_2^1(\Gamma)$ содержится совокупность $\Omega_a(\Gamma)$ функций $y(x) \in C(\Gamma)$ (через $C(\Gamma)$ обозначена совокупность функций, непрерывных на Γ), для которых имеет место равенство

$$\sum_{\gamma \in R(\xi)} a(1)_{\gamma} \frac{dy(1)_{\gamma}}{dx} = \sum_{\gamma \in r(\xi)} a(0)_{\gamma} \frac{dy(0)_{\gamma}}{dx},$$

при любых $\xi \in J(\Gamma)$ (через $R(\xi)$ и $r(\xi)$ обозначены наборы ребер γ , соответственно ориентированных к ξ и от ξ , числа 0 и 1 для переменной x являются границами интервала $(0,1)$ и параметризуют соответствующие концевые точки для γ , обозначение $\theta(\cdot)_{\gamma}$ означает проекцию функции $\theta(\cdot)$ на γ). Обозначим через $W^1(a; \Gamma)$ пространство Соболева, определяемое замыканием $\Omega_a(\Gamma)$ в пространстве $W_2^1(\Gamma)$. Если элементы $y(x) \in \Omega_a(\Gamma)$ удовлетворяют краевому условию $u(x)|_{\partial\Gamma} = 0$, то замыкание $\Omega_a(\Gamma)$ в $W_2^1(\Gamma)$ дает пространство $W_0^1(a; \Gamma)$; очевидно включение $W_0^1(a; \Gamma) \subset W_2^1(\Gamma)$.

Везде ниже будем считать, что $f(k) \in L_2(\Gamma)$, $k = 1, 2, \dots, M$, а $y(k)$ удовлетворяют следующим условиям:

$$y(0) = \varphi(x), y(k)|_{x \in \partial\Gamma} = 0, \quad k = 1, 2, \dots, M. \quad (3)$$

Определение 1. Слабым (обобщенным) решением дифференциально-разностной системы уравнений (1) с условиями (3) называется совокупность функций $y(k) \in W_0^1(a; \Gamma)$, $k = 1, 2, \dots, M$, которые удовлетворяют интегральным тождествам

$$\int_{\Gamma} y(k) \eta(x) dx + \ell(y(k), \eta) = \int_{\Gamma} f(k) \eta(x) dx, \quad k = 1, 2, \dots, M,$$

для любого элемента $\eta(x)$ пространства $W_0^1(a, \Gamma)$, равенство $y(0) = \varphi(x)$ в (3) понимается почти всюду; $y(k)_i$ и $\ell(y(k), \eta)$ определяются соотношениями

$$\begin{aligned} y(k)_i &= \frac{1}{\tau} [y(k) - y(k-1)], \\ \ell(y(k), \eta) &= \int_{\Gamma} \left(a(x) \frac{dy(k)(x)}{dx} \frac{d\eta(x)}{dx} + by(k)(x)\eta(x) \right) dx. \end{aligned}$$

Таким образом, дифференциально-разностная система уравнений (1) – (3) является математической моделью ламинарного течения вязкой жидкости по сетовому носителю Γ при дискретном изменении временной переменной. В приложениях система (1) – (3) может использоваться в качестве инструмента

наблюдения по информации в дискретном времени о состоянии сетевого трубопровода, оценки изменений технических характеристик процесса транспортировки вязких сред и последующего принятия решений. Следует отметить, что сетевой носитель имеет характерное отличие от магистрального. Последний не содержит мест (узлов) ветвления гидросистемы и его математическим аналогом является простейший граф, ребра которого сочленены последовательно [2].

Замечание 1. Для каждого фиксированного k ($k=1,2,\dots,M$) соотношения (1), (3) задают краевую задачу в пространстве $W_0^1(a,\Gamma)$ для эллиптического уравнения (1) относительно $y(k)$. Для такого уравнения слабая однозначная разрешимость установлена в работе [13]. Таким образом, решение этих краевых задач определяет состояние $y = \{y(k), k=1,2,\dots,M\}$ системы (1), (3).

Сформулируем основополагающие утверждения, доказательство которых приведено в работе [13].

Теорема 1. Дифференциально-разностная система уравнений (1), (3) обладает следующими свойствами:

1) при любом $1 \leq k_0 < M$ и произвольном $\varphi(x) \in L_2(\Gamma)$ слабое решение $y := \{y(k), k=1,2,\dots,M\}$ определяется единственным образом,

2) слабое решение дифференциально-разностной системы (1), (3) непрерывно зависит от исходных данных $\varphi(x)$, $f(k)$.

Задача точечной оптимизации

Обратимся к задаче точечной оптимизации дифференциально-разностной системы (1), (3) точечными управляющими воздействиями, сосредоточенными во всех внутренних узлах множества $J(\Gamma)$. Для каждого узла $\xi_i \in J(\Gamma)$, $i \in I$, зафиксируем одно ребро $\gamma^{\xi_i} \in R(\xi_i)$. Для каждого фиксированного $k=1,2,\dots,M$ точечное управление $v(k)$ определяется множеством чисел $v_i(k)$: $v(k) = \{v_i(k), i \in I\}$. При этом $\{v_i(k), i \in I\} \in U$ ($k=1,2,\dots,M$) и множество $U \subset \mathbb{R}^J$ задается в зависимости от характера прикладных задач. Таким образом, управляющие воздействия $v(k)$

($k=1,2,\dots,M$) сосредоточены в концевых точках фиксированных ребер $\gamma^{\xi_i} \in R(\xi_i)$ каждого внутреннего узла ξ_i , $i \in I$.

Пусть функции $f(k)$ ($k=1,2,\dots,M$) в системе уравнений (1) определены соотношениями

$$f(k) = \sum_{i \in I} v_i(k) \delta(x - x^i) \Big|_{x^i = 1 \in \gamma^{\xi_i}}, \quad (k=1,2,\dots,M),$$

состояние $y(x, k; v(k))$ ($k=1,2,\dots,M$) системы (1) определено дифференциально-разностной системой уравнений

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\tau} [y(k; v(k)) - y(k-1; v(k-1))] - \\ & - \frac{d}{dx} \left(a(x) \frac{dy(k; v(k))}{dx} \right) + b(x) y(k; v(k)) = \\ & = \sum_{i \in I} v_i(k) \delta(x - x^i) \Big|_{x^i = 1 \in \gamma^{\xi_i}}, \quad k=1,2,\dots,M, \end{aligned} \quad (4)$$

$$y(0; v(0)) := y(0) = \varphi(x), \quad y(k; v(k)) \Big|_{x \in \partial\Gamma} = 0, \quad k=1,2,\dots,M. \quad (5)$$

В соответствии с определением 1 дадим определение слабого решения дифференциально-разностной системы уравнений (4), (5).

Определение 2. Слабым (обобщенным) решением дифференциально-разностной системы уравнений (4) с условиями (5) называется совокупность функций $y(k) \in W_0^1(a; \Gamma)$, $k=1,2,\dots,M$, которые удовлетворяют интегральным тождествам

$$\begin{aligned} & \int_{\Gamma} y(k; v(k)) \eta(x) dx + \ell(y(k; v(k)), \eta) = \\ & = \sum_{i \in I} v_i(k) \eta_i, \quad k=1,2,\dots,M, \end{aligned}$$

для любого элемента $\eta(x)$ пространства $W_0^1(a; \Gamma)$; здесь $\eta_i = \eta(x) \Big|_{x^i = 1 \in \gamma^{\xi_i}}$, $\xi_i \in J(\Gamma)$, $i \in I$.

В целях простоты дальнейшего изложения будем считать, что наблюдение состояния $y(k; v(k))$ системы (4), (5) осуществляется на всей области Γ . Как следует из утверждения 2 теоремы 1, линейное отображение $v(k) \rightarrow y(k; v(k))$ множества U в пространство $W_0^1(a; \Gamma)$ непрерывно для любого $k=1,2,\dots,M$.

Введем функционал $\Psi(v)$ следующим соотношением

$$\Psi(v) := \Psi(v(1), v(2), \dots, v(M)) = \tau \sum_{n=1}^M \Psi_k(v(k)), \quad (6)$$

$$\Psi_k(v(k)) = \|y(k; v(k)) - w_0(k)\|_{L_2(\Gamma)}^2 + (Nv(k), v(k))_{\mathbb{R}^J},$$

где $w_0(k)$ ($k = 1, 2, \dots, M$) – заданные элементы пространства $L_2(\Gamma)$, оператор $N: U \rightarrow U$ положительно определен, для него выполнены условия

$$(N(v(k), v(k)))_{\mathbb{R}^J} \geq \varsigma \|v(k)\|_{\mathbb{R}^J}^2, \varsigma > 0, \quad \forall v(k) \in U, \quad k = 1, 2, \dots, M. \quad (7)$$

Здесь и везде ниже символами $(\cdot, \cdot)$ и $(\cdot, \cdot)_{\mathbb{R}^J}$ обозначаются скалярные произведения в пространствах $L_2(\Gamma)$ и $\mathbb{R}^J$, соответственно, если это не оговорено специально. Структура функционала $\Psi(v)$ формируется оператором, устанавливающим соотношение $v \rightarrow y(v)$. Этот оператор при $k = 1, 2, \dots, M$ осуществляет связь функции (управляющего воздействия) $v(k) \in U \subset \mathbb{R}^J$ с функцией $y(k; v(k))$ – состоянием системы (4), (5).

Далее будем считать, что область U_δ является ограниченным подмножеством множества U .

Задача точечной оптимизации дифференциально-разностной системы (4), (5) определяется поиском

$$\inf_{v \in U_\delta} \Psi(v), \quad v = \{v(k), k = 1, 2, \dots, M\}.$$

Теорема 2. *Задача точечной оптимизации системы (4), (5) однозначно разрешима: $v^* = \{v^*(k), k = 1, 2, \dots, M\} \in U_\delta$, $\Psi(v^*) = \inf_{v \in U_\delta} \Psi(v)$; v^* – оптимум системы (4), (5).*

Доказательство. Выше установлена непрерывность отображения $v \rightarrow y(v)$, определяющая связь совокупности допустимых управлений U и пространства состояний $W_0^1(a, \Gamma)$ дифференциально-разностной системы (4), (5). Исходя из этого, используется свойство коэрцитивности квадратичной составляющей функционала $\Psi(v)$ на ограниченном множестве U_δ . Для любого $k = 1, 2, \dots, M$ справедливы соотношения

$$\begin{aligned} \Psi_k(v(k)) &= \|y(k; v(k)) - w_0(k)\|_{L_2(\Gamma)}^2 + (Nv(k), v(k))_{\mathbb{R}^J} = \\ &= \|y(k; v(k)) - y(0; v(0)) + y(0; v(0)) - w_0(k)\|_{L_2(\Gamma)}^2 + \\ &\quad + (Nv(k), v(k))_{\mathbb{R}^J} = \\ &= \mathfrak{F}_k(v(k), v(k)) - 2\mathfrak{L}_k(v(k)) + \|y(0; v(0)) - w_0(k)\|_{L_2(\Gamma)}^2, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} \mathfrak{F}_k(v(k), v(k)) &= (y(k; v(k)) - y(0; v(0)), y(k; v(k)) - \\ &\quad - y(0; v(0))) + (Nv(k), v(k))_{\mathbb{R}^J}, \end{aligned}$$

является квадратичной формой на множестве U , выражение

$$\mathfrak{L}_k(v(k)) = (w_0(k) - y(0; v(0)), y(k; v(k)) - y(0; v(0)))$$

определяет линейную форму на $\mathbb{R}^J$. Из сказанного вытекает представление

$$\begin{aligned} \Psi(v) &= \mathfrak{F}(v, v) + \mathfrak{L}(v), \quad \mathfrak{F}(v, v) = \\ &= \tau \sum_{n=1}^M \mathfrak{F}_k(v(k), v(k)), \quad \mathfrak{L}(v) = \tau \sum_{n=1}^M \mathfrak{L}_k(v(k)). \end{aligned}$$

Условия (7) гарантируют коэрцитивность квадратичной формы $\mathfrak{F}(v, v)$. Дальнейшие рассуждения повторяют приведенные в работе [14, с. 13].

Замечание 2. В случае $N = 0$ можно показать, что при выполнении условий теоремы 1 существует непустое замкнутое и выпуклое подмножество $U_\delta^0 \subset U_\delta$ такое, что

$$\Psi(v^*) = \inf_{v \in U_\delta^0} \Psi(v), \quad \forall v \in U_\delta^0.$$

Доказательство этого факта аналогично представленному в работе [14, теорема 5.2, с. 47].

Далее остановимся на подробном изучении условий существования оптимального управления и получим соотношения, определяющие оптимальное управление. Для упрощения представлений различных преобразований дальнейшие действия проводятся одновременно для всех состояний $y(k; u(k))$ и управлений $u(k)$, $k = 1, 2, \dots, M$; обозначения $y(k; u(k))$, $y(k; u(k))_i$ и $u(k)$ заменяются на $y(u)$, $y(u)_i$ и u , соответственно.

Докажем следующие вспомогательные утверждения.

Лемма 1. Пусть выполнены условия теоремы 1 и $u^* = \{u^*(k), k=1, 2, \dots, M\} \in U_\delta$ - минимизирующий элемент функционала $\Psi(v)$, тогда неравенство

$$\Psi'(u^*)(v - u^*) \geq 0, \quad (8)$$

выполняется для любого $v \in U_\delta$; производная $\Psi'(u^*)$ понимается в смысле Фреше.

Доказательство. Так как u^* - минимизирующий элемент функционала $\Psi(v)$, то для любого $v \in U_\delta$ и любого числа $\theta \in (0, 1)$ справедливо неравенство $\Psi(u^*) \leq \Psi((1-\theta)u^* + \theta v)$, а это означает, что

$$\begin{aligned} \frac{1}{\theta} [\Psi((1-\theta)u^* + \theta v) - \Psi(u^*)] &= \\ &= \frac{1}{\theta} [\Psi(u^* + \theta(v - u^*)) - \Psi(u^*)] \geq 0, \end{aligned}$$

и при $\theta \rightarrow 0$ $\Psi'(u^*)(v - u^*) \geq 0$, откуда следует (8). Верно и обратное утверждение. Действительно, пусть для некоторого фиксированного $u \in U_\delta$ справедливо неравенство $\Psi'(u)(v - u) \geq 0$ для любого $v \in U_\delta$. В силу выпуклости отображения $v \rightarrow \Psi(v)$ (см. доказательство теоремы 2) для любого $v \in U_\delta$ имеет место

$$\begin{aligned} \frac{1}{\theta} [\Psi((1-\theta)u + \theta v) - \Psi(u)] &= \\ &= \frac{1}{\theta} [\Psi(u^* + \theta(v - u^*)) - \Psi(u^*)] \leq \Psi(v) - \Psi(u), \end{aligned}$$

а значит, $0 \leq \Psi'(u)(v - u) \leq \Psi(v) - \Psi(u)$ при $\theta \rightarrow 0$. Отсюда следует $\Psi(v) \geq \Psi(u)$ для любого $v \in U_\delta$, т. е. u - минимизирующий элемент функционала $\Psi(v)$.

Лемма 2. Пусть v, u произвольные элементы множества U_δ , тогда справедливо соотношение

$$y'(u)(v - u) = y(v) - y(u) \quad (9)$$

(здесь $y'(u)$ - производная в смысле Фреше отображения $u \rightarrow y(u)$).

Доказательство. Исходя из определения 2 для управлений $u(k), v(k) \in U_\delta$ ($k = 0, 1, \dots, M$) имеет место

$$\begin{aligned} &\frac{1}{\tau} \int_{\Gamma} [(y(k; v(k)) - y(k; u(k))) - \\ &- (y(k-1; v(k-1)) - y(k-1; u(k-1)))] \eta(x) dx + \quad (10) \\ &+ \ell(y(k; v(k)) - y(k; u(k)), \eta) = \sum_{i \in I} (v_i(k) - v_i(k)) \eta_i, \end{aligned}$$

при произвольном выборе функции $\eta(x) \in W_0^1(a, \Gamma)$; $\eta_i = \eta(x)|_{x=\xi_i}$, $\xi_i \in J(\Gamma)$. Нетрудно установить справедливость соотношения

$$\begin{aligned} &\frac{1}{\tau} \int_{\Gamma} [(y(k; u(k) + \vartheta(v(k) - u(k))) - y(k; u(k))) - \\ &- (y(k-1; u(k-1) + \vartheta(v(k-1) - u(k-1))) - \\ &- y(k-1; u(k-1)))] \eta(x) dx + \\ &+ \ell(y(k; u(k) + \vartheta(v(k) - u(k))) - \\ &- y(k; u(k)), \eta) = \vartheta \sum_{i \in I} (v_i(k) - v_i(k)) \eta_i, \end{aligned}$$

при любом выборе постоянной ϑ из интервала $(0, 1)$ и произвольной функции $\eta(x) \in W_0^1(a, \Gamma)$; $\eta_i = \eta(x)|_{x=\xi_i}$, $\xi_i \in J(\Gamma)$. Разделив полученное равенство на ϑ и переходя к пределу с $\vartheta \rightarrow 0$, получим соотношение

$$\begin{aligned} &\frac{1}{\tau} \int_{\Gamma} [y'(k; u(k))(v(k) - u(k)) - \\ &- y'(k-1; u(k-1))(v(k-1) - u(k-1))] \eta(x) dx + \quad (11) \\ &+ \ell(y'(k; u(k))(v(k) - u(k)), \eta) = \sum_{i \in I} (v_i(k) - v_i(k)) \eta_i \end{aligned}$$

при произвольной функции $\eta(x) \in W_0^1(a, \Gamma)$; $\eta_i = \eta(x)|_{x=\xi_i}$, $\xi_i \in J(\Gamma)$. Сравнение левых частей (10) и (11) приводит к соотношениям

$$\begin{aligned} y'(k; u(k))(v(k) - u(k)) &= y(k; v(k)) - y(k; u(k)), \\ k &= 0, 1, \dots, M, \end{aligned}$$

которые завершают доказательство леммы.

Пусть $u(k)$ является оптимальным управлением для каждого фиксированного $k = 1, 2, \dots, M$, тогда в силу (8) и (9) имеем

$$\begin{aligned} &\frac{1}{2} \Psi'_k(u(k))(v(k) - u(k)) = \\ &= (y(k; u(k)) - w_0(k), y'(k; u(k))(v(k) - u(k))) + \\ &+ (Nu(k), v(k) - u(k))_{\mathbb{R}^J} = \quad (12) \\ &= (y(k; u(k)) - w_0(k), y(k; v(k)) - y(k; u(k))) + \\ &+ (Nu(k), v(k) - u(k))_{\mathbb{R}^J} \geq 0. \end{aligned}$$

для любого $v(k) \in U_\delta$.

Из соотношений (12) следует неравенство

$$(y(k; u(k)) - w_0(k), y(k; v(k)) - y(k; u(k))) + (Nu(k), v(k) - u(k))_{\mathbb{R}^J} \geq 0, \quad (13)$$

а значит, исходя из представления (6) функционала $\Psi(v)$ и соотношения (7), приходим к неравенству

$$\tau \sum_{k=1}^M [(y(k; u(k)) - w_0(k), y(k; v(k)) - y(k; u(k))) + (Nu(k), v(k) - u(k))_{\mathbb{R}^J}] \geq 0, \quad (14)$$

для любого $v(k) \in U_\delta$. Таким образом, неравенство (13) является необходимым условием существования оптимального управления системой (4), (5) и имеет место следующее утверждение.

Теорема 3. Пусть выполнено утверждение теоремы 2, оптимальное управление $u \in \mathbb{U}_\delta$ характеризуется соотношениями

$$\int_{\Gamma} y(k; u(k))_i \eta(x) dx + \ell(y(k; u(k)), \eta) = \sum_{i \in I} v_i(k) \eta_i, \quad k = 1, 2, \dots, M,$$

для любой функции $\eta(x) \in W_0^1(a, \Gamma)$; $\eta_i = \eta(x)|_{x=1 \in \gamma_i^{\xi_i}}$, здесь $\xi_i \in J(\Gamma)$ и $i \in I$;

$$\sum_{i \in I} p_i(k; u(k))(v_i(k) - u_i(k)) + (Nu(k), v(k) - u(k))_{\mathbb{R}^J} \geq 0, \quad k = 0, 1, \dots, M.$$

для любого $v(k) \in U_\delta$; здесь $y(k; u(k)) \in W_0^1(a, \Gamma)$, $k = 0, 1, \dots, M$, $x \in \Gamma$.

Для более детального описания условий существования оптимального управления введем сопряженное состояние для системы (4), (5). В пространстве $W_0^1(a; \Gamma)$ понятие сопряженного состояния $p(k; v(k))$ ($k = 1, 2, \dots, M$) и сопряженной системы к системе (4), (5) определим, исходя из следующей задачи

$$-\frac{1}{\tau} [p(k+1; v(k+1)) - p(k; v(k))] -$$

$$-\frac{d}{dx} \left(a(x) \frac{dp(k; v(k))}{dx} \right) + b(x) p(k; v(k)) = y(k; v(k)) - w_0(k), \quad k = 0, 1, \dots, M-1, \quad (15)$$

$$p(M; v(M)) = 0, \quad p(k; v(k))|_{x \in \partial \Gamma} = 0, \quad k = 0, 1, \dots, M-1. \quad (16)$$

Теорема 4. Слабое (обобщенное) решение дифференциально-разностной системы уравнений (15), (16) является элементом $W_0^1(a; \Gamma)$ и однозначно определено при достаточно малых τ .

Доказательство. Чтобы в этом убедиться, достаточно перенумеровать соотношения системы (15), (16) и применить утверждение теоремы 1. Действительно, меняя нумерацию по закону $l = M - k$, $k = M, M-1, \dots, 1, 0$, получим, что l меняется от 0 до M и мы приходим к системе

$$-\frac{1}{\tau} [\tilde{p}(l-1; v(l-1)) - \tilde{p}(l; v(l))] - \frac{d}{dx} \left(a(x) \frac{d\tilde{p}(l; v(l))}{dx} \right) + b(x) \tilde{p}(l; v(l)) = y(l; v(l)) - w_0(l), \quad l = 1, 2, \dots, M,$$

$$\tilde{p}(0; v(0)) = 0, \quad \tilde{p}(l; v(l))|_{x \in \partial \Gamma} = 0, \quad l = 1, 2, \dots, M,$$

относительно совокупности функций $\tilde{p}(l; v(l))$ ($l = 1, 2, \dots, M$), для которой имеют место свойства, установленные утверждениями теоремы 1. Доказательство теоремы завершено.

Неравенство (13) при фиксированном k ($k = 1, 2, \dots, M$) можно преобразовать. А именно, учитывая соотношения

$$-\frac{1}{\tau} \sum_{k=0}^{M-1} [p(k+1; u(k+1)) - p(k; u(k))] \cdot [y(k; v(k)) - y(k; u(k))] = \frac{1}{\tau} \sum_{k=1}^M \{ [y(k; v(k)) - y(k; u(k))] - [y(k-1; v(k-1)) - y(k-1; u(k-1))] \} p(k; u(k)),$$

$$\sum_{k=0}^{M-1} \ell(p(k; u(k)), y(k; v(k)) - y(k; u(k))) = \sum_{k=1}^M \ell(y(k; v(k)) - y(k; u(k)), p(k; u(k))),$$

получим соотношение, определяемое равенством

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^{M-1} (y(k; v(k)) - w_0(k), y(k; v(k)) - y(k; u(k))) = \\ = \sum_{k=1}^M \sum_{i \in I} p_i(k; u(k))(v_i(k) - u_i(k)) = \\ = \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{i \in I} p_i(k; u(k))(v_i(k) - u_i(k)), \end{aligned}$$

при этом используются соотношения $p_i(k; u(k)) = p(k; u(k))|_{x=x_i \in \xi_i}$, $\xi_i \in J(\Gamma)$, и $y(0; v(0)) - y(0; u(0)) = 0$, $p(M; u(M)) = 0$. Таким образом, полученное выше равенство приводит к соотношению

$$\sum_{i \in I} p_i(k; u(k))(v_i(k) - u_i(k)) = \sum_{i \in I} p_i(k; u(k))(v_i(k) - u_i(k)),$$

при фиксированном k ($k = 1, 2, \dots, M$). Учитывая это, соотношение (13) можно переписать в виде

$$\begin{aligned} \sum_{i \in I} p_i(k; u(k))(v_i(k) - u_i(k)) + \\ (Nu(k), v(k) - u(k))_{\mathbb{R}^J} \geq 0, \quad k = 0, 1, \dots, M, \end{aligned} \quad (17)$$

а неравенство (14) преобразуется к виду

$$\begin{aligned} \tau \sum_{k=0}^{M-1} [\sum_{i \in I} p_i(k; u(k))(v_i(k) - u_i(k)) \\ + Nu(k), v(k) - u(k)]_{\mathbb{U}} \geq 0, \quad (18) \\ \forall v(k) \in U_\partial, \quad k = 0, 1, \dots, M, \end{aligned}$$

(как и выше, учитывается $y(0; v(0)) - y(0; u(0)) = 0$ и $p(M; u(M)) = 0$).

Таким образом, утверждение теоремы 3 (а именно, представление неравенства (13) с помощью неравенств (17) и (18)) можно уточнить, используя информацию о состоянии $p(k; u(k))$ системы (15), (16) – справедливо следующее утверждение.

Теорема 5. Пусть выполнено утверждение теоремы 2, оптимум $u \in \mathbb{U}_\partial$ характеризуется соотношениями

$$\begin{aligned} \int_{\Gamma} y(k; u(k))_i \eta(x) dx + \ell(y(k; u(k)), \eta) = \\ = \sum_{i \in I} v_i(k) \eta_i, \quad k = 1, 2, \dots, M, \end{aligned}$$

для любой функции $\eta(x) \in W_0^1(a, \Gamma)$; $\eta_i = \eta(x)|_{x=1 \in \gamma_i^\xi}$, здесь $\xi_i \in J(\Gamma)$ и $i \in I$;

$$\begin{aligned} \int_{\Gamma} p(k; u(k))_i \eta(x) dx + \ell(p(k; u(k)), \eta) = \\ = \int_{\Gamma} (y(k; v(k)) - w_0(k)) \eta(x) dx, \quad k = 1, 2, \dots, M, \end{aligned}$$

для произвольной фиксированной функции $\eta(x) \in W_0^1(a, \Gamma)$;

$$\begin{aligned} \sum_{i \in I} p_i(k; u(k))(v_i(k) - u_i(k)) + \\ + (Nu(k), v(k) - u(k))_{\mathbb{R}^J} \geq 0, \quad k = 0, 1, \dots, M, \end{aligned}$$

для произвольной фиксированной функции $v(k) \in U_\partial$. При этом $y(k; u(k))$, $p(k; u(k))$ ($k = 0, 1, \dots, M$) принадлежат пространству $W_0^1(a, \Gamma)$ и выполнены условия $y(0; v(0)) = \varphi(x)$, $p(M; v(M)) = 0$.

Полученные утверждения (теоремы 4 и 5) представляют необходимые и достаточные условия определения оптимума $u \in \mathbb{U}_\partial$ задачи точечной оптимизации дифференциально-разностной системы (4), (5). При этом существенно используется состояние $p(k; u(k))$ сопряженной системы (15), (16), соответствующее состоянию $y(k; u(k))$ исходной дифференциально-разностной системы (4), (5) при $k = 1, 2, \dots, M$.

Следует отметить, что используемый подход и полученные при этом результаты являются основополагающими при анализе задач оптимизации для дифференциальных систем разного типа сетевых процессов прикладного характера (см. работы [15 – 17] и библиографию там).

Заключение

В работе рассмотрена задача точечной оптимизации дифференциально-разностной системы для эволюционной системы процесса переноса сплошной среды

$$\begin{aligned} \frac{\partial y(x, t)}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(a(x) \frac{\partial y(x, t)}{\partial x} \right) + b(x) y(x, t) = \\ = \sum_{i \in I} v_i(x, t) \delta(x - x^i) \Big|_{x^i = 1 \in \gamma_i^{\xi_i}}, \quad x, t \in \Gamma_T = \Gamma \times (0, T), \end{aligned}$$

по сетевому носителю Γ ($x \in \Gamma$), $T < \infty$. Последнее осуществляет математическое

описание указанного процесса при непрерывном изменении временной переменной. Представленная дифференциально-разностная система уравнений (1) – (3) является математической моделью ламинарного течения вязкой жидкости по сетевому носителю Γ при дискретном изменении временной переменной t по сетке $\{t_k\}$. Такая система может использоваться в качестве инструмента наблюдения по информации в дискретном времени t_k о состоянии сетевого трубопровода, оценке изменений технических характеристик процесса транспортировки вязких сред и последующего принятия решений.

Рассматривается частный случай – задача точечного управляющего воздействия на управляемую дифференциально-разностную систему (4), (5) с помощью управлений, сосредоточенных во всех узлах $J(\Gamma)$ сети (графа). В исследовании существенно используется сопряженное состояние и сопряженная система (15), (16) для исходной дифференциально-разностной системы (4), (5), получены соотношения, определяющие оптимальное точечное управление (утверждения теоремы 5).

Литература

1. Подвальный С.Л., Провоторов В.В. Определение стартовой функции в задаче наблюдения параболической системы с распределенными параметрами на графе // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2014. Т. 10. № 6. С. 29-35.
2. Волкова А.С., Гнилицкая Ю.А., Провоторов В.В. О разрешимости краевых задач для уравнений параболического и гиперболического типов на геометрическом графе // Системы управления и информационные технологии. 2013. №1 (51). С. 11-15.
3. Podvalny S.L., Provotorov V.V., Podvalny E.S. The controllability of parabolic systems with delay and distributed parameters on the graph // Procedia Computer Science. 2017. Vol. 103. P. 324-330.
4. On a 3D model of non-isothermal flows in a pipeline network/ M.A. Artemov, E.S. Baranovskii, A.P. Zhabko, V.V. Provotorov // Journal of Physics. Conference Series. 2019. Vol. 1203, Article ID 012094. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1203/1/012094>
5. Zhabko A.P., Provotorov V.V. and Balaban O.R. 2019 Stabilization of weak solutions of parabolic systems with distributed parameters on the graph // Vestnik of Saint Petersburg University. Applied mathematics. Computer science. Control processes. 2019. Vol. 15. No. 2. P. 187-198. <https://doi.org/10.21638/11702/spbu10.2019.203>
6. Zhabko A.P., Nurtazina K.B., Provotorov V.V. About one approach to solving the inverse problem for parabolic equation // Vestnik of Saint Petersburg University. Applied mathematics. Computer science. Control processes. 2019. Vol. 15. No. 3. pp. 322-335. <https://doi.org/10.21638/11702/spbu10.2019.303>
7. Zhabko A.P., Shindyapin A.I., Provotorov V.V. Stability of weak solutions of parabolic systems with distributed parameters on the graph // Vestnik of Saint Petersburg University. Applied mathematics. Computer science. Control processes. 2019. Vol. 15. No. 4. P. 457-471. <https://doi.org/10.21638/11702/spbu10.2019.404>
8. Провоторов В.В. Математическое моделирование колебательных процессов поддерживающих растяжек упругой мачты // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2006. № 2. С. 28-35.
9. Провоторов В.В. Моделирование колебательных процессов системы "мачта-растяжки" // Системы управления и информационные технологии. 2008. № 1.2 (31). С. 272-277.
10. Провоторов В.В. К вопросу построения граничных управлений в задаче о гашении колебаний системы "мачта-растяжки" // Системы управления и информационные технологии. 2008. Т. 32. № 2. С. 293-297.
11. Провоторов В.В. Метод моментов в задаче гашения колебаний дифференциальной системы на графе // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 10: Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2010. № 2. С. 60-69.
12. Провоторов В.В. Построение граничных управлений в задаче о гашении колебаний системы из M струн // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2012. № 1. С. 60-69.
13. Provotorov V.V. Eigenfunctions of the Sturm-Liouville problem on a star graph // Mathematics. 2008. Vol. 199. № 10. p. 1523
14. Лионс Ж.-Л. Оптимальное управление системами, описываемыми уравнениями с частными производными / пер. с фр. Н.Х. Розова; под ред. Р.В. Гамкрелидзе. М.: Мир, 1972. 414 с.
15. Подвальный С.Л. Особенности поисковой градиентной оптимизации сложных объектов с использованием сопряженных систем // Системы управления и информационные технологии. 2014. Т. 56. № 2. С. 18-22
16. Podval'ny S.L., Ledeneva T.M. Intelligent Modeling Systems: Design Principles // Automation and Remote Control. 2013. Vol. 74. No. 7. P. 1201-1210.
17. Подвальный С.Л. Решение задачи градиентной оптимизации каскадно-реакторных схем с использованием сопряженных систем // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2013. Т. 9. № 2. С. 27-32

Информация об авторах

Подвальный Семён Леонидович - д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: spodvalny@yandex.ru, тел.: +7(473) 243-77-18.

Провоторов Вячеслав Васильевич - д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры уравнений в частных производных и теории вероятностей, Воронежский государственный университет (394018, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1), e-mail: wwprov@mail.ru, тел.: +7 (950) 758-15-14.

Хоанг Ван Нгуен – аспирант кафедры уравнений в частных производных и теории вероятностей, Воронежский государственный университет (394018, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1), e-mail: fadded9x@gmail.com, тел.: +7(952) 544-27-74.

Тран Зуй – аспирант кафедры уравнений в частных производных и теории вероятностей, Воронежский государственный университет (394018, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1), e-mail: tranduysp94@gmail.com, тел.: +7(952) 438-17-94.

POINT OPTIMIZATION OF THE LAMINAR FLOW OF A VISCOUS FLUID IN A NETWORK CARRIER

S.L. Podval'ny¹, V.V. Provotorov², V.N. Hoang², Z. Tran²

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²Voronezh State University, Voronezh, Russia

Abstract: the paper considers the problem of point optimization of a differential-difference system of equations, the formalisms of which represent the process of a laminar flow of a viscous fluid in a network carrier and a discretely changing time variable. In this case, the analysis of multiphase media is allowed. We present the conditions for unique weak solvability of the differential-difference system and the continuous dependence of the weak solution on the initial data. External influence on the mathematical model of the transfer process (differential-difference system) is carried out with the help of influences concentrated in all internal points of conjugation (branching) of the network carrier of a continuous medium. The observation of the state of the differential-difference system is carried out in the entire range of the spatial variable with a discretely changing time variable, the minimizing functional is given by a coercive quadratic form and a positive operator, which guarantees the uniqueness of the solution of the optimization problem. The study essentially uses the conjugate state and the conjugate system for the original differential-difference system of equations. Necessary and sufficient conditions for determining the optimum of the problem of point optimization of a differential-difference system of equations are obtained. We show the relationship between the differential-difference system of equations with a discretely changing time variable and the evolutionary differential system of equations with a continuously changing time variable

Key words: directed graph, differential-difference system, adjoint system, point optimization

References

1. Podval'ny S.L., Provotorov V.V. "Determination of the start function in the problem of observing a parabolic system with distributed parameters on a graph", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2014, vol. 10, no. 6, pp. 29-35.
2. Volkova A.S., Gnilitkaya Yu.A., Provotorov V.V. "On the solvability of boundary value problems for equations of parabolic and hyperbolic types on a geometric graph", *Control Systems and Information Technologies (Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii)*, 2013, no. 1 (51), pp. 11-15.
3. Podval'ny S.L., Provotorov V.V., Podval'ny E.S. "The controllability of parabolic systems with delay and distributed parameters on the graph", *Procedia Computer Science*, 2017, vol. 103, pp. 324-330.
4. Artemov M.A., Baranovskiy E.S., Zhabko A.P., Provotorov V.V. "On a 3D model of non-isothermal flows in a pipeline network", *Journal of Physics. Conference Series*, 2019, vol. 1203, article ID 012094. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1203/1/012094>.
5. Zhabko A.P., Provotorov V.V., Balaban O.R. "Stabilization of weak solutions of parabolic systems with distributed parameters on the graph", *Vestnik of Saint Petersburg University. Applied mathematics. Computer science. Control processes*, 2019, vol. 15, no. 2, pp. 187-198, <https://doi.org/10.21638/11702/spbu10.2019.203>
6. Zhabko A.P., Nurtazina K.B., Provotorov V.V. "About one approach to solving the inverse problem for parabolic equation", *Vestnik of Saint Petersburg University. Applied mathematics. Computer science. Control processes*, 2019, vol. 15, no. 3, pp. 322-335, <https://doi.org/10.21638/11702/spbu10.2019.303>.
7. Zhabko A.P., Shindyapin A.I., Provotorov V.V. "Stability of weak solutions of parabolic systems with distributed parameters on the graph", *Vestnik of Saint Petersburg University. Applied mathematics. Computer science. Control processes*, 2019, vol. 15, no. 4, pp. 457-471, <https://doi.org/10.21638/11702/spbu10.2019.404>
8. Provotorov V.V. "Mathematical modeling of oscillatory processes of supporting braces of an elastic mast", *Bulletin of Voronezh State University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta)*, 2006, no. 2, pp. 28-35.
9. Provotorov V.V. "Modeling of oscillatory processes of the "mast-stretch" system", *Control Systems and Information Technologies (Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii)*, 2008, no. 1.2 (31), pp. 272-277.
10. Provotorov V.V. "On the question of constructing boundary controls in the problem of damping oscillations of the "mast-

stretch" system", *Control Systems and Information Technologie (Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii)*, 2008, vol. 32, no. 2, pp. 293-297.

11. Provotorov V.V. "The method of moments in the problem of damping oscillations of a differential system on a graph", *Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes (Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Prikladnaya matematika. Informatika. Protsessy upravleniya)*, 2010, no. 2, pp. 60-69.

12. Provotorov V.V. "Construction of Boundary Controls in the Problem of Damping Oscillations of a System of M Strings", *Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes (Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Prikladnaya matematika. Informatika. Protsessy upravleniya)*, 2012, no. 1, pp. 60-69.

13. Provotorov V.V. "Eigenfunctions of the Sturm-Liouville problem on a star graph", *Mathematics*, 2008, vol. 199, no. 10, pp. 1523.

14. Lions J.L. "Optimal control of systems described by partial differential equations ("Contrôle optimal de systèmes gouvernés par des équations aux dérivées partielles"), transl. from fr. N.Kh. Rozova; ed. R. V. Gamkrelidze, Moscow: Mir, 1972, 414 p.

15. Podval'ny S.L. "Features of search gradient optimization of complex objects using conjugated systems", *Control systems and information technologies (Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii)*, 2014, vol. 56, no. 2, pp. 18-22.

16. Podval'ny S.L., Ledeneva T.M. "Intelligent modeling systems: design principles", *Automation and Remote Control*, 2013, vol. 74, no. 7, pp. 1201-1210.

17. Podval'ny S.L. "Solving the problem of gradient optimization of cascade-reactor circuits using conjugated systems", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2013, vol. 9, no. 2, pp. 27-32.

Submitted 02.06.2022; revised 17.10.2022

Information about the authors

Semen L. Podval'ny, Dr. Sci. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: spodvalny@yandex.ru, tel.: +7(473) 243-77-20.

Vyacheslav V. Provotorov, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Voronezh State University (1 Universitetskaya sq., Voronezh 394018, Russia), e-mail: wwprov@mail.ru, tel.: +7(950) 758-15-14.

Van N. Hoang, graduate student, Voronezh State University (1 Universitetskaya sq., Voronezh 394018, Russia), e-mail: fadded9x@gmail.com, tel.: +7(952) 544-27-74.

Zuy Tran, graduate student, Voronezh State University (1 Universitetskaya sq., Voronezh 394018, Russia), e-mail: tranduysp94@gmail.com, tel.: +7(952) 438-17-94.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОНФИГУРАЦИИ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ АППРОКСИМАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДИАГРАММ РАСТЯЖЕНИЯ

Л.В. Хливненко¹, В.В. Елисеев², А.М. Гольцев¹, Н.С. Переславцева¹

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²Инженерное бюро «МАТТЕСТ», г. Воронеж, Россия

Аннотация: излагается способ решения задачи аппроксимации экспериментальных диаграмм растяжения искусственными нейронными сетями с архитектурой многослойного персептрона. Компьютерное моделирование обучения и функционирования обученной нейронной сети в режиме прогнозирования выполнено в Knime Analytics Platform. Для обучения сети использован метод RProp. Качество аппроксимации оценивалось по значениям показателей MSE и R^2 . Количество скрытых слоев и количество нейронов в них оказывает влияние на качество моделирования в прямой пропорциональной зависимости. При увеличении этих показателей наблюдается рост размерности матрицы весовых коэффициентов связей между нейронами. В этой связи актуальным является вопрос об оптимальном выборе внутренней структуры сети. Было изучено влияние конфигурации нейронной сети на качество аппроксимации на примере диаграммы растяжения образца, изготовленного из горячекатаного стального проката со степенью прессования 37%. Наилучшие результаты получены для модели с 4 скрытыми слоями по 40 нейронов в каждом слое. Найденная конфигурация нейронной сети апробирована на том же материале из горячекатаного стального проката со степенями прессования 16% и 6%, на высокопрочной борированной стали, на сером чугуна и полипропиленовом композитном материале с длинным стекловолокном. Проведенные исследования показали, что нейронная сеть с найденной конфигурацией успешно может быть использована для аппроксимации диаграмм растяжения образцов, изготовленных из разных материалов.

Ключевые слова: диаграмма растяжения, аппроксимация, многослойный персептрон, конфигурация нейронной сети

Введение

Моделирование нагрузок на элементы конструкций при аварийных столкновениях является актуальной задачей в автомобильной промышленности. Компьютерные эксперименты дешевле натурных, поэтому выбор материалов для изготовления отдельных деталей с экономической точки зрения эффективнее осуществлять на этапе проектирования.

Например, в программном комплексе Abaqus выполняется реалистичное имитационное моделирование прогнозирования разрушения деталей в процессе динамического воздействия на конструкцию. Модуль Abaqus/Explicit предназначен для расчета нестационарной динамики, квазистатики, быстротекущих процессов, таких как, задачи падения (drop test), соударения (crash test), разрушения и моделирования технологических процессов (формовка, штамповка и т.п.).

База данных свойств материалов в таком пакете состоит из двух суббаз. Одна из них включает стандартные свойства материалов. Такие как плотность, модуль Юнга, коэффици-

ент Пуассона. Разработка второй суббазы предполагает постановку уникальных экспериментов с целью определения предельных деформационных свойств материалов в виде кривых деформирования, диаграмм критической и предельной устойчивой деформации, диаграмм разрушения. Для этого проводят разнообразные механические и технологические эксперименты в механических лабораториях, основным из которых является испытание на одноосное и равномерное двухосное растяжение [1].

Эксперимент на одноосное растяжение в лаборатории механических испытаний кафедры прикладной математики и механики Воронежского государственного технического университета проводят на универсальной испытательной машине Р-20 с гидроприводом. Растягивающее усилие P (Н) и осевое удлинение Δl (мм) фиксируют электронными аналоговыми датчиками.

Для целей моделирования интерес представляет аналитическое описание экспериментальных диаграмм деформирования. Аппроксимация позволяет строить обобщенные диаграммы растяжения для анизотропных материалов и экстраполировать результаты экспери-

ментов в зону развитых пластических деформаций.

Аппроксимировать кривую растяжения степенными или линейными функциями точно затруднительно [2], так как зависимость $P(\Delta l)$ обычно состоит из нескольких линейных и нелинейных участков. У пластиков, например, может отсутствовать линейный участок, наблюдаемый у других материалов в упругой области. Нелинейный участок может иметь разный вид. У пластичных сталей наблюдается, например, резкий скачкообразный переход (в форме зуба) из упругой области в пластическую в виде площадки текучести.

Искусственные нейронные сети с архитектурой многослойного персептрона используются для аппроксимации функций с графиками разнообразной формы [3, 4].

В этой связи актуальным является проведение исследований по оптимальному выбору параметров конфигурации нейронной сети для решения задачи аппроксимации экспериментальных диаграмм растяжения.

Моделирование эксперимента

Набор данных для моделирования представляет собой табулированную диаграмму растяжения $P(\Delta l)$, полученную при одноосном растяжении образца, вырезанного из горячекатаного стального проката с высоким пределом текучести для формоизменения в холодном состоянии. Диаграмма включает 1638 значений (X, Y) , полученных экспериментально. Аргументом (X) является осевое удлинение (Δl) , а результатом (Y) – растягивающее усилие (P) .

Моделирование искусственной нейронной сети с архитектурой многослойного персептрона проводилось в *open source* фреймворке для анализа данных – *Knime Analytics Platform*.

На вход сети подаются координаты вектора $X = \{x_j\}$, где $j = \overline{1, n}$. Целевым откликом сети являются соответствующие координаты вектора $Y = \{y_j\}$.

Среднеквадратическая ошибка сети MSE (*Mean squared error*) определяется формулой (1):

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_j - y_{predict\ j})^2, \quad (1)$$

где n – объем выборки.

Таким образом, рассматриваемая нейронная сеть для аппроксимации диаграмм дефор-

мирования имеет один выход $y_{predict}$ и два входа, один из которых x , а другой — это тождественный вход с сигналом +1.

Пусть нейронная сеть с архитектурой многослойного персептрона состоит из m слоев по k нейронов в каждом слое.

Нелинейное поведение нейронов задает сигмоидальная функция активации (2):

$$f(x) = \frac{1}{1+e^{-qx}}. \quad (2)$$

Сигнал i -го нейрона i -го слоя вычисляется по формуле (3):

$$y_j^i = f\left(\sum_{l=1}^k w_{jl}^i y_l^{i-1}\right), \quad (3)$$

где w_{jl}^i – весовой коэффициент связи между j -м нейроном i -го слоя и l -м нейроном $(i-1)$ -го слоя. Здесь $j = \overline{1, k}$, $i = \overline{2, m}$.

Выходной сигнал нейрона скрытого слоя представляет собой сжатую в диапазоне от 0 до 1 взвешенную сумму выходных сигналов нейронов предыдущего слоя.

Выходной сигнал нейронов 1-го слоя определяется формулой (4):

$$y_j^1 = f\left(\sum_{l=1}^2 w_l^1 x_l\right). \quad (4)$$

Общий выходной сигнал нейронной сети $y_{predict}$ находится по формуле (5):

$$y_{predict} = f\left(\sum_{l=1}^k w_l^{m+1} y_l^m\right). \quad (5)$$

Целью обучения является нахождение набора значений весовых коэффициентов связи между нейронами сети, минимизирующего MSE .

Для обучения сети использован метод RProp (*Resilient Propagation*), предложенный М. Ридмиллером (*M. Riedmiller*) и Г. Брауном (*H. Braun*) в 1993 г. [5].

В данном методе коррекция весов проводится после предъявления сети всех примеров из обучающей выборки и базируется на анализе знаков частных производных.

Если наблюдается изменение знака частных производных, то возможно упущен локальный минимум функции ошибки (1) и в этом случае величина коррекции уменьшается.

Перерасчет значений весовых коэффициентов в процессе обучения осуществляется по формуле (6):

$$w_{jl}^i(t+1) = w_{jl}^i(t) + \Delta w_{jl}^i(t), \quad (6)$$

где изменение Δw_{jl}^i весового коэффициента w_{jl}^i в момент времени t может быть как положительным, так и отрицательным. Эта ситуация связана со знаком частной производной и определяется формулой (7):

$$\Delta w_{jl}^i(t) = \begin{cases} -\Delta_{jl}^i(t), & \text{если } \frac{\partial MSE(t)}{\partial w_{jl}^i} > 0, \\ +\Delta_{jl}^i(t), & \text{если } \frac{\partial MSE(t)}{\partial w_{jl}^i} < 0, \\ 0, & \text{если } \frac{\partial MSE(t)}{\partial w_{jl}^i} = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Величина коррекции Δ_{jl}^i в момент времени t зависит от двух значений скорости обучения δ^+ , δ^- и рассчитывается по формуле (8):

$$\Delta_{jl}^i(t) = \begin{cases} \delta^+ \Delta_{jl}^i(t), & \frac{\partial MSE(t)}{\partial w_{jl}^i} \frac{\partial MSE(t-1)}{\partial w_{jl}^i} > 0, \\ \delta^- \Delta_{jl}^i(t), & \frac{\partial MSE(t)}{\partial w_{jl}^i} \frac{\partial MSE(t-1)}{\partial w_{jl}^i} < 0, \end{cases} \quad (8)$$

где $0 < \delta^- < 1 < \delta^+$.

Если на текущем шаге обучения частная производная поменяла знак, то последнее изменение весового коэффициента отменяют, используя формулу (9):

$$\Delta w_{jl}^i(t) = \Delta w_{jl}^i(t) - \Delta_{jl}^i(t-1). \quad (9)$$

Если же на текущем шаге частная производная не изменилась, то увеличивают изменение для более быстрой сходимости по сравнению со стандартным алгоритмом обратного распространения ошибки Backprop.

Затем вновь производят перерасчет коррекций по формулам (6) - (8).

Для сравнения результатов аппроксимации наряду с MSE будем использовать значение коэффициента детерминации, рассчитываемого по формуле (10):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^n (y_j - y_{predict j})^2}{\sum_{j=1}^n (y_j - \bar{y})^2}, \quad (10)$$

где $\bar{y}$ – выборочное среднее.

Чем ближе значение R^2 к единице, тем выше предсказательная сила модели. R^2 показывает долю объясненной моделью дисперсии в общей дисперсии случайной величины.

Далее в табл. 1-5 значения показателей MSE и R^2 будут приведены с округлением до тысячных.

Изучение влияния конфигурации сети на качество аппроксимации

Была проведена серия экспериментов для выбора параметров конфигурации многослойного персептрона, а именно количества скрытых слоев (m) и количества нейронов в каждом слое (k). Условно модель нейронной сети, в которой m скрытых слоев по k нейронов в каждом слое будем обозначать «Нейросеть $m-k$ ».

Целью исследования является выбор значений параметров $m-k$, дающих наилучшее приближение экспериментальных кривых модельными.

На рис. 1-3 показаны результаты аппроксимации экспериментальной диаграммы растяжения образца из стального проката со степенью прессования 37%, детально описанной в предыдущем пункте данной статьи.

Графики приближений диаграммы растяжения нейросетями с одним и двумя скрытыми слоями показаны на рис. 1. Видно, что нейросети 1-10 и 1-40 хорошо аппроксимируют упругий участок и вырождаются в прямую линию на участке пластического течения.

Нейросети с двумя скрытыми слоями ближе расположены к эмпирической диаграмме (на рис. 1 – кривой деформирования).

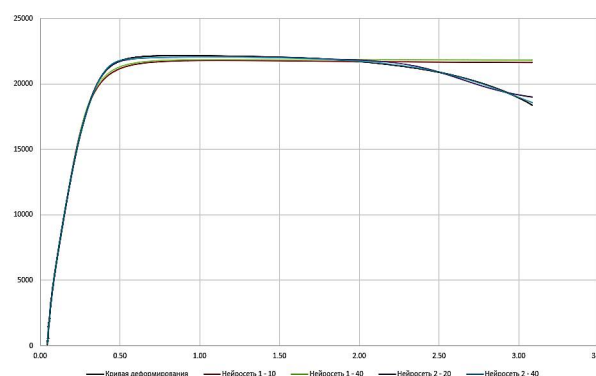


Рис. 1. Диаграмма растяжения образца из стального проката и ее аппроксимации нейросетями с 1 скрытым слоем из 10 нейронов (1-10) и из 40 нейронов (1-40), с 2 скрытыми слоями по 20 нейронов (2-20) и по 40 нейронов (2-40)

Нейросети 2-20 и 2-40 хорошо приближают оба участка диаграммы деформирования. Расхождения наблюдаются в самом конце нелинейного участка. При этом сеть 2-40 с зада-

чей аппроксимации справляется лучше. Значит, количество скрытых слоев имеет значение.

Значения показателей MSE и R^2 для апробированных нейронных сетей с одним и двумя скрытыми слоями приведены в табл. 1.

Таблица 1
Значения показателей качества моделирования для нейросетевых аппроксимаций, представленных на рис. 1

Конфигурация сети	R^2	MSE
1 слой из 10 нейронов (1 - 10)	0.998	334.660
1 слой из 40 нейронов (1 - 40)	0.998	338.488
2 слоя по 20 нейронов (2 - 20)	1	119.959
2 слоя по 40 нейронов (2 - 40)	1	103.035

Количество скрытых слоев и количество нейронов в них оказывает влияние на качество моделирования в прямой пропорциональной зависимости. Однако при увеличении значений $m - k$ увеличивается матрица весовых коэффициентов и как следствие растет время обучения сети и размерность пространства решений.

В этой связи актуальным является вопрос о «золотой середине», т.е. выборе таких значений $m - k$, чтобы обеспечить точность моделирования, сохранив общность модели для других наборов экспериментальных данных и устранив избыточность описания.

Проведем следующую серию экспериментов с нейронными сетями из 3, 4, 5 и 7 скрытых слоев.

Графики приближений той же диаграммы растяжения образца из стального проката нейросетями с тремя скрытыми слоями показаны на рис. 2. Видно, что нейросеть 3-10 ведет себя также как однослойные сети 1-10 и 1-40 на рис. 1. Значит, количество нейронов в скрытом слое имеет значение.

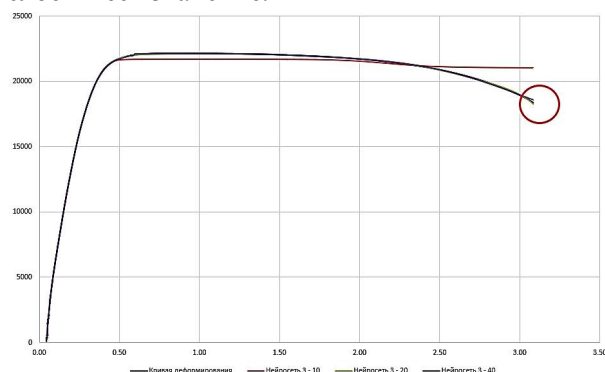


Рис. 2. Диаграмма растяжения образца из стального проката и ее аппроксимации нейросетями с 3 скрытыми слоями по 10 нейронов (3-10), по 20 нейронов (3-20) и по 40 нейронов (3-40)

Нейронные сети 3-20 и 3-40 хорошо улавливают особенности экспериментальной диаграммы, допуская небольшое расхождение в конце нелинейного участка. Эта зона выделена на рис. 2 окружностью.

Заметим, что величина $m*k$ для всех сетей с удовлетворительной аппроксимацией ≥ 60 .

Значения показателей MSE и R^2 для исследованных нейронных сетей с тремя скрытыми слоями приведены в табл. 2.

Таблица 2
Значения показателей качества моделирования для нейросетевых аппроксимаций, представленных на рис. 2

Конфигурация сети	R^2	MSE
3 слоя по 10 нейронов (3 - 10)	0.999	246.542
3 слоя по 20 нейронов (3 - 20)	1	102.412
3 слоя по 40 нейронов (3 - 40)	1	98.756

На рис. 3 показаны аппроксимации той же экспериментальной кривой нейросетями с четырьмя, пятью и семью скрытыми слоями со значением произведения $m*k \geq 120$. Видно, что графики всех приближений полностью совпадают с эмпирической кривой.

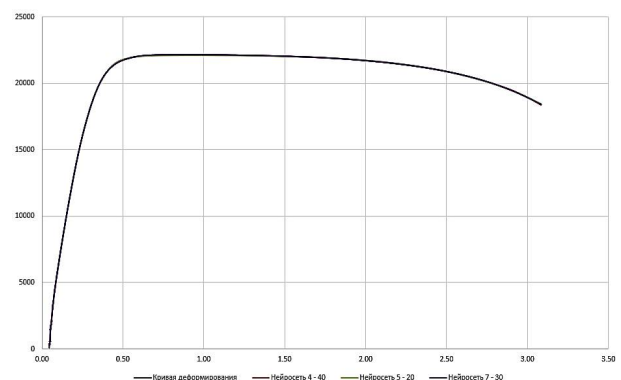


Рис. 3. Диаграмма растяжения образца из стального проката и ее аппроксимации нейросетями с 4 скрытыми слоями по 40 нейронов (4-40), с 5 скрытыми слоями по 20 нейронов (5-20) и с 7 скрытыми слоями по 30 нейронов (7-30)

Значения показателей MSE и R^2 для апробированных нейронных сетей с четырьмя, пятью и семью скрытыми слоями приведены в табл. 3.

Таблица 3

Значения показателей качества моделирования для нейросетевых аппроксимаций, представленных на рис. 3

Конфигурация сети	R^2	MSE
4 слоя по 30 нейронов (4 - 30)	1	99.395
4 слоя по 40 нейронов (4 - 40)	1	96.983
5 слоев по 20 нейронов (5 - 20)	1	100.241
7 слоев по 30 нейронов (7 - 30)	1	97.204

В табл. 3 выделено наименьшее полученное значение MSE для нейросетевой модели 4-40. Заметим, что в случае использования сетей с пятью и семью скрытыми слоями выигрыша в качестве аппроксимации не наблюдается, а значение показателя MSE ухудшается. Возможно, данный факт объясняется переобучением сети и ростом размерности пространства решений, в котором функционирует алгоритм обучения.

В *Knime Analytics Platform* процесс обучения для каждого из исследованных вариантов конфигурации многослойного персептрона занимал менее одной минуты.

Проверка наилучшей конфигурации сети на других экспериментальных данных

Выполним серию экспериментов по проверке валидности модели многослойного персептрона с найденной наилучшей конфигурацией 4-40 для аппроксимации кривых растяжения образцов, изготовленных из других материалов.

На рис. 4 показаны диаграммы деформирования и их нейросетевые аппроксимации, полученные при растяжении образцов из того же горячекатаного стального проката, что и образец, кривая растяжения которого рассмотрена на рис. 1-3.

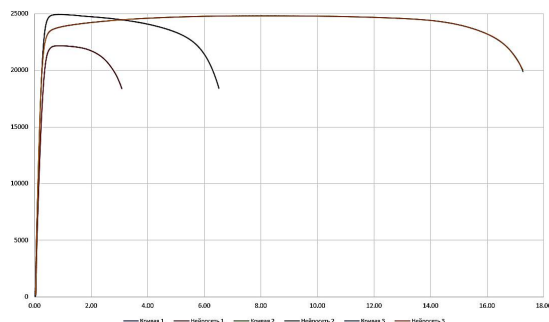


Рис. 4. Диаграммы растяжения образцов из одного горячекатаного стального проката разной степени прессования – 37% (кривая 1), 16% (кривая 2), 6% (кривая 3) и их аппроксимации нейросетями с 4 скрытыми слоями по 40 нейронов

Видно, что все три экспериментальные кривые точно совпадают с графиками аппроксимирующих функций. Отметим, что эксперимент проводился для одного материала разной степени прессования (37%, 16% и 6%).

Значения показателей MSE и R^2 для построенных нейросетевых моделей в случае, описанных выше диаграмм деформирования, приведены в табл. 4.

Таблица 4

Значения показателей качества моделирования для нейросетевых аппроксимаций, представленных на рис. 4

Степень прессования стали	R^2	MSE
37% (кривая 1)	1	96.983
16% (кривая 2)	1	46.072
6% (кривая 3)	1	38.480

Построим нейросетевую аппроксимацию для диаграммы растяжения образца из другого материала – высокопрочной борированной стали. Диаграмма растяжения в этом случае имеет площадку текучести, выделенную на рис. 5 окружностью.

Используем в модели нейросеть с 4 скрытыми слоями по 40 нейронов (4-40). На рис. 5 видно, что график нейросетевой аппроксимации совпадает с экспериментальной кривой, повторяя в том числе форму «зуба текучести».

Проверим, сможет ли нейросеть с найденной наилучшей конфигурацией качественно аппроксимировать диаграммы растяжения образцов, изготовленных из чугуна и пластика.

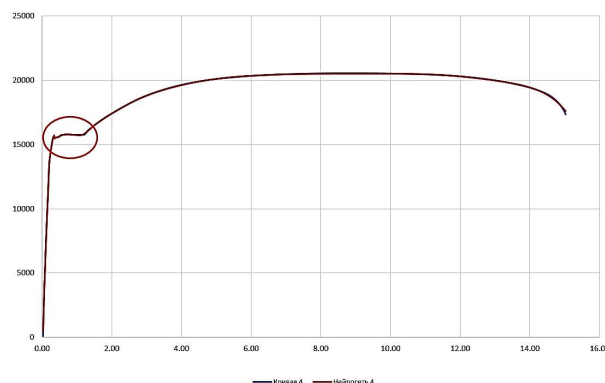


Рис. 5. Диаграмма растяжения образца из высокопрочной борированной стали с площадкой текучести и ее аппроксимация нейросетью с 4 скрытыми слоями по 40 нейронов

На рис. 6 показана диаграмма растяжения образца из серого чугуна и ее нейросетевая аппроксимация. Ступенчатый вид условного линейного участка экспериментальной кривой

обусловлен неравномерностью процесса деформирования. Обратим внимание на то, что в модельной кривой происходит сглаживание ступенек. При этом аппроксимация совпадает с априорной кривой несмотря на то, что форма кривых растяжения для чугуна и стали отличается.

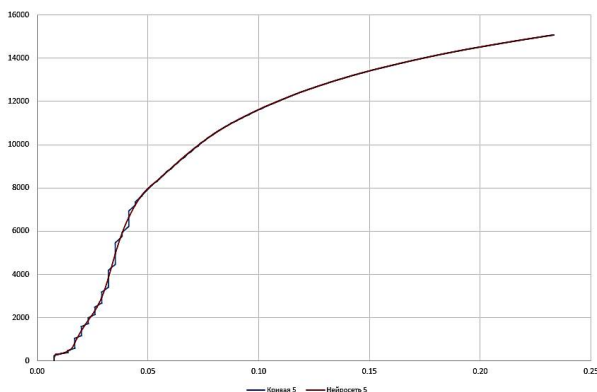


Рис. 6. Диаграмма растяжения образца из серого чугуна и ее аппроксимация нейросетью с 4 скрытыми слоями по 40 нейронов

В заключении проверим качество нейросетевого моделирования на диаграмме растяжения образца, вырезанного из полипропиленового композитного материала, упрочненного длинным стекловолокном. Экспериментальная диаграмма и ее аппроксимация показаны на рис. 7.

Отличительной особенностью экспериментальной диаграммы в этом случае является нелинейность по всему спектру деформирования.

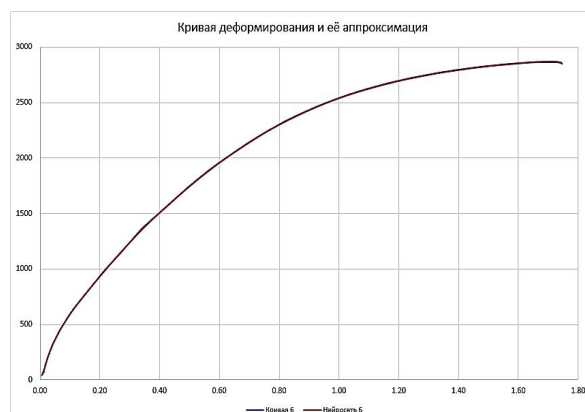


Рис. 7. Диаграмма растяжения образца из полипропиленового композитного материала с длинным стекловолокном и ее аппроксимация нейросетью с 4 скрытыми слоями по 40 нейронов

Видно, что модельная кривая на рис. 7 совпадает с экспериментальной диаграммой, показывая при этом наименьшую ошибку MSE

среди всех рассмотренных в данном исследовании примеров.

В табл. 5 приведены значения показателей MSE и R^2 нейросетевых аппроксимаций, выполненных для диаграмм растяжения образцов из высокопрочной стали, серого чугуна и композитного материала.

Таблица 5

Значения показателей качества моделирования для нейросетевых аппроксимаций, представленных на рис. 5-7

Материал	R^2	MSE
Сталь (кривая 4)	1	67.881
Чугун (кривая 5)	0.999	134.559
Пластик (кривая 6)	1	2.434

Проведенные исследования показали, что нейросеть 4-40 успешно может быть применена для аппроксимации диаграмм растяжения образцов, изготовленных из разных материалов.

Результаты исследования

1. Решена задача аппроксимации экспериментальных диаграмм растяжения искусственными нейронными сетями с архитектурой многослойного персептрона.

2. Проведено компьютерное моделирование обучения и функционирования обученной нейронной сети в режиме прогнозирования в *Knime Analytics Platform*.

3. Изучено влияние конфигурации нейронной сети на качество аппроксимации на примере диаграммы растяжения образца из горячекатаной стали со степенью прессования 37%. Наилучшие значения показателей MSE и R^2 получены для модели с 4 скрытыми слоями по 40 нейронов в каждом слое.

4. Найденная конфигурация нейронной сети апробирована на других экспериментальных данных. А именно, на той же горячекатаной стали со степенями прессования 16% и 6%, на высокопрочной борированной стали, на сером чугуне и полипропиленовом композитном материале, армированного длинным стекловолокном. Во всех перечисленных случаях многослойный персептрон с 4 скрытыми слоями по 40 нейронов в каждом слое качественно аппроксимировал экспериментальную диаграмму растяжения.

Литература

1. Базы данных материалов для САПР в машиностроении: учеб. пособие / В.В. Елисеев, Л.В. Хливненко, А.М. Гольцев, Ю.Б. Рукин, Н.С. Переславцева. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2018. 95 с.

2. Хливненко Л.В., Елисеев В.В., Гольцев А.М. Построение регрессионных моделей для аппроксимации кривых растяжения образцов из стали // Механика и математическое моделирование в технических системах: материалы 62-й науч.-техн. конф. ППС, сотрудников, аспирантов и студентов ФГБОУ ВО ВГТУ. Воронеж: ВГПУ, 2022. С.18-22.

3. Hanief M., Wani M.F. Artificial neural network and regression-based models for prediction of surface roughness during turning of red brass (C23000) // Journal of Mechanical Engineering and Sciences (JMES). 2016. V. 10. Issue 1. P. 1835-1845. DOI: 10.15282/jmes.10.1.2016.8.0176.

4. Prognostics of damage growth in composite materials using machine learning techniques/H. Liu, S. Liu, Z. Liu et al. // IEEE International Conference on Industrial Technology. 2017. P. 1042-1047. DOI: 10.1109/ICIT.2017.7915505.

5. Тюрин Ю.Н., Макаров А.А. Анализ данных на компьютере: учеб. пособие. М.: МЦНМО, 2016. 368 с.

Поступила 01.08.2022; принята к публикации 17.10.2022

Информация об авторах

Хливненко Любовь Владимировна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры прикладной математики и механики, Воронежский государственный технический университет (394006 г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: hlvnenko_lv@mail.ru, тел. 8950-754-83-31

Елисеев Владимир Васильевич – канд. техн. наук, доцент, Инженерное бюро «МАТТЕСТ» (г. Воронеж, ул. Генерала Перхоровича, 6-53), e-mail: evv52@bk.ru, тел. 8919-185-83-81

Гольцев Александр Михайлович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры автоматизированного оборудования машиностроительного производства, Воронежский государственный технический университет (394006 г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: amg57@bk.ru, тел. 8920-228-57-05

Переславцева Наталья Сергеевна – канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры прикладной математики и механики, Воронежский государственный технический университет (394006 г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: nsper@yandex.ru, тел. 8908-148-76-04

DETERMINATION OF NEURAL NETWORK CONFIGURATION PARAMETERS FOR APPROXIMATION OF EXPERIMENTAL TENSILE CURVES

L.V. Khlivnenko¹, V.V. Eliseev², A.M. Gol'tsev¹, N.S. Pereslavl'tseva¹

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²Engineering Bureau «MATTEST», Voronezh, Russia

Abstract: we described a method for solving the problem of approximating experimental tensile curves by artificial neural networks with architecture of multilayer perceptron. Computer modeling of the neural network was performed in Knime Analytics Platform. The RProp method was used to train the network. The quality of the approximation was assessed by the values of the MSE и R^2 indicators. The number of hidden layers and the number of neurons in them affects the quality of modeling in a direct proportional relationship. With an increase in these indicators, an increase in the dimension of the matrix of weight coefficients of connections between neurons is observed. In this regard, the question of the optimal choice of the internal structure of the network is relevant. The influence of the neural network configuration on the quality of the approximation was studied using tensile curve of specimen was made of hot-rolled steel with a pressing degree of 37%. The best results were obtained for the model with 4 hidden layers with 40 neurons in each layer. The found configuration of the neural network was tested on the same material from hot-rolled steel with pressing degrees of 16% and 6%, on high-strength boron steel, on gray cast iron, and on a polypropylene composite material with long glass fiber. The conducted studies have shown that a neural network with the found configuration can be successfully used to approximate the tensile curves of specimens made from different materials

Key words: tensile curve, approximation, multilayer perceptron, neural network configuration

References

1. Eliseev V.V., Khlivnenko L.V., Goltsev A.M., Rukin Yu.B., Pereslavl'tseva N.S. "Material databases for CAD in mechanical engineering" ("Bazy dannykh materialov dlya SAPR v mashinostroenii"), Voronezh State Technical University, 2018, 95 p.

2. Khlivnenko L.V., Eliseev V.V., Goltsev A.M. "Construction of regression models for approximating the tension curves of steel specimens", *Proc. of the 62nd Scientific and Technical. Conf. of Teaching Staff, Graduate Students of Voronezh State Technical University: Mechanics and Mathematical Modeling in Technical Systems (Mekhanika i matematicheskoe modelirovanie v tekhnicheskikh sistemakh)*, Voronezh State Pedagogical University, 2022, pp.18-22.

3. Hanief M., Wani M.F. “Artificial neural network and regression-based models for prediction of surface roughness during turning of red brass (C23000)”, *Journal of Mechanical Engineering and Sciences (JMES)*, 2016, vol. 10, issue 1, pp. 1835-1845. DOI: 10.15282/jmes.10.1.2016.8.0176.
4. Liu H., Liu S., Liu Z. et al. “Prognostics of damage growth in composite materials using machine learning techniques”, *IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2017, pp. 1042-1047. DOI: 10.1109/ICIT.2017.7915505.
5. Tyurin Yu.N., Makarov A.A. “Data analysis on computer” (“Analiz dannykh na komp'yutere”), Moscow: MTSNMO, 2016, 368 p.

Submitted 01.08.2022; revised 17.10.2022

Information about the authors

Lyubov' V. Khlivnenko, Cand. Sci. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: hlivnenko_lv@mail.ru

Vladimir V. Eliseev, Cand. Sci. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: evv52@bk.ru

Aleksandr M. Gol'tsev, Cand. Sci. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: amg57@bk.ru

Nataliya S. Pereslavytseva, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: nsper@yandex.ru

ГИСТЕРЕЗИСНАЯ МОДЕЛЬ ВЛАГООБМЕНА В ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

В.И. Ряжских¹, Ж.Б. Холмуродов², В.С. Ножкин², О.И. Канищева³

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия

³Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: динамика влагосодержания в подстилающей поверхности и атмосфере играет ключевую роль в моделях атмосферных процессов и явлений. В частности, процессы генезиса внутримассовой облачности, туманов испарения, дымок и др. напрямую связаны с влагосодержанием почвы и атмосферной влажностью. Кроме того, с учетом существенного вклада влагосодержания на энергетику атмосферы указанный параметр является ключевым фактором в формировании мезо- и микромасштабных движений воздушных масс. Наконец, атмосферное и связанное с ним влагосодержание почвы вместе с барическим и температурным полем фактически определяют наличие (отсутствие) таких опасных природных явлений, как ливни, грозы, обледенение и др. В этой связи совершенствование моделей динамики влагосодержания подстилающей поверхности представляется важной и интересной задачей. Предлагается новая модель, описывающая динамику влагосодержания в почве, основанная на гистерезисной связи между удельным содержанием влаги в почве и матричным потенциалом. Указанная модель формализуется посредством системы дифференциальных и алгебраических уравнений. При этом в качестве модели гистерезисных связей используется преобразователь Прейсаха – модель континуальной системы неидеальных реле, соединенных параллельно. Полученные результаты в рамках вычислительного эксперимента – динамика влагосодержания в течение конечного временного промежутка – сравниваются с реальными данными на примере территорий, расположенных в южной части России и Узбекистана

Ключевые слова: влагосодержание в почве, гистерезис, дифференциальные уравнения, преобразователь Прейсаха

Введение

Изменение влагосодержания в подстилающей поверхности и атмосфере играет важную роль в атмосферных процессах и явлениях. В частности, процессы генезиса внутримассовой облачности, туманов испарения, дымок и др. напрямую связаны с влагосодержанием почвы и атмосферной влажностью. Влагосодержание почвы – важный климатический параметр, влияющий на основные метеорологические величины. Кроме того, учет в прогнозных моделях влагосодержания почвы чрезвычайно важен при принятии решений об использовании сельскохозяйственных угодий. Существует несколько определений водного режима (ВР). В настоящей статье под таковым понимается совокупность явлений и процессов влагообмена в системе атмосфера – почва: перераспределение влаги, динамика ее содержания в капиллярах и др. [1-3]. Динамика влагосодержания почвы определяется ее расходом в течении некоторого промежутка времени. Известно, что водный режим оказывает определяющее влияние на генезис почвы и, в

свою очередь, обуславливается своей предисторией. Кроме того, водный режим определяется почвенными водно-физическими свойствами и биоклиматическими, литолого-геоморфологическими факторами.

В начале XX века Г.Н. Высоцким были определены основы классификации ВР почв, позднее в середине века развиты А.А. Роде [1-3]. Согласно его трактовкам, основные типы ВР идентифицируются посредством связи между испарением влаги из почвы и ее проникновением в глубь почвы [2-7]. Указанная трактовка позволила выделить такие типы, как промывной и периодически промывной ВР. Непромывной ВР выделяется тем, что в многолетнем цикле испарения влаги в атмосферу меньше величины инфильтрации. Следует отметить также, что испарение влаги приближенно равно величине ее проникновения вглубь [5-7]. Кроме того, особо выделяют ирригационный и мерзлотный типы ВР. Указанное свойство обусловлено тем, что соотношение между трансфером влаги в атмосферу и ее проникновением в глубь почвы может изменяться в достаточно широких пределах. Что касается мерзлотного режима, то его свойства напрямую определяются наличием водоупорного слоя вечной мерзлоты, в то время как у ирригационного режима – внешнее регу-

лирование (в основном это связано с организацией дренажной сети, частоты и интенсивности поливов). Вместе с тем существуют подтипы ВР, в которых, в свою очередь, определяющими являются источники поступления влаги в почву, также принимаются во внимание среднегодовые показатели влажности почвы [7-10].

Основным источником влаги для почв являются атмосферные осадки. Кроме того, на ВР в значительной степени влияет внутрипочвенная конденсация влаги, происходящая как во внутренних объемах, так и на поверхности почвенного слоя. Систему таких источников принято считать атмосферным увлажнением почвы. При этом увлажнение почвы происходит неравномерно, во многом это связано с перераспределением атмосферных осадков на ее поверхности. Кроме того, в большинстве случаев увлажнение почвы имеет нерегулярный характер, но есть и исключения, так, например, почвы низин, опушечных участков местности, частей склонов. Кроме атмосферных осадков, такие почвы питают местные (автохтонные) грунтовые воды. Среди иных источников влаги почв следует рассмотреть: грунтовые воды, характеризующиеся значительным ареалом, далеко уходящим за пределы рассматриваемых территорий, а также влагу, поступающую в процессе приливов и отливов морских и речных вод. На территории Российской Федерации зачастую встречаются почвы атмосферного увлажнения. При этом в северных широтах, а также Западной части Сибири и в низменностях Приморского края преобладают болотные почвы. Кроме того, в Западной Сибири, южной ее части присутствуют черноземно-луговые, луговые и лугово-болотные почвы с притекающим со стороны (аллохтонным) грунтовым увлажнением. Такие же почвы, но уже в меньшей степени, можно наблюдать на в европейской части России и на Дальнем Востоке. Аллювиальные и маршевые грунты выделяют в отдельную группу, это связано с дополнительным увлажнением за счет речных или приливно-морских вод. В [1] приведено понятие режим влажности почвы, который является динамическим показателем и под которым понимают функцию динамики влаги со временем. Явления, связанные с количественным и качественным содержанием влаги, вызывают движения между горизонтами. Кроме того, важную роль играют такие процессы, как испарение и конденсация, а также таяние и замерзание. Именно с их помощью определяется концентрация вещества в почве, а также его перенос в пределах

почвенного ареала.

Законы фильтрации жидкости. Закон Дарси

Движение жидкости в породах определяется многими факторами, среди которых важную роль играет размер пор в этих породах. В таблице представлены размеры и наименование пор.

Размеры и наименование пор

№	Наименование пор	Размер пор, мкм
1	Сверхкапиллярные	>508
2	Капиллярные	от 0,2 до 508
3	Субкапиллярные	<0,2

Движение жидкости в порах описывается известными законами гидравлики, особенно хорошо они работают в сверхкапиллярных порах. Силы молекулярного сцепления, возникающие в капиллярных порах, вызывают затруднение продвижения жидкости. При этом в субкапиллярных и вовсе данное движение исключено [8-10]. В связи с этим в подземной гидромеханике принято разделять горные породы на плотные и проницаемые.

Традиционно, формализованные законы фильтрации устанавливают соотношение между градиентом поля давления, которое, в свою очередь, определяет фильтрацию, и вектором скорости движения жидкости. Одним из наиболее известных законов является Закон Дарси (по имени автора – Анри Дарси), этот закон формализует фильтрацию жидкостей и газов в пористой среде. Дарси открыл его экспериментальным путем, однако этот закон является следствием осредненных уравнений Навье – Стокса, описывающих движение жидкости в пористой среде. В этой связи отметим работы [5] и [14], где закон Дарси устанавливается для пористых сред с периодической и случайной микроструктурой. Существенно, что этот же закон имеет место в ситуации фильтрации жидкостей, описываемых законом вязкого трения Ньютона. Применение закона Дарси в задачах фильтрации в неньютоновских жидкостях связано с некоторыми ограничениями, обусловленными нелинейной (в общем случае) связью между градиентом давления и скоростью фильтрации. В этом случае применение закона Дарси (в классическом виде) корректно лишь при малых скоростях (т.е. когда уравнение Навье-Стокса допускает линеаризацию), в противном случае при больших скоростях зависимость становится нелинейной [1].

В настоящей работе предлагается новая

модель динамики влагосодержания в почвенных средах, основанная на гистерезисных свойствах процесса влагообмена. Для описания указанной модели нам понадобится привести основные свойства используемых в дальнейшем гистерезисных преобразователей.

Входно-выходные соответствия гистерезисного преобразователя

В работе рассматривается двухпозиционное реле с границами α и β , при условии, что $(\alpha < \beta)$.

Пространством состояний неидеального реле является пара чисел $(0, 1)$. Связь между входом $u(t) \in C[0, T]$ и переменным выходом $x(t) \in \{0, 1\}$ устанавливается оператором $R[\alpha, \beta, x_0]$ [10]

$$x(t) = R[\alpha, \beta, x_0]u(t), \quad (1)$$

где x_0 – начальное состояние преобразователя.

Само начальное состояние x_0 должно удовлетворять следующим условиям:

- если $u(0) \leq \alpha$, то $x_0 = 0$; если $u(0) \geq \beta$, то $x_0 = 1$;
- если $\alpha < u(0) < \beta$, то $x_0 = 0$ или $x_0 = 1$.

При этом выход преобразователя $x(t)$ ($0 \leq t \leq T$) определяется из выражения (2):

$$\left\{ \begin{array}{l} 0, \text{ если } u(t) \leq \alpha, \\ 1, \text{ если } u(t) \geq \beta, \\ x_0, \text{ если } u(\tau) \in (\alpha, \beta) \text{ при всех } \tau \in [0, t], \\ x(t) = 0, \text{ если } u(t) \in (\alpha, \beta) \text{ и найдется такое} \\ t_1 \in [0, t], \text{ что } u(t_1) = \alpha \text{ и } u(\tau) \in (\alpha, \beta) \text{ при всех } \tau \in (t_1, t], \\ 1, \text{ если } u(t) \in (\alpha, \beta) \text{ и найдется такое } t_1 \in [0, t], \\ \text{что } u(t_1) = \beta \text{ и } u(\tau) \in (\alpha, \beta) \text{ при всех } \tau \in (t_1, t] \end{array} \right. \quad (2)$$

Динамику входно-выходных соответствий неидеального реле демонстрирует следующий рис. 1.

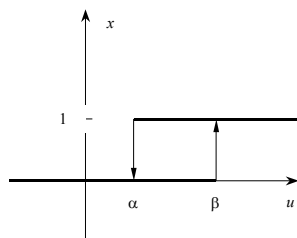


Рис. 1. Характеристика неидеального реле

Таким образом, можно сделать заключение, что преобразователь определен на пространстве непрерывных функций, он также является детерминированным и статическим. Де-

тальное описание этого преобразователя, а также его свойств приведено, например, в [15].

Континуальная система неидеальных реле, соединенных параллельно (преобразователь Прейсаха)

Для описания реальных гистерезисных явлений обычно используется континуальный аналог преобразователя, состоящего из реле, соединенных параллельно. Впервые этот преобразователь был введен Прейсахом [10, 12] для описания ферромагнитного гистерезиса. На основе дальнейших исследований было выявлено, что данная модель может использоваться для формализации гистерезисных звеньев и может быть внедрена в модели высокого уровня.

С этой целью рассмотрим один из частных классов гистерезисных преобразователей Прейсаха. Положим, что на полуплоскости вида $P_{\alpha, \beta} \equiv \{\alpha, \beta : \alpha < \beta\}$ определена функция $\lambda = \lambda(\alpha, \beta)$. Данная функция является абсолютно непрерывной, неотрицательной и суммируемой на всей полуплоскости. Тогда на данной полуплоскости $P_{\alpha, \beta}$ имеет места мера $\mu_{\alpha, \beta}$, которая определяется из следующего уравнения:

$$d\mu_{\alpha, \beta} = \lambda(\alpha, \beta) d\alpha d\beta. \quad (3)$$

При этом измеримость по мере $\mu_{\alpha, \beta}$ влечет за собой измеримость функции по Лебегу. Таким образом, из самого определения следует, что мера $\mu_{\alpha, \beta}$ является абсолютно непрерывной относительно двумерной Лебеговой меры при выполнении следующего условия

$$\int_0^\infty \sigma(v) dv < \infty, \quad (4)$$

где $\sigma(v)$ определяется из соотношения

$$\sigma(v) = \max_{\alpha, \beta, v = (\alpha^2 + \beta^2)^{1/2}} \lambda(\alpha, \beta). \quad (5)$$

Далее предполагается, что условия (4), (5) являются выполненными.

Следует отметить, что ψ – класс ограниченных функций, заданных на неотрицательной полуоси и удовлетворяющих условию Липшица с коэффициентом равным единице. Установим в рассмотрение множество Ω_ψ скалярных функций $\omega(\alpha, \beta)$, заданных на полуплоскости

$P_{\alpha,\beta} \equiv \{\alpha, \beta : \alpha < \beta\}$, и таких, что

$$\omega(\alpha, \beta) = \begin{cases} 0, & \text{если } \alpha + \beta > \psi(\beta - \alpha), \\ 1, & \text{если } \alpha + \beta \leq \psi(\beta - \alpha), \end{cases} \quad (6)$$

где $\psi(v) \in \Psi$. Множество Ω_Ψ – пространство состояний преобразователя Прейсаха. На рис. 2 представлен элемент данного множества.

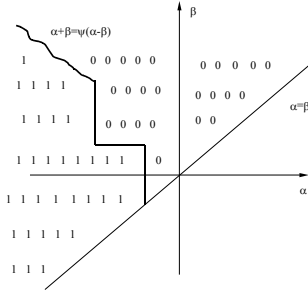


Рис. 2. Элемент множества Ω_Ψ

Множество Ω_Ψ можно снабдить метрикой ρ , определяемой следующим соотношением

$$\rho(\omega_2(\alpha, \beta), \omega_1(\alpha, \beta)) = \|\psi_1(v) - \psi_2(v)\|_{C[0, \infty)}, \quad (7)$$

где $\omega_1(\alpha, \beta), \omega_2(\alpha, \beta), \psi_1(v), \psi_2(v)$ – функции, связь между которыми определяется соотношением (6).

Здесь и далее норма в пространстве $C[0, \infty)$ непрерывных на положительной полуоси функций определяется соотношением $\|\psi(v)\|_{C[0, \infty)} = \sup_{0 < v < \infty} |\psi(v)|$.

Определим произвольный элемент $\omega_0(\alpha, \beta) \in \Omega_\Psi$, который будем ассоциировать с начальным состоянием преобразователя Прейсаха. Все непрерывные на положительной полуоси функции $u(t) (t \geq 0)$, для которых верно следующее равенство:

$$u(0) = \psi_0(0), \text{ где } \omega_0(\alpha, \beta) \text{ и } \psi_0(v),$$

связаны соотношением (6) и являются классом допустимых входов для преобразователя Прейсаха в начальном его состоянии.

При этом вход преобразователя Прейсаха устанавливается оператором Γ [6].

$$\omega(\alpha, \beta, t) = \Gamma[\omega_0]u(t) = R[\omega_0(\alpha, \beta), \alpha(\gamma), \beta(\gamma)]u(t), \quad (8)$$

где γ – параметр, с помощью которого определяются точки полуплоскости $P_{\alpha,\beta}$.

Наряду с этим выход преобразователя (Γ, ξ) определяется из выражения (9):

$$\begin{aligned} \xi(t) &= \int_{\alpha < \beta} \omega(\alpha, \beta, t) d\mu_{\alpha, \beta} = \\ &= \mu_{\alpha, \beta}(\{\alpha, \beta\} : R[\omega_0(\alpha, \beta), \alpha, \beta]u(t) = 1) \end{aligned} \quad (9)$$

Представленная выше гистерезисная модель лежит в основе гидрологической модели, описывающей проникновение и испарение влаги в почве.

Гистерезисная гидрологическая модель

Моделирование гидрологических процессов требует учета таких показателей почвы, как удельное содержание воды и ее способность впитывать воду (матричный потенциал). При этом в частично насыщенной почве между ними существует нелинейная зависимость. Первым, доказавшим гистерезисную природу данной зависимости, был Хайнс в 1930-х гг. [7], к сожалению, ее учет при моделировании динамики гидрологических процессов не проводился. Такая зависимость дает возможность по-иному взглянуть на динамические модели в гидрологии.

Ниже приведена модель, проникновение влаги в почву, учитывающая гистерезисную зависимость. При этом данные об интенсивности осадков, выпадающих на почву, являются начальными условиями для самой модели. Такие значения могут быть дискретными. Как видно, приведенная ниже модель включает в себя простое дифференциальное уравнение первого порядка. Отличительной особенностью данной модели является то, что между переменными имеется гистерезисная зависимость. Данную зависимость можно описать с помощью оператора Прейсаха [6-12]. Стоит отметить, что выпадение осадков не всегда может быть постоянным (они то начинаются, то прекращаются), кроме того, во времени они также имеют разную интенсивность, это влияет на возникновение разрывов функции в правой части уравнения. Это является отличительной особенностью данной модели. При этом численное построение решений возникающих разрывов потребовало разработки специальных методов. Кроме того, требовалось обосновать и доказать существование и единственность их решений, и только после этого, на их основе

был реализован численный алгоритм. Также следует отметить, что с момента начала или прекращения осадков мгновенно изменяется поток воды, проникающий через поверхность почвы, что приводит к переключению между атмосферным и почвенным контролем в модели.

Модель, описывающая водный баланс и позволяющая учесть такие эффекты, как гистерезис, возникающий между содержанием воды и матричным потенциалом, носит название FEST и выглядит следующим образом [7-12]:

$$L \frac{d}{dt} \theta(t) = I(t) - D(t) - E(t), \quad (10)$$

где L – толщина слоя почвы, $\theta(t)$ – удельное содержание воды (при условии $0 \leq \theta \leq 1$), $I(t)$ – интенсивность проникновения влаги в почву, $D(t)$ – интенсивность дренажа под почвенный слой, $E(t)$ – интенсивность испарения, возникающая за счет корней растений, находящихся в почвенном слое.

Правая часть данной модели определяется следующим выражением

$$I(t) = \min \left\{ Q(t), \frac{\psi(t)}{A} \right\}, D(t) = \frac{1}{B} \left(\psi + \frac{L}{2} \right), \quad (11)$$

$$E(t) = \frac{ET(t)}{C}$$

где ψ – матричный потенциал; A, B, C – параметры уравнения; $Q(t)$ – интенсивность наблюдаемых осадков; $ET(t)$ – интенсивность испарения и транспирации.

Проникновение осадков через сеть макропор происходит равномерно и занимает весь объем почвенного слоя. В момент, когда поступающие осадки больше не могут впитываться почвой, излишек уходит под поверхность слоя и таким образом возникает «запруживание». В данной модели вариант закона Дарси представляет почвенное осушение или дренаж, а также матричные силы, удерживающие воду.

Зависимость между матричным потенциалом и удельным содержанием воды моделируется с помощью оператора Прейсаха P . Исходя из этого, модель (10) примет вид

$$\begin{aligned} y'(t) &= f(t, x(t)) + g(t) = F(t, x(t)), \\ y(t) &= P[\eta(t)]x(t) \end{aligned} \quad (12)$$

где $x(t)$ и $y(t)$ – входные и выходные параметры оператора Прейсаха с переменным состоянием $\eta(t)$; $f(t, x)$ – функция непрерывно дифференцируема по переменным t и x ; $g(t)$ –

функция непрерывно дифференцируема, кроме точек $T = \{\tau_i\}$, в которых определены и ограничены значения $g(\tau_i - 0)$, $g(\tau_i + 0)$, $g'(\tau_i - 0)$, $g'(\tau_i + 0)$, но $g(t)$ или $g'(t)$ могут иметь ограниченные разрывы в τ_i . Также следует сделать предположение о том, что любой ограниченный интервал содержит конечное число точек τ_i [3–9].

Адекватность гистерезисной модели. Проведение эксперимента

С целью апробации полученной модели с марта 2021 г. по июль 2022 г. была проведена серия экспериментов, заключавшихся в измерении количества осадков и других гидрологических величин почвы в г. Воронеже. Затем производился сравнительный анализ результатов моделирования и измерения. Суть эксперимента заключалась в следующем: на первом этапе с использованием ПЭВМ произведены численные расчеты решений модели (10). При этом для выбора плотности меры оператора Прейсаха использовалась «wedge»-модель. Более подробно об успешном ее применении в моделировании зависимости между матричным потенциалом и содержанием воды в почве представлено в работе [7]. Интенсивность осадков $Q(T)$ рассматривалась как кусочно-постоянная функция, и в качестве расчетов использовались измерения количества осадков в г. Воронеже в период с марта 2021 г. по июль 2022 г. с дискретностью измерений в один час. Второй этап проведения эксперимента заключался в проведении замеров водного баланса почвы на том же самом участке. При этом для определения максимальной глубины проникновения влажности и понимания, насколько адекватно прогнозирует модель данное проникновение, измерения проводились на двух разных глубинах, соответственно значение L было выбрано равным 0,3 для первого массива данных и 0,6 для второго. При этом параметры A, B, C подбирались таким образом, чтобы оптимизировать соответствие между данными измерений и моделью [3–9].

Результаты расчетов приведены на рис. 3. На нем представлено численное решение модели (10) (в виде сплошной кривой), а также значения проведенных измерений содержания влаги в почве (в виде прерывистой кривой) для двух наборов данных измерений. При этом параметры имеют следующие значения $A = 1,2 \times 10^6$ с, $B = 2,6 \times 10^6$ с, $C = 9 \times 10^6$ с, $L = 0,3$ м – верхний график, $A = 1 \times 10^6$ с, $B = 1,4 \times 10^6$ с, $C = 4 \times 10^6$ с,

$L = 0,6$ м - нижний график.

Анализ данных подтверждает, что полученные с помощью модели значения содержа-

ния влаги в почве соответствуют результатам измерений.

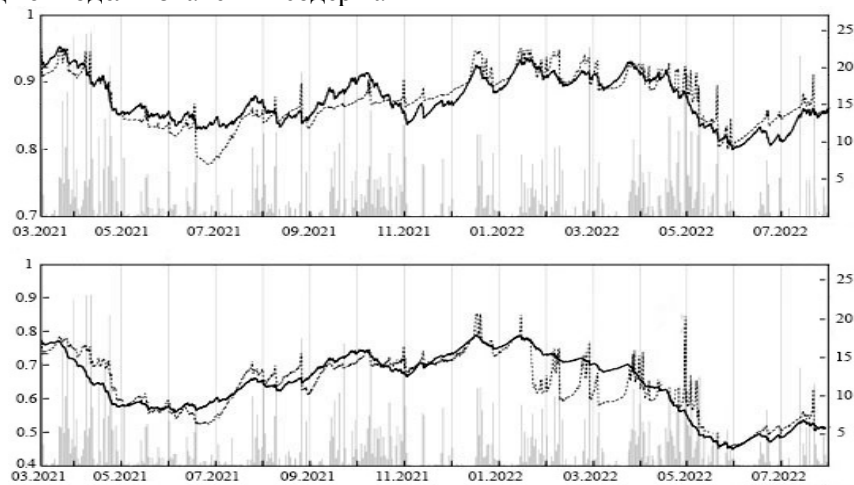


Рис. 3. Результаты сравнительного анализа

Графики были получены с одинаковыми параметрами «wedge»-модели. При этом серым цветом на рис. 3 показаны данные о количестве осадков.

Кроме того, следует отметить, что на рис. 3 также имеются явные «пики», которые не воссоздаются при помощи данной модели. Среди объяснимых причин этому явлению можно выделить следующие. В почве имеются, как отмечалось ранее, макропоры, они заполняются водой в первую очередь. Не стоит забывать о возможных погрешностях в результатах измерений. Кроме того, на результаты расчетов также повлияло низкое разрешение данных об осадках. Также следует отметить, что модель не учитывает множества других факторов и является упрощенной, что делает результат, полученный с ее помощью, не совсем точным.

Заключение

В настоящей работе предложена новая модель, описывающая динамику влагосодержания в почве, основанная на гистерезисной связи между удельным содержанием влаги в почве и матричным потенциалом. Указанная модель формализуется посредством системы дифференциальных и алгебраических уравнений. При этом в качестве модели гистерезисных связей используется преобразователь Прейсаха – модель континуальной системы неидеальных реле, соединенных параллельно. Отличительной особенностью представленной модели является

тот факт, что оператор, формализующий гистерезисные связи, стоит под знаком производной. Полученные результаты в рамках вычислительного эксперимента – динамика влагосодержания в течение конечного временного промежутка – сравниваются с реальными данными на примере территорий, расположенных в южной части России и Узбекистана.

Литература

1. Высоцкий Г.Н. Избранные сочинения. Т. II: Почвенные и почвенно-гидрологические работы. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 400 с.
2. Роде А.А. Избранные труды. Т. IV: Проблемы гидрологии почв. М.: ГНУ Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2009. 598 с.
3. Красносельский А.М., Кросс Р., Покровский А.В. Нестационарные модели Прейсаха и их свойства// Доклады Академии наук. 2001. 381 (2). С. 180–184.
4. Матвеев М.Г., Михайлов В.В. Управление организационно-технической системой в условиях метеорологической неопределенности: монография. Воронеж: ВВВАИУ (ВИ), 2006. 146 с.
5. Андронов А.А. Теория колебаний. М.: Физматгиз, 1959. 357 с.
6. Колмогоров А.Н. Элементы теории функции и функционального анализа. М.: Наука, 1981. 543 с.
7. Красносельский М.А. Положительные решения операторных уравнений. М.: Физматгиз, 1962. 394 с.
8. Urabe M. Numerical investigation of subharmonic solution to Duffings equation. Rubl, Research Inst. Math. Sci., Ser. A (Kyoto Univ). 1969. 5 (1). P. 79–112.
9. Visintin A. Identification of hysteresis loop// Appl. math. and comp. phys. 1987. №2. P. 73–79.
10. Oscillations under hysteretic conditions: from simple oscillator to discrete Sine-Gordon model/ M.E. Semenov et al.// Springer Proceedings in Physics. 4th. Topics in Nonlinear Mechanics and Physics - Selected Papers from CSNDD 2018. 2019. P. 229-253.

11. Чарный И.А. Подземная гидрогазодинамика. М.-Ижевск: НИЦ «РХД», 2006. 436 с.

12. Гистерезисные преобразователи со случайными параметрами/ С.В. Борзунов и др.// Математическое моделирование. 2019. № 31 (7). С. 109-126.

13. Стохастическая модель переноса тепла в приземном слое атмосферы/ В.Г. Задорожний и др. // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2020.

№ 60 (3). С. 462-475.

14. Статистические характеристики решений системы стохастической модели переноса / В.Г. Задорожний и др. //Математическое моделирование. 2020. № 32 (5). С. 21-43.

15. Красносельский М.А., Покровский А.В. Системы с гистерезисом. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. 272 с.

Поступила 08.09.2022; принята к публикации 17.10.2022

Информация об авторах

Ряжских Виктор Иванович - д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: ryazhskih_vi@mail.ru, тел. +7(920) 461-69-15.

Холмуродов Жамшид Бахриддинович - адъюнкт, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина" (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а), e-mail: holmurodov.zhamshid@mail.ru, тел. +7(980) 245-31-42.

Ножкин Владимир Сергеевич - канд. техн. наук, преподаватель, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина" (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а), e-mail: nozhkin-v@list.ru, тел. +7(951) 558-18-47.

Канищева Олеся Ивановна - канд. физ.-мат. наук, преподаватель, Воронежский государственный университет (394018, Россия, г. Воронеж, Университетская пл., 1), e-mail: oleka-olesya@mail.ru, тел. +7(910) 245-49-54.

HYSTERESIS MODEL OF MOISTURE EXCHANGE IN THE UNDERLYING SURFACE

V.I. Ryazhskih¹, G.B. Kholmurodov², V.S. Nozhkin², O.I. Kanishcheva³

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²Military Educational and Scientific Center of the Air Force "Air Force Academy
prof. N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin", Voronezh, Russia

³Voronezh State University, Voronezh, Russia

Abstract: the dynamics of moisture content in the underlying surface and the atmosphere plays a key role in models of atmospheric processes and phenomena. In particular, the processes of the genesis of intramass clouds, evaporation fogs, smoke, etc. are directly related to soil moisture content and atmospheric humidity. In addition, taking into account the significant contribution of moisture content to the energy of the atmosphere, this parameter is a key factor in the formation of meso and microscale movements of air masses. Finally, the atmospheric and related soil moisture content, together with the baric and temperature fields, actually determine the presence (absence) of such natural hazards as showers, thunderstorms, icing, etc. In this regard, the improvement of models of the dynamics of the moisture content of the underlying surface seems important and interesting task. The paper proposes a new model that describes the dynamics of moisture content in the soil, based on the hysteresis relationship between the specific moisture content in the soil and the matrix potential. This model is formalized by means of a system of differential and algebraic equations. In this case, the Preisach converter is used as a model of hysteresis connections - a model of a continuum system of non-ideal relays connected in parallel. The results obtained within the framework of a computational experiment - the dynamics of moisture content over a finite time period are compared with real data on the example of territories located in the southern part of Russia and Uzbekistan

Key words: soil moisture content, hysteresis, differential equations, Preisach converter

References

1. Vysotskiy G.N. "Selected writings. Volume II. Soil and soil-hydrological works" ("Izbrannyye sochineniya. T. II: Pochvennyye i pochvenno-gidrologicheskiye raboty"), Moscow, AN USSR, 1962, 400 p.
2. Rode A.A. "Selected works. Volume IV. Problems of soil hydrology" ("Izbrannyye trudy. T. IV: Problemy gidrologii pochvy"), Moscow: GNU Soil University name V.V. Dokuchaeva, 2009, 598 p.
3. Krasnosel'skiy A.M., Kross R., Pokrovskiy A.V. "Non-stationary Preisach models and their properties", *Reports of the Academy of Sciences (Doklady Akademii nauk)*, 2001, no. 381 (2), pp. 180-184.
4. Matveev M.G., Mihailov V.V. "Management of the organizational and technical system in conditions of meteorological uncertainty" ("Upravlenie organizatsionno-tekhnicheskoy sistemoy v usloviyakh meteoro-logicheskoy neopredelennosti"), monograph, Voronezh: VVVAIU (VI), 2006, 146 p.
5. Andronov A.A. "Theory of oscillations" ("Teoriya kolebaniy"), Moscow: Fizmatgiz, 1959, 357 p.
6. Kolmogorov A.N. "Elements of the theory of function and functional analysis" ("Elementy teorii funktsii i funktsional'nogo analiza"), Moscow: Nauka, 1981, 543 p.
7. Krasnosel'skiy M.A. "Positive solutions of operator equations" ("Polozhitel'nye resheniya operatornykh uravneniy"), Mos-

cow: Fizmatgiz, 1962, 394 p.

8. Urabe M. "Numerical investigation of subharmonic solution to Duffings equation", *Rubl, Research Inst. Math. Sci., Ser. A* (Kyoto Univ), 1969, no. 5 (1), pp. 79–112.

9. Visintin A. "Identification of hysteresis loop", *Appl. Math. and Comp. Phys.*, 1987, no. 2, pp. 73-79.

10. Semenov M.E. et al. "Oscillations under hysteretic conditions: from simple oscillator to discrete. Sine-Gordon model", *Springer Proceedings in Physics. 4th. Cep. "Topics in Nonlinear Mechanics and Physics - Selected Papers from CSNDD 2018"*, 2019, pp.229-253.

11. Charnyy I.A. "Underground fluid dynamics" ("Podzemnaya gidrogazodinamika"), Moscow-Izhevsk: Research Center "RHD", 2006, 436 p.

12. Borzunov S.V. et al. "Hysteresis transducers with random parameters", *Math Modeling (Matematicheskoe modelirovanie)*, 2019, no. 31 (7), pp. 109-126.

13. Zadorogny V.G. et al. "Stochastic model of heat transfer in the surface layer of the atmosphere", *Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics (Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki)*, 2020, no. 60 (3), pp. 462-475.

14. Zadorogny V.G. et al. "Statistical characteristics of solutions to the system of the stochastic transport model", *Math Modeling (Matematicheskoe modelirovanie)*, 2020, no. 32 (5), pp. 21-43.

15. Krasnoselskiy M.A., Pokrovskiy A.V. "Systems with hysteresis" ("Sistemy s gisterezisom"), Moscow: Nauka, 1983, 272 p.

Submitted 08.09.2022; revised 17.10.2022

Information about the authors

Viktor I. Ryazhskikh, Dr. Sci. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: ryazhskih_vi@mail.ru, tel.: +7(920) 461-69-15.

Zhamshid B. Kholmurodov, adjunct, Military Educational and Scientific Center of the Air Force "Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin" (54a Sarykh Bolsheviks st., Voronezh 394064, Russia), e-mail: xolmurodov.zhamshid@mail.ru, tel.: +7(980) 245-31-42.

Vladimir S. Nozhkin, Cand. Sci. (Technical), Assistant Professor, Military Educational and Scientific Center of the Air Force "Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin" (54a Sarykh Bolsheviks st., Voronezh 394064, Russia), e-mail: nozhkin-v@list.ru, tel.: +7(951) 558-18-47.

Olesya I. Kanishcheva, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Assistant Professor, Voronezh State University (1 Universitetskaya sq., Voronezh 394018, Russia), e-mail: oleka-olesya@mail.ru, tel.: +7(910) 245-49-54.

ОСВЕЩЕНИЕ И РЕНДЕРИНГ МОДЕЛЕЙ С ИМПОРТИРУЕМОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ В СБОРОЧНЫХ УЗЛАХ ЦИФРОВЫХ МАКЕТОВ ИЗДЕЛИЙ

А.Н. Юров

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассмотрены подходы, обеспечивающие освещённость объектов и визуальное представление моделей в составе сборочных единиц. В качестве исходных моделей объектов используются цифровые макеты сборочных единиц, которые представлены экспортными форматами данных в системах моделирования. Для обоснования разработки программного модуля подготовлено структурное описание проектного решения для отображения моделей в высоком качестве с фотореалистичными характеристиками. Создано программное решение, обеспечивающее функциональные возможности по визуализации и отображению моделей в составе сборки с эффектами, которые соответствуют условиям поведения объектов в реальном мире. Программный модуль в реализации рендеринга моделей, входящих в состав импортируемых сборочных единиц, выполнен на классах и методах открытого геометрического ядра Open CASCADE, где посредством диалогов, а также с помощью вспомогательных элементов производится визуализация и освещение поверхностей объектов. Кроме того, в программном обеспечении реализованы средства просмотра и представления моделей в отдельном масштабируемом окне, имеется функционал для изменения цвета моделей, удаления отдельных моделей в сборочном узле, показан состав импортируемого сборочного узла при условии, что указанные записи размещены в экспортном формате данных. Разработка подготовлена для использования в операционной системе Linux Manjaro на базе 64-х разрядной архитектуры

Ключевые слова: представление моделей, рендеринг объектов, цифровые макеты изделий, геометрическое ядро Open Cascade, операционные системы с открытым исходным кодом

Введение

С развитием технических средств, в частности, с появлением устройств по выводу графических изображений в высоком качестве стало возможным создавать имитационные цифровые модели изделий с реалистичными характеристиками: поверхности цифрового макета изделия могут включать отражение других поверхностей, фрагменты изделия, блики и прочие эффекты, которые соответствуют условиям поведения объектов в реальном мире [3-7].

Ряд указанных представлений может быть уже реализован на аппаратном уровне видеосистемы, тем самым, не загружая расчётами по визуализации центральный процессор ЭВМ. Однако в некоторых случаях необходимы решения и подходы, которые обеспечивают получение объектов с высоким качеством изображения и определёнными параметрами (заданными материалами). Такие реализации могут быть получены только программным путём. С использованием программной реализации потребуется значительное количество оперативной памяти, существенно увеличится нагрузка на

процессор, возрастут требования к дисковому пространству вычислительной системы.

С момента использования графического оборудования в качестве основного средства для рендеринга в реальном времени производительность процессоров неуклонно росла. Несмотря на то, что производительность аппаратного рендеринга в значительной степени скрыта, некоторым современным программным рендерерам реального времени удаётся обеспечить широкий набор функций и достаточную производительность (для программного рендерера) за счет использования специальной динамической компиляции и расширенных инструкций.

Средствами геометрического ядра Open CASCADE [1,2] можно достичь определённых эффектов освещённости объектов и получить конечное изображение цифрового макета изделия, которое по визуальному представлению соответствует условиям поведения объектов в реальном мире.

Требования для проектирования программного модуля

При разработке автономных программных решений, связанных с

рендерингом объектов, требуется функционал, обеспечивающий импорт сборочных узлов в систему, базовое отображение и видовые преобразования моделей в отдельном окне приложения [8-10].

Кроме того, необходимы классы, которые обеспечат реализацию различных режимов освещения поверхностей моделей методами геометрического ядра.

Для разработки может быть предложена следующая структура приложения: проектное решение реализуется на базе стандартного оконного шаблона с последующим подключением библиотек геометрического ядра. Создаётся минимальный программный интерфейс для управления сборками в оконном режиме с отдельными окнами, в которых размещена информация о составе изделия, определения режима работы рендера, установка параметров и т.д. Следом подключаются компоненты (стили) для оформления элементов пользовательского интерфейса, чтобы придать приложению законченный вид. Далее разрабатывается класс, обеспечивающий рендер объектов. Сами объекты представляют собой модели сборочных узлов, доступ к которым обеспечивается посредством экспортных форматов. В конечном итоге, при использовании определённых методов освещения объектов производится построение окончательной сцены с моделями сборки в отдельном окне приложения.

Пути реализации

Интерфейс приложения обычно разрабатывается в привычном стиле для пользователя согласно общим представлениям, которые используют разработчики отечественных систем по моделированию изделий, а также решений по просмотру инженерных данных. Примером могут служить КОМПАС-3D Viewer от компании «Аскон», TDMS Viewer от компании «Нанософт» и ряда других.

Функциональная часть модуля требует более детальной проработки. Средства по визуализации и работе с освещением, которые реализуются геометрическим ядром, должны быть интегрированы в функционал проектного решения и работать в режиме реального времени.

Общий класс геометрического, отвечающий за представление объектов на сцене, определён как `Graphic3d_CLight` (рис. 1).

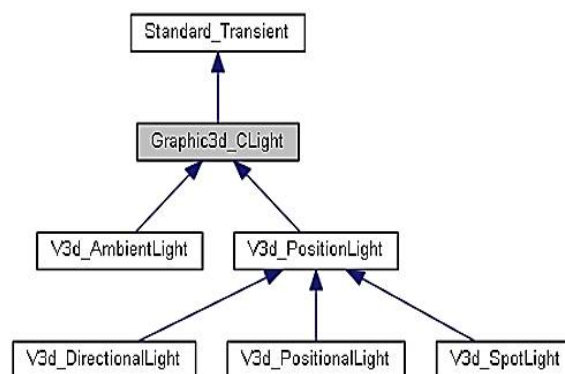


Рис. 1. Класс по работе с освещением объектов

Распределенное освещение в моделях может быть реализовано классом `V3d_AmbientLight` (рис. 2).

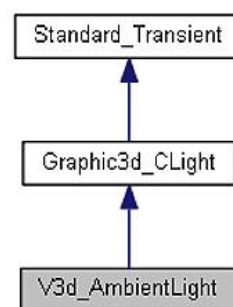


Рис. 2. Класс распределенного освещения объектов

За позиционное освещение объектов отвечает класс `V3d_PositionLight`. Диаграмма местоположения класса представлена на рис. 3.

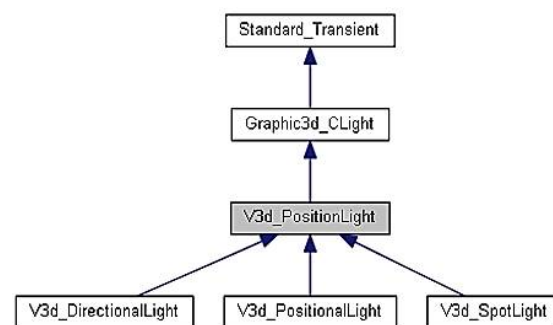


Рис. 3. Класс позиционного освещения объектов

Кроме того, в разработке использованы классы, обеспечивающие точечное и направленное освещение (рис. 4).

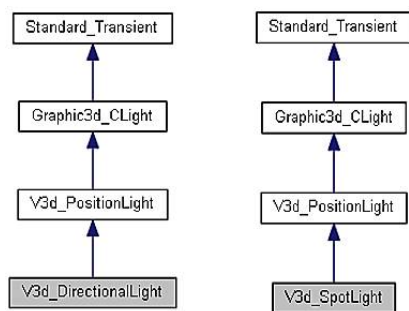


Рис. 4. Классы, обеспечивающие точечное и направленное освещение

Компоновка представления в виде функциональной модели приложения может быть построена согласно данным, как показано на рис. 5.

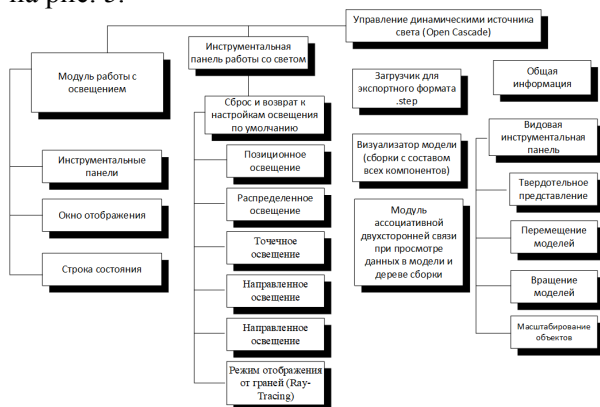


Рис. 5. Функциональная модель программного решения по управлению освещением

Согласно приведённым данным, был разработан отдельный класс, который обеспечивает получение изображения высокого качества средствами геометрического ядра Open CASCADE.

В классе используются логические переменные, отвечающие за включение или выключение того или иного источника освещения, а также методы, влияющие на формирование окончательного изображения моделей в сборочном узле. Некоторые методы могут работать в комбинации друг с другом. Полный перечень реализованных методов следующий:

`void clearLight3d()` – полное удаление всех источников освещения, которые были заданы для импортируемых моделей;

`void setSpotLight3d()` – прожекторное или точечное освещение;

`void setAmbientLight3d()` – метод позволяет распределить освещение по поверхности всех импортируемых моделей с заданной стороны. Возможность определения или изменения

позиций в программном средстве не предусмотрена;

`void setDirectionalLight3d()` – метод, обеспечивающий направленное освещение;

`void setPositionalLight3d()` – позиционное освещение позволяет определить еще один вид освещения в отдельном методе;

`void setTransparencyPresentation3d(Standard_Real)` – режим полупрозрачности для импортируемых моделей или сборочных узлов;

`void setRayTracing()` – основной метод, позволяющий задать режим рендеринга. Данный режим устанавливает свойство отображения на поверхностях импортированных изделий теней и контуров элементов от уже имеющихся деталей.

Эксплуатация и функциональные возможности программной системы

Программное решение обеспечивает рендеринг моделей (сборочных единиц), которые были загружены в экспортном формате step.

После открытия на экране отображается сборочная единица, показан ее состав, реализована возможность выбора элементов по названию или указанию модели в контексте сборки (рис. 6).

Работа с освещением реализована в отдельной панели над окном отображения. Можно использовать любые режимы и менять цвет всех моделей. Крайняя левая кнопка позволяет произвести сброс всех активных источников освещения. Крайняя правая обеспечивает включение специального режима по отображению граней (ray-tracing) и может быть применена с любыми источниками света в комбинации.

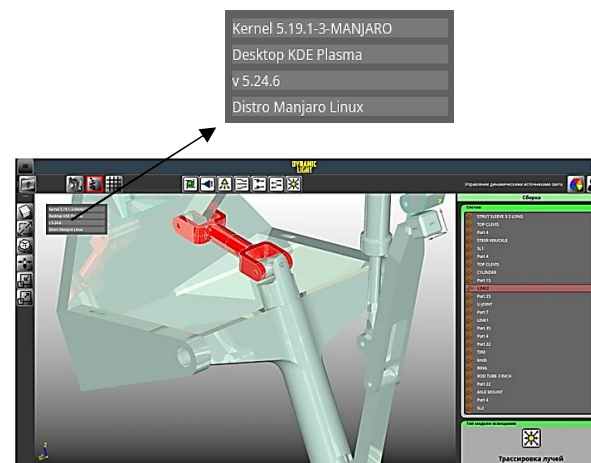


Рис. 6. Общий вид программы с отображением перечня моделей сборочной единицы

Для удобства и определения некоторых действий в приложении реализовано отдельное окно, в котором показано, какой источник освещения на текущий момент использован (рис. 7). Следует отметить, что программа имеет средства, которые обеспечивают полное покрытие элементов интерфейса справочной информацией.

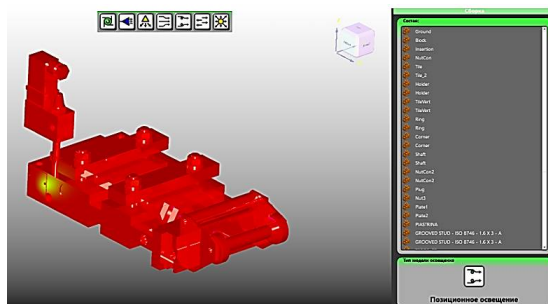


Рис. 7. Отображение типа модели освещения

Заключение

Модуль обеспечивает рендеринг моделей в составе сборочного узла, реализация которого построена на методах и классах геометрического ядра Open Cascade. Для этого на основе разработанных методик подготовлен отдельный класс по управлению освещением и интегрирован в программную разработку. Программное решение обладает развитыми средствами интерактивности в работе с цифровыми макетами изделий. Выбор варианта освещения осуществляется посредством указания типа действия на отдельной инструментальной панели.

Приложение включает в себя полный набор динамических библиотек и зависимостей для обеспечения автономности в процессе работы.

Основные возможности:

- загрузка моделей в экспортном формате step;
- получение списка вхождения деталей в состав сборки;
- видовые изменения моделей в окне отображения;
- группа операций по работе с освещением с возможностью возвращения к базовым настройкам;
- операция по удалению элемента (группы элементов) из состава сборочной единицы;

- выбор отдельной детали в сборочной единице;

- интерактивные инструкции в процессе работы.

Актуальность разработки состоит в создании отечественного ПО и некоторого функционала программных решений по моделированию для операционных систем с открытым исходным кодом.

Литература

1. Visualization of metalworking processes in the development of simulation programs for equipment with numerical control / A.N. Yurov, M.I. Chizhov, A.V. Bredikhin, V.V. Lavlinsky // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. 2020. P. 32092.
2. Algorithmic differentiation of the Open CASCADE Technology CAD kernel and its coupling with an adjoint CFD solver / Mladen Banović, Orest Mykhaskiv, Salvatore Auremma, Andrea Walther, Herve Legrand & Jens-Dominik Müller. 2018. P. 813-828.
3. Development of approaches to realization of specialized visualization systems / V.L. Averbukh, M.O. Bakhterev, P.A. Vasev, D.V. Manakov, I.S. Starodubtsev // GraphiCon. 2015. P. 17–21.
4. Slyadnev S.E., Malyshev A.S., Turlapov V.E. Automated simplification of mechanical-engineering CAD models and assemblies without design history // Proc. Int. Conf. Grafikon. 2018. P. 488–494.
5. On the development of blend faces and holes recognition algorithm for CAE applications / J.Y. Lai, Z.W. You, Y.K. Chiu et al. // Key Eng. Mater. 2015. № 656–657. P. 789–794.
6. Zhu H., Menq C. B-rep model simplification by automatic fillet/round suppressing for efficient automatic feature recognition // Comput. Aided Des. 2002. №34. P. 109–123.
7. Automatic recognition and suppression of holes on mold bases for finite element applications / P.-P. Song, J.-Y. Lai, Y.-C. Tsai and C.-H. Hsu // Eng. Comput. 2019. Vol. 35. № 3. P. 925–944.
8. Slyadnev S., Malyshev A., Turlapov V. CAD model inspection utility and prototyping framework based on OpenCascade // GraphiCon. 2017. P. 323–327.
9. Tsygankov D., Pokhilko A. Designed Product 3D-model Semantic Representation in a CAD-system // Interactive Systems: Problems of Human-Computer Interaction, Collection of scientific papers. Ulyanovsk: USTU, 2017. P. 255-259.
10. Development of Conceptual Modeling Method to Solve the Tasks of Computer-Aided Design of Difficult Technical Complexes on the Basis of Category Theory / A.G. Korobeynikov, M.E. Fedosovsky, A.V. Gurjanov, I.O. Zharinov, A.V. Shukalov // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Vol. 12. № 6. P. 1114-1122.

Информация об авторах

Юров Алексей Николаевич – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kitp@vorstu.ru, тел. +7(951)548-63-12

**LIGHTING AND MODEL RENDERING WITH IMPORTED GEOMETRY
IN ASSEMBLY UNITS OF DIGITAL PRODUCT LAYOUTS**

A.N. Yurov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the approaches that provide object's illumination and visual representation of models as a part of the assemblies are considered. Digital layouts of assembly units, which are represented by export data formats in modeling systems, are used as initial object models. To substantiate the development of the software module, a structural description of the design solution for high quality display of models with photorealistic features was prepared. A software solution was created that provides functionality to visualize and display models as part of an assembly with effects that correspond to the conditions of behavior of objects in the real world. The software module in the implementation of rendering of models, which are part of the imported assemblies, is made on the classes and methods of the open geometric kernel Open CASCADE, where through dialogs, as well as with the help of auxiliary elements, visualization and lighting of object surfaces is made. Besides, the software implements tools for viewing and representing models in a separate scalable window, has functionality for changing model colors, deleting individual models in the assembly, shows the composition of the imported assembly if the specified records are placed in the export data format. The development is prepared for use in the Linux Manjaro operating system based on 64-bit architecture

Key words: model representation, object rendering, digital product layouts, Open Cascade geometric kernel, opensource operating systems

References

1. Yurov A.N., Chizhov M.I., Bredikhin A.V., Lavlinsky V.V. "Visualization of metalworking processes in the development of simulation programs for equipment with numerical control", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations, 2020, pp. 32092.
2. Banović M., Mykhaskiv O., Auriemma S., Walther A., Legrand H., Müller J.-D. "Algorithmic differentiation of the Open CASCADE Technology CAD kernel and its coupling with an adjoint CFD solver", pp. 813-828
3. Averbukh V.L., Bakhterev M.O., Vasev P.A., Manakov D.V., Starodubtsev I.S. "Development of approaches to realization of specialized visualization systems", *GraphiCon*, 2015, pp. 17–21.
4. Slyadnev S.E., Malyshev A.S., Turlapov V.E. "Automated simplification of mechanical-engineering CAD models and assemblies without design history", *GraphiCon*, 2018, pp. 488–494.
5. Lai J.Y., You Z.W., Chiu Y.K., et al. "On the development of blend faces and holes recognition algorithm for CAE applications", *Key Eng. Mater.*, 2015, no. 656–657, pp. 789–794.
6. Zhu H., Menq C. "B-rep model simplification by automatic fillet/round suppressing for efficient automatic feature recognition", *Comput. Aided Des.*, 2002, no. 34, pp. 109–123.
7. Song P.-P., Lai J.-Y., Tsai Y.-C., Hsu C.-H. "Automatic recognition and suppression of holes on mold bases for finite element applications", *Eng. Comput.*, 2019, vol. 35, no. 3, pp. 925–944.
8. Slyadnev S., Malyshev A., Turlapov V. "CAD model inspection utility and prototyping framework based on OpenCascade", *GraphiCon* 2017, pp. 323–327
9. Tsygankov D., Pokhilko A. "Designed product 3D-model semantic representation in a CAD-system", *Interactive Systems: Problems of Human -Computer Interaction*, Ulyanovsk: USTU, 2017, pp. 255-259.
10. Korobeynikov A.G., Fedosovskiy M.E., Gur'yanov A.V., Zharinov I.O., Shukalov A.V. "Development of conceptual modeling method to solve the tasks of computer-aided design of difficult technical complexes on the basis of category theory", *Int. J. of Applied Engineering Research*, 2017, vol. 12, no. 6, pp. 1114-1122.

Submitted 01.09.2022; revised 10.10.2022

Information about the author

Aleksey N. Yurov, Cand. Sci. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kitp@vorstu.ru, tel.: +7 (951) 548-63-12

МНОГОУРОВНЕВАЯ СИГНАЛЬНАЯ АДАПТАЦИЯ В НЕСТАЦИОНАРНЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ

С.Л. Подвальный, Е.М. Васильев

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматривается задача построения адаптивных регуляторов для нестационарных систем автоматического управления. Отмечено, что известные схемы сигнальной адаптации не обеспечивают заданное качество регулирования в широком диапазоне изменения параметров объекта. Выдвигается предположение, что указанный недостаток может быть устранён, если для решения поставленной задачи воспользоваться принципами модульности и многоуровневости управления, составляющими в своей совокупности эволюционную концепцию многоальтернативности строения и функционирования сложных систем. Для реализации сигнальной адаптации на основе указанных принципов предложено исходный объект высокого порядка разбить на структурные и физические элементы низкого порядка. Показано, что если динамическая сложность каждого структурного элемента объекта по числу доминирующих корней характеристического полинома не превышает второго порядка, то для любого выделенного элемента может быть реализована простейшая одноуровневая подсистема сигнальной адаптации с явной эталонной моделью. Каждая такая подсистема обладает значительными запасами устойчивости по амплитуде и фазе, что позволяет обеспечить высокое качество адаптации в любой из них. Предложена структура системы управления, содержащая многоуровневую схему сигнальной адаптации, которая представляет собою иерархически подчинённое соединение одноуровневых схем с двумя параллельными каналами: каналом с каскадами объекта и каналом с соответствующими каскадами эталонной модели. Такая организация многоуровневой схемы исключает последовательное накопление ошибок адаптации в каждом каскаде. Составлена математическая модель схемы многоуровневой сигнальной адаптации и исследованы её адаптационные возможности. Отмечено, что для обеспечения нулевой установившейся ошибки схему адаптации целесообразно охватить дополнительным контуром регулирования по отклонению с интегратором в прямом канале системы. Представлены результаты численного моделирования предложенной схемы многоуровневой адаптации в сравнении с традиционной одноуровневой схемой и подтверждена высокая эффективность использованного в работе многоальтернативного подхода к управлению нестационарными системами

Ключевые слова: нестационарные системы управления, концепция многоальтернативности, принцип многоуровневости, сигнальная адаптация

Введение

Автоматическое управление нестационарными объектами может быть реализовано путём соответствующего изменения параметров регулятора (параметрическая адаптация), а также снижением чувствительности системы к изменениям свойств объекта за счёт отрицательных обратных связей с большим коэффициентом усиления (сигнальная адаптация) [1-8].

Системы с параметрической адаптацией отличаются своей универсальностью в плане применения к различным классам объектов, и обеспечивают значительную глубину адаптации, но при этом характеризуются относительной сложностью реализации своих алгоритмов [9-12].

Сигнальная адаптация значительно проще параметрической и хорошо приспособлена для быстрых вариаций параметров объекта [13-15]. Общепризнанным существенным недостатком сигнальной адаптации является узкий диапазон

компенсируемого изменения свойств объекта [16].

В настоящей работе предлагается способ устранения указанного недостатка сигнальной адаптации на основе использования эволюционной концепции многоальтернативного управления, в частности – принципов многоуровневости и модульности [17-21]. Предполагается, что выделение в объекте нескольких блоков (каскадов) низкого порядка и введение для каждого блока соответствующего контура сигнальной адаптации позволит увеличить глубину адаптации всей системы в целом. Возможность такого выделения каскадов определяется конкретной структурой объекта управления, и вполне ожидаема, например, в системах управления электромеханическими, электротехническими и радиотехническими преобразователями энергии большой мощности [22-25].

Теоретическое обоснование многоуровневой сигнальной адаптации

Рассмотрим объект:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Bx(t) + Nu(t); \\ y(t) &= Ax(t),\end{aligned}\quad (1)$$

в котором $x(t)=[x(t)_1 \dots x(t)_n]^T$ – вектор состояния объекта; $y(t)$ – управляемая (выходная) величина; $u(t)$ – управляющее воздействие (аргумент t далее везде опущен); B – характеристическая матрица объекта, $[n \times n]$; N – матрица управления, $[n \times 1]$; A – матрица выхода, $[1 \times n]$. Матрицы B, N и A объекта содержат нестационарные элементы, изменяющиеся во времени.

Применим к этому объекту схему одноуровневой сигнальной адаптации с явной эталонной моделью, рис. 1 [16]:

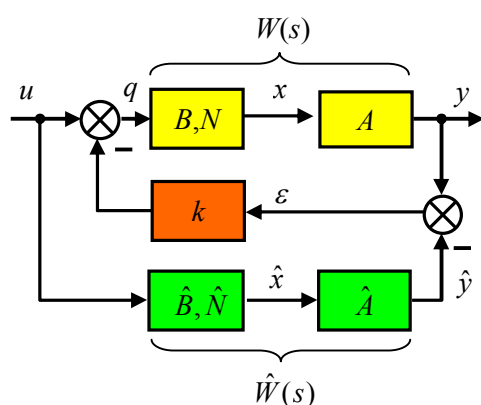


Рис. 1. Структурная схема системы одноуровневой сигнальной адаптации с явной эталонной моделью

Эталонная модель объекта обозначена на рис. 1 матрицами $\hat{B}, \hat{N}, \hat{A}$ и величинами $\hat{x}, \hat{y}$, имеющими названия аналогичные объекту (1). Коэффициент k – скалярная постоянная, образующая замкнутый контур сигнальной адаптации; ε – ошибка адаптации. $W(s)$ и $\hat{W}(s)$ – передаточные функции объекта и эталонной модели соответственно.

Уравнения движения представленной на рис. 1 схемы имеют вид:

$$\begin{cases} \dot{x} = Bx + N(u - k \cdot \varepsilon); \\ y = Ax, \\ \dot{\hat{x}} = \hat{B}\hat{x} + \hat{N}u; \\ \hat{y}(t) = \hat{A}\hat{x}; \\ \varepsilon = y - \hat{y}. \end{cases}\quad (2)$$

Система уравнений (2) указывает на принципиальную возможность сигнальной компенсации вариаций матриц B, N и A объекта слагаемым $k\varepsilon$, входящим в общее управление $q = u - k\varepsilon$.

Подставляя из (2) выражения для y и $\hat{y}$ в уравнение для ε , а затем ε – в уравнение для $\dot{x}$, получим:

$$\begin{cases} \dot{x} = (B - NkA)x + N(k\hat{A}\hat{x} + u); \\ \dot{\hat{x}} = \hat{B}\hat{x} + \hat{N}u, \end{cases}\quad (3)$$

Проведём анализ свойств схемы (2),(3). Перепишем (3) в виде:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\hat{x}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B - NkA & Nk\hat{A} \\ 0 & \hat{B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \hat{x}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N \\ \hat{N} \end{bmatrix} u. \quad (4)$$

В результате найдём характеристический полином схемы с одноуровневой сигнальной адаптацией:

$$\begin{aligned} \left| \begin{array}{cc|c} sE - B + NkA & -Nk\hat{A} & \\ \hline 0 & sE - \hat{B} & \end{array} \right| &= \\ = |sE - B + NkA| \cdot |sE - \hat{B}|, \end{aligned}\quad (5)$$

$E = \text{diag}(1 \dots 1)$.

Выражение (5) показывает, что собственные числа характеристической матрицы схемы (2) без изменений повторяют корни характеристического полинома $|sE - \hat{B}|$ эталонной модели, и включают в себя также корни характеристического полинома $|sE - B + NkA|$ объекта, которые могут существенно измениться из-за введения коэффициента обратной связи k . При этом подразумевается, что полином $|sE - \hat{B}|$ Гурвицев, т.е. эталонная модель выбирается заведомо устойчивой с некоторым значением максимального корня этого полинома $\hat{\lambda}_{\max} < 0$.

Для анализа влияния коэффициента k на устойчивость замкнутого контура адаптации представим матрицы объекта (1) в форме Фробениуса:

$$\begin{aligned} B &= \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{E}_{n-1} \\ -c & \end{bmatrix}; \quad N = [0 \dots 0 \ 1]^T; \\ A &= [b_0 \dots b_m \ \mathbf{0}], \end{aligned}\quad (6)$$

где $[b_0 \dots b_m \ 0]$ и $\mathbf{c} = [c_0 \dots c_{n-1}]$ – соответственно коэффициенты полиномов числителя и знаменателя передаточной функции $W(s)$ объекта на рис. 1:

$$W(s) = \frac{y(s)}{q(s)} = A(sE - B)^{-1}N \quad (7)$$

или

$$W(s) = \frac{B(s)}{C(s)} = \frac{b_ms^m + b_{m-1}s^{m-1} + \dots + b_1s + b_0}{s^n + c_{n-1}s^{n-1} + \dots + c_1s + c_0}; \quad m < n. \quad (8)$$

Переписав полином $|sE - B + NkA|$ с учётом (6), (7) и (8) получим:

$$\begin{aligned} |sE - B + NkA| &= \\ &= s^n + c_{n-1}s^{n-1} + c_{n-2}s^{n-1} + \dots \\ &+ (c_m + b_mk)s^m + (c_{m-1} + b_{m-1}k)s^{m-1} + \dots \\ &+ (c_1 + b_1k)s + c_0 + b_0k. \end{aligned} \quad (9)$$

Выражение (9) показывает, что одноуровневая сигнальная адаптация, применяемая к объекту (1) сопровождается увеличением исходных коэффициентов c_i его характеристического полинома до значений $c_i + b_ik$, ($i = 0 \dots m$). Обратим внимание, что такому изменению подвергаются не все, а только первые $m+1$ коэффициентов $\mathbf{c}$.

Такое частичное и непропорциональное изменение коэффициентов исходного характеристического полинома $|sE - B|$ объекта в общем случае приводит к непредсказуемому перемещению собственных чисел матрицы $B - NkA$ в комплексной плоскости их значений, что вступает в противоречие со стремлением повысить качество адаптации путём увеличения k .

Несмотря на этот общий вывод, рассмотрим несколько конкретных случаев.

1) *Объект первого порядка (интегратор).*

Для такого объекта характеристический полином контура сигнальной адаптации имеет вид:

$$|sE - B + NkA| = s + b_0k. \quad (10)$$

В этом случае контур адаптации при любых неотрицательных значениях k сохраняет свою устойчивость. Однако в результате введения контура адаптации интегрирующие свойства объекта теряются и он приобретает свойства инерционного звена. В связи с этим анализ этого случая сводится к анализу объектов в виде инерционного звена (п. 2).

2) *Объект первого порядка (инерционное звено).*

Вид характеристического полинома контура сигнальной адаптации:

$$|sE - B + NkA| = s + c_0 + b_0k. \quad (11)$$

Коэффициент k обратной связи контура входит только в свободный член $c_0 + b_0k$ этого полинома, и всегда есть возможность выбора достаточно большого k , при котором выполняется неравенство $-(c_0 + b_0k) \ll \hat{\lambda}_{\max}$, т.е. схема адаптации обеспечит систему доминирующих корней своего характеристического полинома практически идентичную корням полинома $|sE - \hat{B}|$ эталонной модели в широком диапазоне изменения параметров c_0 и b_0 объекта.

3) *Объект второго порядка.*

Для объекта второго порядка характеристический полином контура сигнальной адаптации имеет два варианта реализации – для объекта с форсированием:

$$|sE - B + NkA| = s^2 + (c_1 + b_1k)s + c_0 + b_0k, \quad (12)$$

и для объекта без форсирования:

$$|sE - B + NkA| = s^2 + c_1s + c_0 + b_0k. \quad (13)$$

Воспользуемся аналитическим выражением для корней $s_{1,2}$ полинома (12):

$$s_{1,2} = -\frac{c_1 + b_1k}{2} \pm \sqrt{\frac{(c_1 + b_1k)^2}{4} - (c_0 + b_0k)}. \quad (14)$$

Из (14) следует, что для случая (12) выбор достаточно большого k обеспечивает доминирующее положение корням полинома $|sE - \hat{B}|$ эталонной модели без потери устойчивости контура адаптации.

В случае (13) $b_1 = 0$ и выражение (14) приобретает вид:

$$s_{1,2} = -\frac{c_1}{2} \pm \sqrt{\frac{c_1^2}{4} - (c_0 + b_0 k)}, \quad (15)$$

из которого вытекает, что с ростом коэффициента k корни становятся комплексными, и их мнимая часть возрастает. На вещественную часть корней $s_{1,2}$ коэффициент k не влияет. Из этого следует, что с увеличением k частота собственных колебаний контура увеличивается, и может быть выведена за пределы рабочей области частот всей системы управления.

Устойчивость контура по-прежнему сохраняется при любом значении k .

Проанализируем возможность подавления резонансных частот контура в полной схеме адаптации для случая (13).

Передаточная функция полной схемы адаптации (рис. 1) имеет вид:

$$W_a(s, k) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{W(s)(k\hat{W}(s) + 1)}{1 + kW(s)}. \quad (16)$$

Предел выражения (16) при k , стремящемся к бесконечности:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} W_a(s, k) = \hat{W}(s) \quad (17)$$

указывает на принципиальную – теоретическую способность схемы на рис. 1 воспроизвести свойства эталонной модели.

Найдём количественную – практическую оценку значений k , при которых отмеченные выше резонансные колебания контура адаптации будут подавлены до заданного уровня, например, (-20) дБ.

Возьмём объект:

$$W(s) = \frac{1}{s^2 + 0.2s + 1} \quad (18)$$

с ярко выраженными колебательными свойствами (коэффициент демпфирования для этого объекта равен 0,1), и эталонную модель:

$$\hat{W}(s) = \frac{1}{s^2 + 2s + 1} \quad (19)$$

с вещественными корнями характеристического полинома, т.е. с монотонным характером переходного процесса на её выходе.

В результате подстановки (18) и (19) в (16) получим $W_a(s)$, и далее – частотные и переход-

ные характеристики схемы адаптации для значений $k = 1 \dots 100$, рис. 2, 3.

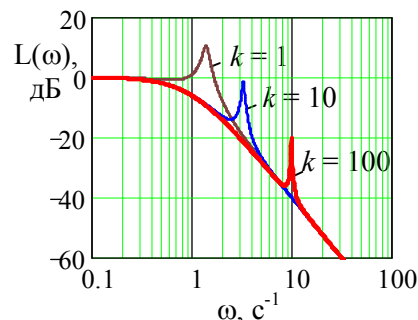


Рис. 2. Амплитудные частотные характеристики схемы адаптации для различных значений коэффициента k

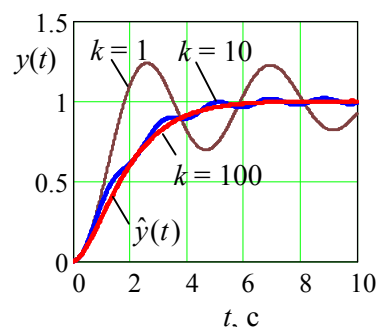


Рис. 3. Переходные характеристики схемы адаптации для различных значений коэффициента k

При значении $k = 100$ переходные характеристики схемы адаптации визуально совпадают с переходной характеристикой $\hat{y}(t)$ эталонной модели. Резонансный выброс в амплитудной частотной характеристике схемы не превышает значения (-20) дБ.

Таким образом, для объектов второго порядка рассматриваемая схема одноуровневой сигнальной адаптации может быть реализована со значениями коэффициента k обратной связи контура адаптации без ограничений по критерию устойчивости.

4) Объект третьего порядка.

Для объекта третьего порядка характеристический полином контура сигнальной адаптации для варианта без форсирования имеет вид:

$$|sE - B + NkA| = s^3 + c_2s^2 + c_1s + c_0 + b_0k. \quad (20)$$

Наиболее сильным условием реализации этого варианта является условие устойчивости. По критерию Гурвица для (20) получаем:

$$c_2c_1 > c_0 + b_0k. \quad (21)$$

Условие (21) для нестационарного объекта является практически невыполнимым не только в силу априорно неизвестного изменения его параметров c_2, c_1, c_0, b_0 , но и в силу принципиального противоречия с принципом работы рассматриваемой схемы сигнальной адаптации: повышение качества адаптации требует увеличения коэффициента k , но увеличение k затрудняет выполнение условия устойчивости (21).

Аналогичные трудности возникают и для вариантов объекта с форсированием.

Описанная ситуация в ряде случаев может быть смягчена тем обстоятельством, что в реальных объектах количество доминирующих корней характеристического полинома обычно невелико, и такого рода объекты можно рассматривать как динамические звенья второго и даже первого порядков.

Представленный анализ приводит к выводу о том, что для эффективного применения рассматриваемой схемы сигнальной адаптации необходимо из полного объекта высокого порядка физически выделить подобъекты первого и второго порядков, и для каждой из этих выделенных частей сформировать отдельную схему адаптации. Иными словами, устранить выявленную выше принципиальную ограниченность сигнальной адаптации можно, если использовать блочное представление объекта управления и построить соответствующую многоуровневую схему сигнальной адаптации для каждого блока с динамическим порядком не выше второго.

Структура такой схемы для объекта третьего порядка показана на рис. 4.

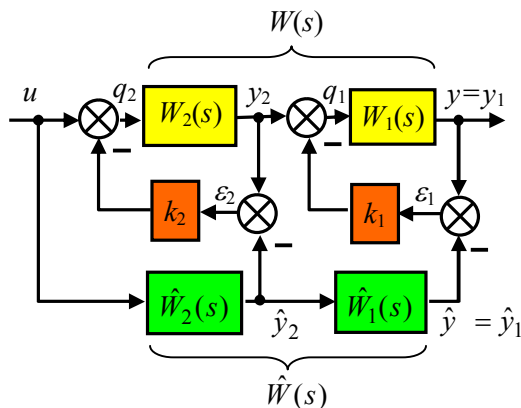


Рис. 4. Структурная схема системы двухуровневой сигнальной адаптации с явной эталонной моделью

На рис. 4 обозначены: $W_1(s)$, $W_2(s)$ – передаточные функции каскадов соответственно первого и второго порядков в объекте;

$\hat{W}_1(s)$, $\hat{W}_2(s)$ – аналогичные передаточные функции каскадов эталонной модели; k_1 , k_2 – коэффициенты контуров адаптации.

Передаточная функция $\tilde{W}(s)$ структуры на рис. 4 имеет вид:

$$\begin{aligned} \tilde{W}(s, k_1, k_2) &= \frac{y(s)}{u(s)} = \\ &= \frac{W(s)(k_2 \hat{W}_2(s) + 1)}{(1 + k_1 W_1(s))(1 + k_2 W_2(s))} + \\ &+ \frac{W_1(s) k_1 \hat{W}_1(s)}{1 + k_1 W_1(s)}. \end{aligned} \quad (22)$$

Очевидно, что:

$$\lim_{\substack{k_1 \rightarrow \infty \\ k_2 \rightarrow \infty}} \tilde{W}(s, k_1, k_2) = \hat{W}(s). \quad (23)$$

Существенно, что многоуровневая сигнальная адаптация не является тривиальным последовательным соединением одноуровневых каскадов, в этом случае происходило бы накопление ошибки адаптации в каждом каскаде.

Как следует из рис. 4, взаимосвязи между уровнями адаптации разделены на два канала: эталонный канал в каждом каскаде формирует эталонные управления $\hat{y}_2$ и затем $\hat{y}_1$ независимо от истинного состояния объекта, т.е. без ошибки. Поэтому ошибка ε_2 , содержащаяся в сигнале y_2 , войдет в сигнал q_1 , затем в ε_1 и будет компенсироваться вместе с собственной ошибкой первого уровня.

Уравнения движения младших уровней адаптации не могут быть описаны с помощью одной передаточной функции вида (16), а имеют вид, например, для рис. 4:

$$\begin{aligned} y(s, k_1) &= \frac{W_1(s)}{1 + k_1 W_1(s)} y_2(s) + \\ &+ \frac{W_1(s) k_1 \hat{W}_1(s)}{1 + k_1 W_1(s)} \hat{y}_2(s). \end{aligned} \quad (24)$$

С увеличением k_1 приходим к результату:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} y(s, k_1) = \hat{W}_1(s) \hat{y}_2(s), \quad (25)$$

который эквивалентен (17).

Представленная на рис. 4 схема двухуровневой сигнальной адаптации вследствие замыкания каждого каскада обратной связью, как уже отмечалось, не может содержать последовательно включённый интегратор. Поэтому схема рис. 4 не обладает свойствами астатизма, т.е. в ней всегда присутствует статическая ошибка между y и u .

Для устранения этой ошибки схему сигнальной адаптации следует охватить общей обратной связью, и включить в прямой канал системы пропорционально-интегральный (ПИ) или иной регулятор с интегрирующим звеном (см. пример ниже).

Числовой пример многоуровневой сигнальной адаптации

Для числового примера будем использовать объект третьего порядка, который может быть разделён на два каскада – первого и второго порядков, причём в общем случае каскад второго порядка имеет комплексные корни характеристического полинома:

$$W(s) = \frac{b_0^1}{s + c_0^1} \cdot \frac{b_0^2}{s^2 + c_1^2 s + c_0^2}. \quad (26)$$

Значения нестационарных параметров объекта представлены в таблице.

Варианты нестационарных параметров объекта

Вариант	c_0	c_1	c_2	b_0	c_0^1	b_0^1	c_0^2	c_1^2	b_0^2
v1	0,04	0,22	0,3	0,1	0,2	1	0,2	0,1	0,1
v2	2	2,2	10,2	1	10	1	0,2	0,2	1
v3	5	2	5,2	1	5	1	1	0,2	1

В качестве эталонной модели выберем два звена соответственно первого и второго порядков с монотонными переходными характеристиками и общим временем регулирования $t_p = 6,4$ с:

$$\hat{W}(s) = \frac{1}{s+1} \cdot \frac{1}{s^2 + 2s + 1}. \quad (27)$$

Переходные характеристики вариантов объекта и эталонной модели показаны на рис. 5 и демонстрируют существенные изменения свойств объекта при указанных в таблице изменениях параметров.

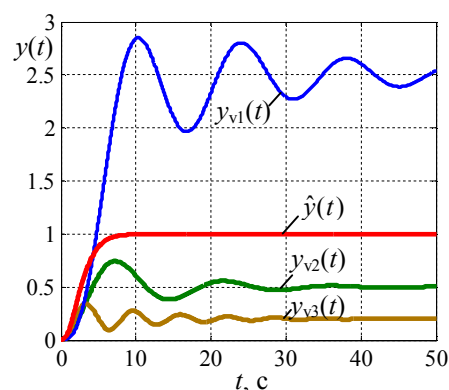


Рис. 5. Переходные характеристики вариантов объекта и эталонной модели

Реализуем схему двухуровневой сигнальной адаптации по рис. 4, в которой на основе проведенного выше анализа примем $k_1 = k_2 = 100$. Переходные процессы показаны на рис. 6.

Для наглядного сравнения на рис. 6 показан результат одноуровневой адаптации варианта v1 по схеме рис. 1. В этой схеме условие устойчивости (21) ограничивает коэффициент k варианта v1 критическим значением:

$$k < \frac{c_2 c_1 - c_0}{b_0} = \frac{0,3 \cdot 0,22 - 0,04}{0,1} = 0,26. \quad (28)$$

Для обеспечения запаса устойчивости в схеме одноуровневой адаптации выбрано значение $k = 0,15$.

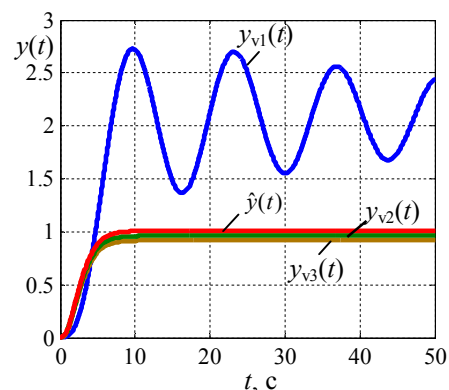


Рис. 6. Переходные характеристики для эталонной модели ($\hat{y}(t)$) и вариантов объекта в схемах одноуровневой ($y_{v1}(t)$) и двухуровневой ($y_{v2}(t)$, $y_{v3}(t)$) сигнальной адаптации

Рис. 6 подтверждает практическую непригодность одноуровневой адаптации для данного примера (этого следовало ожидать из-за чрезвычайно малого коэффициента $k = 0,15$), а так-

же иллюстрирует высокую эффективность двухуровневой схемы адаптации.

В то же время на рис. 6 видно теоретически предсказанное существование статической ошибки величин $y_{v2}(t)$ и $y_{v3}(t)$ относительно эталонного процесса $\hat{y}(t)$.

С целью устранения этой ошибки охватим схему двухконтурной адаптации общей отрицательной обратной связью, и введём в систему регулятор с интегрирующим звеном, рис. 7:

$$W_p(s) = \frac{10(s+1)^3}{s(0,01s+1)^2}. \quad (29)$$

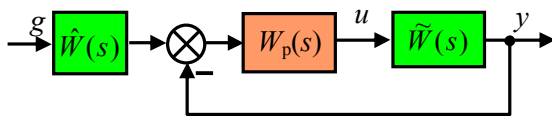


Рис. 7. Структурная схема астатической системы управления с сигнальной адаптацией

Переходные процессы в астатической системе управления показаны на рис. 8, и на доли процента отличаются от эталонного процесса для всех вариантов нестационарных параметров, указанных в таблице.

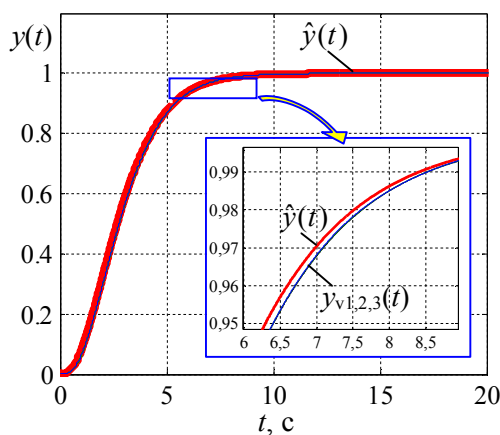


Рис. 8. Переходные процессы в полной системе управления с многоуровневой сигнальной адаптацией и дополнительным регулятором

Отметим, что время регулирования в полной системе управления соответствует заданному значению $t_p = 6,4$ с, см. рис. 8.

Заключение

Представленные в работе результаты исследования системы сигнальной адаптации с явной эталонной моделью позволяют сделать следующие выводы:

традиционно считающийся узким рабочий диапазон сигнальной адаптации может быть существенно расширен, если нестационарный объект управления структурно и физически представить в виде последовательно соединённых каскадов с доминирующим динамическим порядком каждого из них не выше второго;

указанное представление объекта позволяет реализовать многоуровневую схему сигнальной адаптации, представляющую собою иерархически подчинённое соединение одноуровневых схем с двумя параллельными каналами: канал с каскадами объекта и канал с соответствующими каскадами эталонной модели. Такая организация уровней адаптации исключает накопление ошибок адаптации каждого каскада;

разделение схемы адаптации на части низкого порядка принципиально устраняет противоречие между качеством схемы адаптации и её устойчивостью;

результаты моделирования подтверждают высокую эффективность предложенной схемы сигнальной адаптации и демонстрируют, тем самым, конструктивный характер использованной в основе данной работе эволюционной концепции многоальтернативности.

Литература

1. Дружинина М.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Методы адаптивного управления нелинейными объектами по выходу // Автоматика и телемеханика. 1996. №2. С. 3–33.
2. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления / под ред. Н.Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 744 с.
3. Нестеров С.А. Адаптивные системы управления. СПб.: Факультет технической кибернетики СПбГПУ, 2005. 90 с.
4. Бобцов А.А. Адаптивное и робастное управление неопределёнными системами по выходу. СПб.: Наука, 2011. 174 с.
5. Методы адаптивного и робастного управления нелинейными объектами в приборостроении / А.А. Бобцов, В.О. Никифоров, А.А. Пыркин, О.В. Слита, А.В. Ушаков. СПб.: Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2013. 277 с.
6. Гайдук А.Р., Плаксиенко Е.А. Адаптивные системы управления. Ростов-н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2018. 120 с.
7. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. М.: Юрайт, 2021. 441 с.
8. Annaswamy A.M., Fradkov A.L. A historical perspective of adaptive control and learning // Annual Reviews in Control. 2021. Vol. 52. P. 18–41.
9. Синтез адаптивной цифровой системы управления с заданным запасом устойчивости / В.С. Кудряшов, М.В. Алексеев, А.В. Иванов, О.А. Орловцева, И.В. Ивано-

ва // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 3. С. 42-50.

10. Глуценко А.И., Петров В.А., Ласточкин К.А. Адаптивная система управления с переменным коэффициентом усиления закона настройки на основе рекурсивного метода наименьших квадратов // Автоматика и телемеханика. 2021. № 4. С. 77-95.

11. Лысенко Д.С. Интеллектуальная система адаптации типовых законов автоматического регулирования с функцией идентификации структуры и параметров объекта // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2022. Т. 30. № 1 (73). С. 46-62.

12. Dogan K.M., Yucelen T., Muse J.A. Adaptive control systems with unstructured uncertainty and unmodelled dynamics: a relaxed stability condition // International Journal of Control. 2022. Vol. 95. No. 8. P. 2211-2224.

13. Кунинин П.Н., Романов А.Р. Системы с эталонной моделью и сигнальной адаптацией // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: тр. 4 Всерос. науч.-практ. конф./ под общ. ред. В.Ю. Островляничка. Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2010. С. 60-68.

14. Бакланов А.С., Вохрышев В.Е. Робастные самонастраивающиеся линейные и нелинейные системы управления динамическими объектами с сигнальной адаптацией // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16. № 6. С. 66-70.

15. Сигнально-адаптивная система управления асинхронным электроприводом / Е.С. Кучер, А.А. Блинов, Г.С. Сидоров, Н.С. Попов // Электротехника. 2022. № 5. С. 24-29.

16. Жмудь В.А. Адаптивные системы автоматического управления с единственным основным контуром // Автоматика и программная инженерия. 2014. № 2(8). С. 106-122.

17. Подвальный С.Л., Васильев Е.М. Концепция многоальтернативности в синергетической теории управления // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. междунар. науч. конф. «ММТТ-30». СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. Т. 7. С. 13-16.

18. Подвальный С.Л., Васильев Е.М. Гомеостатическое управление сложными системами на основе принци-

пов многоальтернативности // Современные сложные системы управления HTCS2018: сб. тр. XIII Междунар. науч.-практ. конф./под общ. ред. Ю.И. Еременко. Ст. Оскол: Изд-во Старооскольского технологического ин-та, 2018. С. 20-22.

19. Podvalny S., Vasiljev E. Multi-alternative control of large systems // MATEC Web of Conferences. "13th International Scientific-Technical Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings" - 2018". St. Petersburg. 2018. Vol. 161. 2003.

20. Подвальный С.Л., Васильев Е.М. Эволюционная концепция многоальтернативности и кибернетические принципы управления // Современные методы прикладной математики, теории управления и компьютерных технологий (ПМТУКТ-2018): сб. тр. XI междунар. конф. Воронеж: Изд-во «Научная книга», 2018. С. 196-199.

21. Podvalny S.L., Vasiljev E.M. Mathematical simulation and research of multilevel ecological system in crisis conditions // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: сб. тр. Междунар. науч. конф. Воронеж: Изд-во «Научно-исследовательские публикации», 2020. С. 528-532.

22. Борцов Ю.А., Поляхов Н.Д., Путов В.В. Электромеханические системы с адаптивным и модальным управлением. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1984. 216 с.

23. Абакумов А.М., Котенев В.И. Системы управления электромеханическими преобразователями и электро-технологическими установками. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. 182 с.

24. Тищенко А.К., Васильев Е.М., Тищенко А.О. Многоальтернативное управление критическими режимами системы электроснабжения космической станции // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т. 11. № 2. С. 101-106.

25. Podvalny S.L., Vasiljev E.M. Cascade technologies in digital signal processing // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: сб. тр. Междунар. науч. конф. Воронеж: Издательство «Научно-исследовательские публикации», 2019. С. 168-171.

Поступила 15.08.2022; принята к публикации 10.10.2022

Информация об авторах

Подвальный Семён Леонидович - д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: spodvalny@yandex.ru, тел. +7(473) 243-77-18

Васильев Евгений Михайлович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: vgtu-aits@yandex.ru, тел. +7(473) 243-77-20

MULTI-LEVEL SIGNAL ADAPTATION IN NON-STATIONARY CONTROL SYSTEMS

S.L. Podval'ny, E.M. Vasil'ev

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: here we considered the problem of constructing adaptive controllers for non-stationary automatic control systems. We note that the known signal adaptation schemes do not provide the desired quality of regulation in a wide range of changes in the parameters of the object. We suggested that this disadvantage can be eliminated if, to solve the problem, we use the principles of modularity and multi-level control, which together constitute the evolutionary concept of the multi-alternative structure and functioning of complex systems. To implement signal adaptation on the basis of these principles, we propose to divide the original high-order object into structural and physical elements of a low order. We show that if the dynamic complexity of each structural element of the object in terms of the number of dominant roots of the characteristic polynomial does

not exceed the second order, then for any selected element the simplest one-level signal adaptation subsystem with an explicit reference model can be implemented. Each such subsystem has significant amplitude and phase stability margins, which makes it possible to ensure high quality of adaptation in any of them. The structure of the control system is proposed, containing a multilevel signal adaptation circuit, which is a hierarchically subordinate connection of single-level circuits with two parallel channels: a channel with object cascades and a channel with the corresponding reference model cascades. Such an organization of a multilevel scheme excludes the sequential accumulation of adaptation errors in each stage. We studied a mathematical model of a multi-level signal adaptation scheme has been compiled, and its adaptive capabilities. We note that in order to ensure a zero steady-state error, it is advisable to cover the adaptation circuit with an additional deviation control loop with an integrator in the forward channel of the system. We present the results of numerical simulation of the proposed multi-level adaptation scheme in comparison with the traditional one-level scheme and confirmed the high efficiency of the multi-alternative approach to the control of non-stationary systems used in the work

Key words: non-stationary control systems, multi-alternative concept, multi-level principle, signal adaptation

References

1. Druzhinina M.V., Nikiforov V.O., Fradkov A.L. "Methods for adaptive output control of nonlinear objects", *Automation and Remote Control (Avtomatika i telemekhanika)*, 1996, no. 2, pp. 3–33.
2. Egupov N.D. (ed.) "Methods of robust, neuro-fuzzy and adaptive control" ("Metody robastnogo, neyro-nechetkogo i adaptivnogo upravleniya"), Moscow, N.E. Bauman MGTU, 2002, 744 p.
3. Nesterov S.A. "Adaptive control systems", (*Adaptivnye sistemy upravleniya*), St. Petersburg, SPbGPU, 2005, 90 p.
4. Bobtsov A.A. "Adaptive and robust control of uncertain systems by output", ("Adaptivnoe i robastnoe upravlenie neopredelonnymi sistemami po vykhodu"), St. Petersburg, Nauka, 2011, 174 p.
5. Bobtsov A.A., Nikiforov V.O., Pyrkin A.A., Slita O.V., Ushakov A.V. "Methods of adaptive and robust control of nonlinear objects in instrumentation", ("Metody adaptivnogo i robastnogo upravleniya nelineynymi ob"ektami v priborostroyenii"), St. Petersburg, 2013, 277 p.
6. Gayduk A.R., Plaksienko E.A. "Adaptive control systems", ("Adaptivnyye sistemy upravleniya"), YUFU, 2018, 120 p.
7. Kim D.P. "Theory of automatic control. Multidimensional, nonlinear, optimal and adaptive systems", ("Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. Mnogomernye, nelineynye, optimal'nye i adaptivnye sistemy"), Moscow, Yurayt, 2021, 441 p.
8. Annaswamy A.M., Fradkov A.L. "A historical perspective of adaptive control and learning", *Annual Reviews in Control*, 2021, vol. 52, pp. 18-41.
9. Kudryashov V.S., Alekseyev M.V., Ivanov A.V., Orlovtsseva O.A., Ivanova I.V. "Synthesis of an adaptive digital control system with a given stability margin", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2019, vol. 15, no 3, pp. 42-50.
10. Glushchenko A.I., Petrov V.A., Lastochkin K.A. "Adaptive control system with a variable gain of the tuning law based on the recursive method of least squares", *Automation and Remote Control, (Avtomatika i telemekhanika)*, 2021, no. 4, pp. 77-95.
11. Lysenko D.S. "Intelligent system of adaptation of typical automatic control laws with the function of identifying the structure and parameters of the object", *Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Engineering sciences (Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskiye nauki)*, 2022, vol. 30, no. 1 (73), pp. 46-62.
12. Dogan K.M., Yucelen T., Muse J.A. "Adaptive control systems with unstructured uncertainty and unmodelled dynamics: a relaxed stability condition", *International Journal of Control*, 2022, vol. 95, no. 8, pp. 2211-2224.
13. Kuminin P.N., Romanov A.R. "Systems with a reference model and signal adaptation", *Proc. of the Fourth All-Russian Scientific-Practical Conf.: Automated Electric Drive and Industrial Electronics. (Avtomatizirovanny elektropriivod i promyshlennaya elektronika)*, Novokuznetsk, SibGIU, 2010, pp. 60-68.
14. Baklanov A.S., Vokhryshev V.E. "Robust self-adjusting linear and non-linear control systems for dynamic objects with signal adaptation", *Bulletin of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk)*, 2014, vol. 16, no. 6, pp. 66-70.
15. Kucher E.S., Blinov A.A., Sidorov G.S., Popov N.S. "Signal-adaptive control system for asynchronous electric drive", *Electrical Engineering (Elektrotekhnika)*, 2022, no. 5, pp. 24-29.
16. Zhmud' V.A. "Adaptive automatic control systems with a single main circuit", *Automation and Software Engineering (Avtomatika i programmnaya inzheneriya)*, 2014, no. 2(8), pp. 106-122.
17. Podval'nyy S.L., Vasil'ev E.M. "The concept of multi-alternativeness in synergetic control theory", *Proc. of Int. Sci. Conf.: Mathematical Methods in Engineering and Technology: "MMTT-30" (Matematicheskkiye metody v tekhnike i tekhnologiyakh "MMTT-30")*, St. Petersburg, 2017, vol. 7, pp. 13-16.
18. Podval'nyy S.L., Vasil'ev E.M. "Homeostatic control of complex systems based on the principles of multi-alternativeness", *Proc. of the XIII International Scientific and Practical Conf.: Modern Complex Control Systems HTCS'2018, (Sovremennyye slozhnyye sistemy upravleniya HTCS'2018)*, Staryy Oskol, 2018, pp. 20-22.
19. Podval'nyy S., Vasil'ev E. "Multi-alternative control of large systems", *MATEC Web of Conferences, 13th International Scientific-Technical Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings" - 2018*, St. Petersburg, 2018, vol. 161, 2003.
20. Podval'nyy S.L., Vasil'ev E.M. "Evolutionary concept of multi-alternativeness and cybernetic principles of control", *Modern Methods of Applied Mathematics, Control Theory and Computer Technologies (PMTUKT-2018). Proc. of the XI Intern. conf. (Sovremennyye metody prikladnoy matematiki, teorii upravleniya i komp'yuternykh tekhnologiy (PMTUKT-2018))*, Voronezh, Nauchnaya kniga, 2018, pp. 196-199.
21. Podval'nyy S.L., Vasil'ev E.M. "Mathematical simulation and research of multilevel ecological system in crisis conditions", *Actual Problems of Applied Mathematics, Informatics and Mechanics (Aktual'nyye problemy prikladnoy matematiki, informatiki i mekhaniki)*, Voronezh, Nauchno-issledovatel'skie publikatsii, 2020, pp. 528-532.

22. Bortsov Yu.A., Polyakhov N.D., Putov V.V. "Electromechanical systems with adaptive and modal control", ("Elektromekhanicheskie sistemy s adaptivnym i modal'nyim upravleniem"), St. Petersburg, Energoatomizdat, 1984, 216 p.
23. Abakumov A.M., Kotenev V.I. "Control systems for electromechanical converters and electro-technological installations", ("Sistemy upravleniya elektromekhanicheskimi preobrazovatelyami i elektrotekhnologicheskimi ustanovkami"), Samara, 2013, 182 p.
24. Tishchenko A.K., Vasil'ev E.M., Tishchenko A.O. "Multi-alternative control of critical modes of the space station power supply system", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2015, vol. 11, no 2, pp. 101-106.
25. Podval'nyy S.L., Vasil'ev E.M. "Cascade technologies in digital signal processing", *Actual Problems of Applied Mathematics, Informatics and Mechanics (Aktual'nyye problemy prikladnoy matematiki, informatiki i mekhaniki)*, Voronezh, Nauchno-issledovatel'skie publikatsii, 2019, pp. 168-171.

Submitted 15.08.2022; revised 10.10.2022

Information about the authors

Semyen L. Podval'ny, Dr. Sci. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: spodvalny@yandex.ru, tel.: +7(473) 243-77-20

Evgeniy M. Vasil'ev, Cand. Sci. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: vgtu-aits@yandex.ru, tel.: +7(473) 243-77-20

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШАБЛОНА ДВИЖЕНИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ НА ТРЕНАЖЕРЕ**А.А. Сиухин, С.В. Карпушкин****Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Россия**

Аннотация: подготовка и тестирование специалистов горнодобывающей промышленности требует использования специальных устройств на базе беговых тренажеров. Тренажеры должны обеспечивать реалистичные условия передвижения в процессе тестирования, но наличие запаздывания реакции бегового тренажера препятствует своевременной реакции аппаратного обеспечения на действия пользователя. Несвоевременная реакция тренажера выводит пользователей из равновесия, особенно при использовании средств визуального сопровождения – шлемов виртуальной реальности. Описан принцип поиска и использования шаблонов движения пользователя для систем адаптивного управления тренажеров с камерами-наблюдателями, в основе которого – поиск закономерностей в последовательных кадрах от наблюдателей. Закономерности с одинаковым количеством кадров используются для формирования шаблона движения пользователя. Выбор кадров для шаблона осуществлялся по величине среднего модального значения, характеризующего изображение в кадре, поэтому шаблон движения пользователя собирается из кадров, ранее полученных от наблюдателей. Представлен шаблон движения пользователя, полученный в результате реализации описанных принципов. Использование представленного подхода требует внедрения модуля предварительного анализа кадров и не требует изменения конструкции тренажера с камерами-наблюдателями. Описаны перспективы использования найденного шаблона для решения задачи компенсации запаздывания реакции бегового тренажера

Ключевые слова: алгоритм, система управления, беговой тренажер, машинное зрение, компенсация запаздывания, шаблоны действий

Благодарности: исследование выполнялась в соответствии с проектом РФФИ «Разработка модели прогнозирования перемещения человека с использованием мультиагентной системы и цепей Маркова» («Аспиранты») договор № 20-37-90041\20 от 25.08.2020.

Введение

Подготовка и тестирование физического состояния специалистов горнодобывающей промышленности требует применения специальных тренажеров – устройств имитации физических нагрузок (УИФН). Подобные устройства создаются на основе беговых тренажеров и позволяют имитировать наклон местности и контролировать скорость движения бегового полотна.

Эксплуатируемые УИФН имеют схожую конструкцию: беговой тренажер – устройство, с которым взаимодействует пользователь; устройство управления, с которым взаимодействует оператор; наблюдатели – устройства для контроля положения пользователя на беговом тренажере. Часто подобные тренажеры используются с устройствами визуального сопровождения – шлемами и очками виртуальной реальности [1-5].

Наиболее перспективным направлением развития УИФН являются тренажеры с системами адаптивного управления (САУ)

скоростью бегового полотна. Угол наклона бегового полотна в таких тренажерах определяется согласно наклону местности в устройстве визуального сопровождения, а скорость бегового полотна должна изменяться согласно движению пользователя [6-7].

Адаптация скорости полотна к движению пользователя позволяет выявить отличительную особенность предметной области беговых тренажеров: пользователь создает внешнее воздействие, на основе которого САУ тренажера рассчитывает управляющее воздействие и задает его беговой платформе, которая создает реакцию на пользователя. Процесс управления беговым тренажером сводится к изменению реакции беговой платформы тренажера на внешнюю среду (т.е. на действия пользователя) [8-14].

Системный анализ предметной области

Системный анализ показал, что при использовании средств визуального сопровождения пользователей нельзя нагружать дополнительным навесным оборудованием, препятствующим свободе его движений, что ограничивает выбор наблюдателей, которые осуществляют сбор данных положения

пользователя.

УИФН, применяемые при подготовках и тестировании специалистов горнодобывающей промышленности, имеют размеры бегового полотна от 1.5 метров и сложную систему для обеспечения угла наклона, поэтому устанавливаются в отдельных специально оборудованных помещениях. Доступ к тренажеру в процессе подготовки имеет только пользователь.

Для решения задачи контроля пользователя без навесного оборудования на нем могут использоваться только два распространенных типа наблюдателей: ультразвуковой и камеры.

Принцип действия ультразвукового наблюдателя: в устройстве вывода датчика создается ультразвуковая волна, которая отражается от пользователя и должна попасть в устройство ввода датчика. По продолжительности цикла поиска волны определяется расстояние до объекта. Ультразвуковой датчик имеет ограниченную область определения от 0.3-1 метра, при выходе пользователя из этой области, датчик не может адекватно определять его положение. Также этот датчик восприимчив к материалу одежды пользователя – необходимо чтобы материал отражал достаточное количество звуковых волн [15, 16].

Принцип действия камер-наблюдателей: по кадрам в области определения специальное программное обеспечение определяет положение пользователя и скорость бегового полотна. Камеры позволяют визуально контролировать объекты. Область определения камер от 0.5-5 метров. В отличие от ультразвуковых датчиков, камеры требуют написание специального программного обеспечения для анализа кадров и поиска на них пользователя. Для определения положения пользователя в кадре используются наиболее простые приемы – использование формы пользователя цветом, отличающейся от фона [2, 5, 8-10, 12-14, 17].

Учитывая достаточную область определения камер, их использование более оправдано для обеспечения контроля положения пользователя на беговом полотне тренажера УИФН. Обеспечение отличия от фона в процессе подготовки обеспечивается простой подготовкой рабочего помещения, например, покраской стен в определенный цвет или установкой хромакея, а также равномерным освещением.

Камеры-наблюдатели передают в УИФН

кадры, на которых его САУ определяет положение пользователя путем сравнения реального кадра положения с кадром положения в состоянии покоя. САУ тренажера определяет пользователя по контрасту с окружающими объектами, далее определяется центр массы пользователя и в беговую платформу передается реакция для совмещения центра массы пользователя с заранее определенной точкой, скорость в которой равняется нулю (состояние покоя). Следовательно, управление скоростью бегового полотна эксплуатируемых тренажеров с камерами наблюдателями осуществляется только по кадрам, получаемым от наблюдателей.

Запаздывание реакции беговой платформы тренажера

Адаптация скорости беговой платформы тренажера требует анализа данных положения пользователя в реальном времени. Определение положения пользователя и расчет скорости бегового полотна приводит к запаздыванию реакций тренажера, которое негативно влияет на вестибулярный аппарат пользователя, препятствуя его естественному перемещению [2, 5, 12-17].

Запаздывание реакции тренажера — это промежуток времени от момента фиксации положения пользователя наблюдателем до приведения скорости тренажера в соответствующее значение. Решение задачи компенсации запаздывания реакции тренажера является актуальной задачей управления беговыми платформами тренажеров.

Результаты исследований, направленных на минимизацию запаздывания реакции тренажера представлены в таблице.

Результаты исследования запаздывания

Исследователь	Запаздывание реакции САУ, сек	Скорость пользователя до остановки, м/сек
Hedjazi N.	0.43-0.57	1.2
Lee H.	0.80	3.0
DeLuca A.	2.00	0.5
Pyo S.	2.00	2.5

Описанные работы направлены на минимизацию запаздывания реакции беговых платформ тренажеров путем оптимизации программного и аппаратного обеспечения. Минимальное достигнутое значение 0.43 сек недостаточно для естественного передвижения пользователя на беговой платформе. Корректировки скорости с запаздыванием

бегового полотна негативно влияют на вестибулярный аппарат тренируемого, что препятствует процессу подготовки [8, 10-12, 14].

Шаблоны движения пользователя на беговом тренажере

Ввиду того, что управление осуществляется по кадрам от наблюдателей, а пользователь осуществляет множество одинаковых действий в процессе тренировки необходимо определить шаблоны его действий в виде последовательности кадров от наблюдателей. Использование шаблонов позволит определить продолжительность траектории движения пользователя на несколько кадров вперед. Если продолжительность шаблона больше времени запаздывания реакции тренажера, то шаблон можно использовать для компенсации запаздывания: передавать в САУ тренажера кадры, соответствующие будущему положению пользователя согласно шаблону его действий. Шаблон состоит из кадров и определяется на основе данных, полученных на прошлых тренировках пользователя.

На основе представленной информации сформулирована *вербальная постановка задачи исследования*: необходимо определить шаблон движения пользователя в виде последовательности кадров с наблюдателей. Шаблон должен отражать движение пользователя на временном промежутке, превышающем запаздывания реакции тренажера.

Постановка задачи исследования

На основе изложенного материала разработано *математическая модель САУ тренажера*:

$$ACS = \{\{data_1, \dots\}, data_r, \Theta_0\} \rightarrow \{data_c, \dots\}, \quad (1)$$

где $\{data_1, \dots\}$ — множество ранее зафиксированных кадров пользователя с порядковым номером, полученных от наблюдателей; $data_r$ — кадр пользователя в реальном времени; Θ_0 — запаздывание реакции тренажера, измеренное датчиком - является постоянной величиной для каждого тренажера (согласно таблице, $\Theta_{\min} = 0.43$ с, $\Theta_{\max} = 2$ с); $\{data_c, \dots\}$ — последовательность кадров положения пользователя из шаблона, передаваемых в САУ вместо $data_r$.

На основе представленной информации сформулирована математическая постановка

задачи структурно-параметрического синтеза шаблона движения пользователя: используя множество ранее зафиксированных кадров положения пользователя $\{data_1, \dots\}$ сформировать шаблон его движения tr_i :

$$\begin{aligned} tr_i &= \{data_{i,1}, \dots\} \\ tr_i &\subseteq \{data_1, \dots\}, \end{aligned} \quad (2)$$

продолжительность tr_i должна превышать запаздывание реакции тренажера Θ_0 :

$$T(tr_i) > \Theta_0, \quad (3)$$

$$T(tr_i) = |tr_i| \quad (4)$$

Подготовка кадров

Кадры от наблюдателей передаются в виде массивов пикселей, размерность массива зависит от разрешения камеры, каждый пиксель является массивом из трех значений [R, G, B] и отражает цвет (рис. 1).



Рис. 1. Исходное изображение

Использование наблюдателей предполагает наличие различных физических дефектов — искажения линз, блики света и т.п., которые препятствуют анализу положения пользователя.

Для анализа кадра предлагается привести каждый кадр к единственному значению, характеризующему изображение на нем.

В исследовании использовались камеры наблюдатели с частотой передачи 30 кадров/с, которые передали в алгоритм поиска закономерностей видео, состоящее из 9000 кадров (рис. 1).

Первым этапом является удаление дефектов наблюдателей путем размытия изображений. Для этого используется стандартный метод Averaging из библиотеки анализа изображений OpenCV позволяющий убрать резкость изображений. Фильтр осуществляет вычисление нового значения пикселя в центре квадратной матрицы, учитывающее значение соседних

пикселей. Размеры квадратной матрицы заданы оператором вручную, и зависят от величины помех в кадрах.

Вторым этапом является приведение полученного изображения в черно-белый вид. Эта операция также осуществляется стандартными методами OpenCV, которые позволяют перевести изображение вначале в градации серого, потом в черно-белый вид. При переводе изменяется количество элементов в массивах, характеризующих пиксели: входной пиксель и после размытия $[R, G, B]$, где $R, G, B \in [0, 255]$; в градации серого $[Gray]$, $Gray \in [0, 255]$; в черно-белом формате $[BW]$, $BW \in [0, 1]$.

После второго этапа, полученное изображение содержит всего два цвета пикселей 0 (белый) и 1 (черный).

Третьим этапом является формирование шаблона-изображения фона. Фон в УИФН является стационарным, что позволяет использовать его изображение для исключения из анализа в кадрах (рис. 2).



Рис. 2. Шаблон фона

Четвертым этапом из полученного черно-белого изображения пользователя исключается шаблона-изображения фона (рис. 3).



Рис. 3. Результирующий кадр поиска пользователя

Оставшееся изображение отражает пользователя и некоторые дефекты, удаление которых требует более сложных и долгих операций, проведение которых не обязательно для решения поставленной задачи.

Анализ потока кадров

Для анализа кадров использовались характеристики – количество пикселей в результирующем кадре поиска пользователя. После поиска характеристик был получен график (рис. 4), на котором представлены точки характеристик: оригинальные – полученные на исходном изображении без размытия; после удаления дефектов – после размытия. Как видно, размытие позволило уменьшить количество черных пикселей, а также убрать значительное количество дефектов наблюдателей.

На рис. 5 представлен увеличенный фрагмент визуализации характеристики положения пользователя. На представленном графике видно определенные закономерности положения точек между точками максимума.

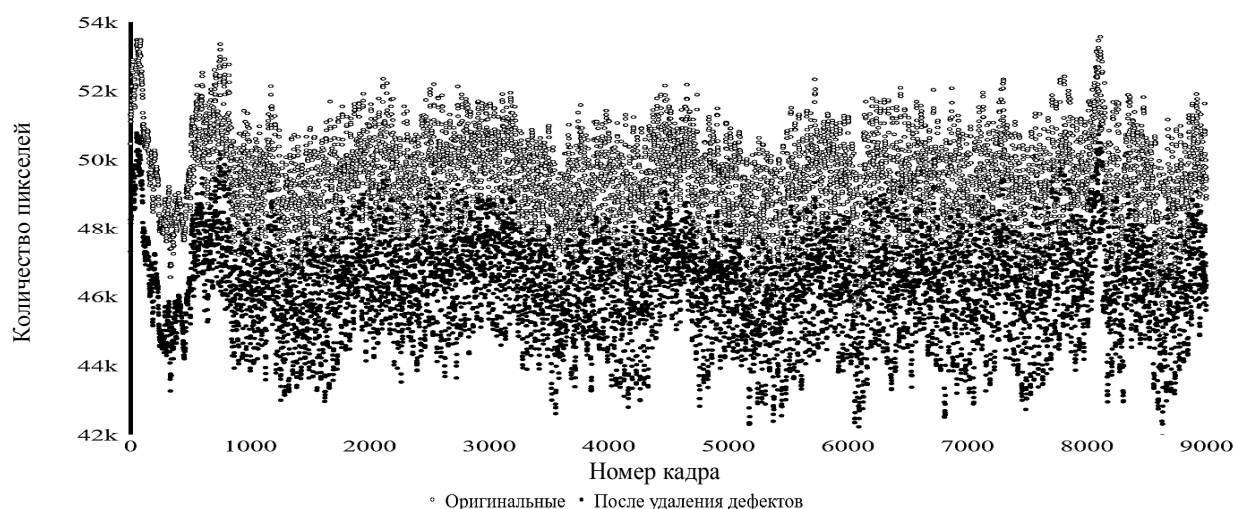


Рис. 4. Визуализация характеристик положения пользователя

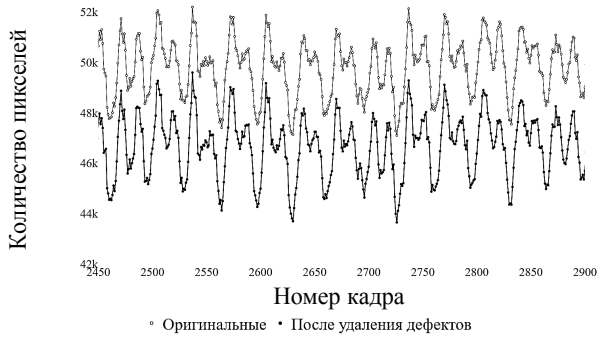


Рис. 5. Фрагмент визуализации характеристик положения пользователя

Закономерности p_n предполагают повторяющиеся последовательности одинакового количества кадров и имеющие незначительные различия в значениях характеристик:

$$p_n = \{data_{n,1}, data_{n,2}, \dots\}, \quad (5)$$

где $data_{n,1}$, $data_{n,2}$ — элементы n -й закономерности, выбранные на основе характеристик из множества ранее зафиксированных кадров положения пользователя $\{data_1, \dots\}$; если такие закономерности обнаружены, на их основе можно сформировать шаблон движения пользователя в виде последовательности кадров.

Для поиска значения характеристики, с которой начинаются закономерности k , предлагается:

- методом перебора всех значений определить значение k , которое является максимальным значением характеристики в закономерностях p_n на каждой итерации;
- определить продолжительность T кадров во фрагменте между ближайшими значениями k ;
- не учитывать закономерности, продолжительность которых меньше запаздывания реакции тренажера (3). Для расчета минимального количества кадров в закономерности использовалась формула:

$$T_{\min} = \Theta_0 \cdot v \text{ (кадров)}; \quad (6)$$

- определить количество закономерностей n одинаковой продолжительности;
- найти закономерности p_n , использующие как можно больше входных кадров, согласно формуле:

$$K = \frac{n \cdot T(p_n)}{T(\{data_1, \dots\})} \rightarrow \max; \quad (7)$$

- из кадров закономерности, удовлетворяющей условию (6), сформировать шаблон движения пользователя.

Определение шаблона движения пользователя

В ходе исследования были также использованы ограничения: $n > 1$ — если алгоритм определил все входные данные как одну закономерность, что ошибочно, она исключалась, определяется следующее k ; в качестве величины запаздывания реакции тренажера использовались данные, полученные в результате системного анализа $\Theta_0 = \Theta_{\min} = 0.43 \text{ с} \rightarrow T_{\min} = 13 \text{ кадров}$.

В результате поиска последовательностей, при значении $k = 47\,987$ пикселей, была найдена 21 закономерность, продолжительностью $T = 29$ кадров каждая (рис. 6 столбцы «Зак. 1-21») с значением $K = 0.79 \%$.

Ввиду того, что каждому значению характеристики соответствует не просто число, а кадр от наблюдателя, значения характеристик в шаблон движения пользователя выбирается из имеющихся кадров. Для решения поставленной задачи выбран первый кадр, соответствующий среднему модальному значению в каждом последовательном кадре закономерностей одинаковой продолжительности с максимальным K :

$$|data_{i,b}| = \text{moda}(|data_{1,b}|, \dots, |data_{n,b}|), \quad (8)$$

где b — номер кадра.

В результате был получен шаблон движения пользователя продолжительностью $T = 29$ кадров (рис. 6 столбец «Шаблон»).

Учитывая разброс значений характеристик каждого кадра в закономерности, кадры, которые будут получены от наблюдателей в процессе тестирования пользователей, необходимо сравнивать не с единственным значением использованном в шаблоне, а с областью значений в каждом кадре (рис. 6 столбец «Область значений»). Область значений представляет промежуток между минимальным и максимальным значениями закономерностей p_n , полученными в каждом кадре.

№	Зак. №1	Зак. №2	Зак. №3	...	Зак. №21	Шаблон	Область значений
1	46981	47399	47005	...	47907	46927	[46927, 47952]
2	45992	46324	46146	...	47460	45992	[45992, 47817]
3	46106	46524	46063	...	46477	46063	[46063, 47808]
4	46428	46240	45990	...	46319	45990	[45990, 47644]
5	46769	46210	45714	...	45769	45714	[45714, 47906]
6	46624	45798	45636	...	45687	45636	[45636, 47897]
7	46584	45922	45870	...	45787	45787	[45787, 47658]
8	46117	45898	46296	...	45834	46117	[45834, 47666]
9	45990	46239	46445	...	45295	45295	[45295, 47583]
10	45716	46511	46812	...	45153	45153	[45153, 47684]
11	45501	47046	46880	...	45480	45480	[45480, 47964]
12	45857	47454	47669	...	46581	45857	[45857, 47723]
13	46991	47318	47200	...	46921	46184	[46184, 47862]
14	46981	47782	47204	...	46955	46981	[46955, 47978]
15	47138	47675	46479	...	47083	45861	[45861, 47881]
16	47040	47434	46517	...	46884	45543	[45543, 47889]
17	46492	47454	45993	...	46102	44878	[44878, 47494]
18	46510	47178	45266	...	46207	43814	[43814, 47178]
19	46604	46307	45074	...	45095	43829	[43829, 46978]
20	46325	45594	44797	...	43820	43820	[43820, 46578]
21	45165	45333	44502	...	44043	43909	[43909, 46268]
22	44680	45177	44292	...	43591	43591	[43591, 46051]
23	44939	44953	44236	...	43610	43610	[43610, 45967]
24	44521	45368	44965	...	43739	43739	[43739, 46065]
25	44629	45655	45325	...	43957	43957	[43957, 46387]
26	45105	46175	45940	...	44399	44399	[44399, 47082]
27	45926	46979	46900	...	44955	44955	[44955, 47599]
28	46877	47477	47070	...	46089	45738	[45738, 47856]
29	47557	47675	47787	...	47077	46339	[46339, 47928]

Рис. 6. Результат поиска закономерностей и траектории

Из множества ранее зафиксированных кадров положения пользователя $\{data_1, \dots\}$ (которые также использованы при формировании закономерностей p_n) в шаблон движения пользователя выбирается кадр с найденным значением характеристики, а также полученная область значений. Полученный шаблон движения пользователя имеет вид:

$$tr_i = \{\{data_{i,1}, [46927, 47952]\}, \dots, \{data_{i,29}, [46339, 47928]\}\} \\ data_{i,1}, \dots, data_{i,29} \in \{data_1, \dots\} \quad (9)$$

где $data_{i,1}$ – кадр, выбранный из множества $\{data_1, \dots\}$ в палитре [R, G, B], $|data_{i,1}| = 46927$, остальные аналогично.

Найденный шаблон движения пользователя (9) добавляется в базу данных для последующего использования при подготовках и тестированиях пользователя.

Перспективы исследования

Использование шаблонов движения пользователя при тестировании позволяет компенсировать запаздывание САУ тренажера: полученный от наблюдателя кадр пользователя в реальном времени $data_r$ сравнивается со значениями первой области определений каждого найденного шаблона движения пользователя, если обнаружено совпадение, то следующий кадр сравнивается со следующей областью значений. Не соответствующие

шаблоны исключаются из сравнения (но остаются в базе данных). Процесс сравнения повторяется, пока входные кадры не будут соответствовать единственному шаблону движения пользователя. Далее, т.к. шаблон содержит кадры, отражающие движение пользователя на некотором промежутке времени, это дает возможность передавать в САУ тренажера кадры будущего положения пользователя, что позволит САУ тренажера своевременно приводить его аппаратное обеспечение к необходимым параметрам (например, своевременно изменять скорость бегового полотна). Передача будущего кадра пользователя из шаблона вместо его реального кадра позволит минимизировать запаздывание реакции тренажера.

Методы исследования

При решении задачи были использованы методы системного анализа, математического моделирования, теории множеств. Достоверность полученных результатов основана на экспериментальных данных.

Заключение

В представленной работе:

1. Впервые предложена математическая постановка задачи структурно-параметрического синтеза шаблона движения пользователя, описывающего движение пользователя на промежуток времени, превышающий запаздывание реакции тренажера;

2. Описан алгоритм формирования шаблона движения пользователя на беговой платформе тренажера с наблюдателями, в основе которого 21 закономерность, найденная в собранных ранее данных;

3. Представлен критерий, позволяющий оценить соответствие найденного шаблона движения пользователя, исходным данным, использованным для его формирования;

4. Представлены результаты тестирования программной реализации поиска шаблона движения пользователя.

Литература

1. Schofield D. The use of virtual simulators for emergency response training in the mining industry // Journal of Emergency Management. 2010. Т. 8. № 2. Р. 45-56.
2. Minetti A. A feedback-controlled treadmill (treadmill-on-demand) and the spontaneous speed of walking and running in humans // Journal of Applied Physiology. 2003. Т. 95. № 2. Р. 838-843.
3. Iwata H. Walking about virtual environments on an

infinite floor // Proceedings IEEE Virtual Reality – IEEE. 1999. P. 286-293.

4. Iwata H., Fujii T. Virtual perambulator: a novel interface device for locomotion in virtual environment // Proceedings of the IEEE 1996 Virtual Reality Annual International Symposium. IEEE. 1996. P. 60-65.

5. Souman J.L. CyberWalk: Enabling unconstrained omnidirectional walking through virtual environments // ACM Transactions on Applied Perception (TAP). 2008. Vol. 8. № 4. P. 1-22.

6. Von Zitzewitz J., Bernhardt M., Riemer R. A novel method for automatic treadmill speed adaptation // IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering. 2007. Vol. 15. № 3. P. 401-409.

7. Kikuchi T., Sakai K., Ishiya K. Gait Analysis with Automatic Speed-Controlled Treadmill // Journal of Robotics and Mechatronics. 2015. Vol. 27. № 5. P. 528-534.

8. Hedjazi N. An omnidirectional platform design: application to posture analysis // XIV Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering and Computing 2016. Springer, Cham, 2016. P. 602-607.

9. Schwaiger M.C., Thummel T., Ulbrich H. 2d-motion platform: The cybercarpet // Second Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (WHC'07). IEEE, 2007. P. 415-420.

10. Pyo S.H. Development of an fast-omnidirectional treadmill (f-odt) for immersive locomotion interface // 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation

(ICRA). IEEE, 2018. p. 760-766.

11. Pyo S.H., Lee H., Yoon J. Development of a novel omnidirectional treadmill-based locomotion interface device with running capability // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. № 9. P. 4223.

12. Lee H. Design of the omni directional treadmill based on an omni-pulley mechanism // 2016 13th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI). IEEE, 2016. P. 889-894.

13. Souman J.L. Making virtual walking real: Perceptual evaluation of a new treadmill control algorithm // ACM Transactions on Applied Perception (TAP). 2010. Vol. 7. № 2. P. 1-14.

14. De Luca A. Motion control of the cybercarpet platform // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2012. P. 410-427.

15. Yoon J., Manurung A., Kim G.S. Impedance control of a small treadmill with sonar sensors for automatic speed adaptation // International Journal of Control, Automation and Systems. 2014. Vol. 12. № 6. P. 1323-1335.

16. Auralius M., Yoon J.W. An automatic speed control system of a treadmill with ultrasonic sensors // Journal of Institute of Control, Robotics and Systems. 2011. Vol. 17. № 5. P. 505-511.

17. De Luca A. Control design and experimental evaluation of the 2D CyberWalk platform // 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2009. P. 5051-5058.

Поступила 05.09.2022; принята к публикации 17.10.2022

Информация об авторах

Сиухин Александр Андреевич – аспирант кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», Тамбовский государственный технический университет (392000, Россия, г. Тамбов, ул. Советская 106), e-mail: mr.Siuhin@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2810-8932>

Карпушкин Сергей Викторович – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», Тамбовский государственный технический университет (392000, Россия г. Тамбов, ул. Советская 106), e-mail: Karpushkin.sv@mail.tstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6886-0646>

DETERMINING THE USER'S MOVEMENT PATTERN ON A SIMULATOR

A.A. Siukhin, S.V. Karpushkin

Tambov State Technical University, Tambov, Russia

Abstract: training and testing of mining industry specialists require the use of special devices based on running simulators. Simulators should provide realistic conditions of movement during testing, but the presence of a delay in the reaction of the running simulator prevents the timely response of the hardware to the user's actions. The untimely reaction of the simulator throws users off balance, especially when using visual aids – virtual reality helmets. The paper describes the principle of searching and using user's movement patterns for adaptive control systems of simulators with observer cameras, which is based on the search for patterns in successive frames from observers. Patterns with the same number of frames are used to form the user's movement pattern. The choice of frames for the template was carried out by the value of the average modal value characterizing the image in the frame, so the user's movement pattern is collected from frames previously received from observers. The paper presents a user movement pattern obtained as a result of the implementation of the described principles. The use of the presented approach requires the introduction of a preliminary frame analysis module and does not require changes in the design of the simulator with observation cameras. The prospects for using the found template for solving the problem of compensating for the reaction delay of a running simulator are described

Key words: algorithm, control system, running simulator, machine vision, delay compensation, action patterns

Acknowledgements: the study was carried out in accordance with the RFBR project "Development of a model for predicting human movement using a multi-agent system and Markov chains" ("Graduate students") contract No. 20-37-90041\20 dated 08.25.2020.

References

1. Schofield D. "The use of virtual simulators for emergency response training in the mining industry", *Journal of Emergency Management*, 2010, vol. 8, no. 2, pp. 45-56.
2. Minetti A. "A feedback-controlled treadmill (treadmill-on-demand) and the spontaneous speed of walking and running in humans", *Journal of Applied Physiology*, 2003, vol. 95, no. 2, pp. 838-843.
3. Iwata H. "Walking about virtual environments on an infinite floor", *Proc. of IEEE Virtual Reality – IEEE*, 1999, pp. 286-293.
4. Iwata H., Fujii T. "Virtual perambulator: a novel interface device for locomotion in virtual environment", *Proc. of the IEEE 1996 Virtual Reality Annual International Symposium – IEEE*, 1996, pp. 60-65.
5. Souman J.L. "CyberWalk: Enabling unconstrained omnidirectional walking through virtual environments", *ACM Transactions on Applied Perception (TAP)*, 2008, vol. 8, no. 4, pp. 1-22.
6. Von Zitzewitz J., Bernhardt M., Riener R. "A novel method for automatic treadmill speed adaptation", *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2007, vol. 15, no. 3, pp. 401-409.
7. Kikuchi T., Sakai K., Ishiya K. "Gait analysis with automatic speed-controlled treadmill", *Journal of Robotics and Mechatronics*, 2015, vol. 27, no. 5, pp. 528-534.
8. Hedjazi N. "An omnidirectional platform design: application to posture analysis", *XIV Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering and Computing 2016*, Springer, Cham, 2016, pp. 602-607.
9. Schwaiger M.C., Thummel T., Ulbrich H. "2d-motion platform: The cybercarpet", *Second Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (WHC'07). IEEE*, 2007, pp. 415-420.
10. Pyo S.H. "Development of a fast-omnidirectional treadmill (f-odt) for immersive locomotion interface", *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE*, 2018, pp. 760-766.
11. Pyo S.H., Lee H., Yoon J. "Development of a novel omnidirectional treadmill-based locomotion interface device with running capability", *Applied Sciences*, 2021, vol. 11, no. 9, pp. 4223.
12. Lee H. "Design of the omni directional treadmill based on an omni-pulley mechanism", *2016 13th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI). IEEE*, 2016, pp. 889-894.
13. Souman J.L. "Making virtual walking real: Perceptual evaluation of a new treadmill control algorithm", *ACM Transactions on Applied Perception (TAP)*, 2010, vol. 7, no. 2, pp. 1-14.
14. De Luca A. "Motion control of the cybercarpet platform", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2012, pp. 410-427.
15. Yoon J., Manurung A., Kim G.S. "Impedance control of a small treadmill with sonar sensors for automatic speed adaptation", *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2014, vol. 12, no. 6, pp. 1323-1335.
16. Auralius M., Yoon J.W. "An automatic speed control system of a treadmill with ultrasonic sensors", *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, 2011, vol. 17, no. 5, pp. 505-511.
17. De Luca A. "Control design and experimental evaluation of the 2D CyberWalk platform", *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE*, 2009, pp. 5051-5058.

Submitted 05.09.2022; revised 17.10.2022

Information about the authors

Aleksandr A. Siukhin, graduate student, Tambov State Technical University (106 Sovetskaya Str., Tambov 392000, Russia), e-mail: mr.Siuhin@yandex.ru, orcid.org/0000-0002-2810-8932

Sergey V. Karpushkin, Dr. Sci. (Technical), Professor, Tambov State Technical University (106 Sovetskaya Str., Tambov 392000, Russia), e-mail: Karpushkin.sv@mail.tstu.ru, orcid.org/0000-0001-6886-0646

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДАЛЬНОСТИ ДЕЙСТВИЯ ИНФРАКРАСНЫХ СКАНИРУЮЩИХ СИСТЕМ ПАССИВНОГО ТИПА**Д.А. Смирнов¹, А.М. Делендик¹, А.В. Николенко², С.Ю. Вахмин², К.В. Николенко³****¹Войсковая часть 15650, г. Ахтубинск, Россия****²Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия****³Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

Аннотация: представлена и раскрывается расчётно-экспериментальная методика дальности инфракрасных сканирующих систем пассивного типа, входящая в состав системы технического зрения. Необходимо отметить, что под системой технического зрения понимается комплекс бортового оборудования, предназначенного для обзора при последовательном сканировании подстилающей земной поверхности, которую можно представить состоящей из специальных компонентов, угловая величина которых в равной степени подобна краткостному углу ракурса системы технического зрения. В отдельных случаях в краткостном участке зрения обнаруживается целевой ориентир, при этом мультиконтроллер микроэлектронной схемы выдаёт кратковременный командный импульс, который оказывает влияние на компоненты структуры электрической схемы с переключением регламента поиска цели на регламент захвата целевого ориентира и автоматического его непрерывного сопровождения. Предельная дальность, на которой должна быть выявлена цель с конкретной вероятностью, обуславливается числовым отношением: сигнал/шум. Также регистрируется энергия сопровождаемого сигнала цели при обнаружении целевого ориентира на предельной дальности с заданными величинами и характеристиками. Необходимо определить так называемый параметр обнаружения. Он определяется по кривым обнаружения исходя из заданных значений показателей качества обнаружения – вероятности правильного обнаружения и вероятности ложной тревоги

Ключевые слова: методика расчёта дальности, расчётно-экспериментальный метод, система технического зрения, инфракрасные сканирующие системы, пассивные системы, распознавание и обнаружение объектов интереса

Введение

Величина обследуемой местности зависит в основном от дальности обнаружения объектов, а возможности по обнаружению и распознаванию – от разрешающей способности системы.

Выявление и распознавание подвижных целей на фоновом режиме значительных по величине пассивных помех разного рода образования (реминисценции от подстилающей земной плоскости, метеообразований, дипольных облаков и других помеховых образований) считается одной из самой важной проблемной ситуацией в работе распространённых на сегодняшний день оптико-электронных технических средств. Если в любом из популярных интернет-поисков ввести запрос с ключевыми словами «система технического зрения», то основная масса источников существенно объединена с обработкой и анализом изображений в задачах машинного времени.

Оптико-электронная система (ОЭС) аппаратуры разрабатываемой системы технического зрения (СТЗ) состоит из объектива и фотоприёмника и предназначена для преобразования потока лучистой энергии ИК-диапазона от зоны наблюдения, попадающего на входной электрический сигнал изображения зоны наблюдения, находящейся в поле зрения объектива.

Установлено, что в типичной конфигурации базификация системы технического зрения имеет в своём составе соответствующие конечные стадии [1,2]: формирование, предварительную обработку, сегментацию, описание и анализ изображения. Описание и исследования создания корреляционно-экстремальных систем препровождают к модели алгоритма корреляционного сопоставления черно-белых и цветных символизаций разного рода величин [3,4,5,6].

Возможность выявления объектов определяется разрешением на местности ОЭС и размерами объекта, а также контрастом объекта относительно фона и отношением сигнал/шум (С/Ш).

В настоящее время широкое распространение получил критерий видения [7,8,9,10] или «критерий Джонсона». Этот критерий легко поддается аналитической оценке на математических моделях и допускает экспериментальную проверку в натуральных условиях работы системы, причём отличие между расчётными и экспериментальными данными не превышает 10%. Критерий видения, сформулированный Джонсоном, устанавливает четыре типа задач (степени классификации объектов), которые может решать оператор: обнаружение, определение ориентаций, распознавание и идентификация объектов. Эти задачи характеризуют уровни дискриминации объекта. Основываясь на естественном предположении, что степень детальности изображения объекта пропорциональна уровню дискриминации, Джонсон связал уровень видения реального объекта с обнаружением простых периодических структур, согласующихся с формой объекта – эквивалентных штриховых мир (ЭШМ), или мир Джонсона. Под эквивалентной штриховой мирой понимают штриховую периодическую мир прямоугольной формы, N полупериодов которой равны по величине «критическому» размеру объектов. На основе экспериментальных исследований по обнаружению транспортных средств Джонсон поставил в соответствие каждому уровню видения часто разрешаемых полупериодов ЭШМ и вероятность этих событий.

В литературе [8,11] показано, что для обнаружения оператором объекта с заданной вероятностью отношение С/Ш должно быть не менее 10 раз, для осуществления обнаружения объекта по эталонной информации – не менее 8 раз, а для работы автомата сопровождения – не менее 4 раз.

Методика расчёта дальности действия сканирующих систем пассивного типа

Область видимости при пошаговом автосканировании допускается обрисовать состоящей из частных компонентов, угловые границы которых равны мгновенному углу зрения СТЗ [12].

Угол обзора системы – это угол в плоскости, перпендикулярной направлению полёта, в пределах которого воспроизводится изображение местности. Угол обзора определяет поперечную ширину захвата местности в долях высоты.

В отдельных случаях в краткостном участке зрения обнаруживается целевой ориен-

тир, при этом мультиконтроллер микроэлектронной схемы выдаёт кратковременный командный импульс, который оказывает влияние на компоненты структуры электрической схемы с переключением регламента поиска цели на регламент захвата целевого ориентира и автоматического его непрерывного сопровождения.

Предельная дальность, на которой должна быть выявлена цель с конкретной вероятностью, обуславливается числовым отношением: сигнал/шум.

В теоретическом труде [3] приводится усложняющее числовое выражение для отношения напряжения функционирующего сигнала U_c к среднеквадратичному напряжению шумов $\overline{U_{ш}^2}$ (для случая, когда шумы структуры формулируются главным образом шумами приёмника лучистой энергии):

$$\frac{U_c}{\overline{U_{ш}^2}} = \frac{\pi \tau I}{2D^2} \frac{n \sin \vartheta d_{об}}{F_{пор}} \left(\frac{\psi r}{\dot{\Omega}} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

где τ – коэффициент оптической передачи, учитывающий пропускание атмосферы и пропускание элементов оптической системы; I – сила излучения цели в диапазоне длин волн, соответствующих спектральному диапазону чувствительности приёмника лучистой энергии, Вт/стер; D – расстояние между целью и приёмником, см; n – показатель преломления среды лучистой энергии, окружающей приёмник; ϑ – угол поля зрения оптической системы; $d_{об}$ – диаметр входного отверстия оптической системы, см; $r = \dot{\Omega} / \omega$; Ω – угол обзора; ω – мгновенный угол зрения прибора; $F_{пор} = F_{пор}^* \sqrt{q_n} \sqrt{\Delta f}$ – пороговый лучистый поток приёмника;

$$\dot{\Omega} = \frac{\Omega}{T}; \quad (2)$$

ψ – коэффициент различимости, определяемый из соотношения

$$\psi = \frac{U_{пик}^2}{U_{уст}^2 t_u \Delta f}; \quad (3)$$

$U_{пик}$ – пиковое значение выходного сигнала; $U_{уст}$ – установившееся значение выходного сигнала; Δf – ширина полосы пропускания электронной схемы; t_u – длительность импульса, равная времени нахождения цели в мгновенном поле зрения; T – время просмотра угла обзора.

Коэффициент различимости ψ зависит от параметров оптимального противомехового фильтра [13], в задачу которого входит получение максимального отношения U_c / U_u^2 при условии приемлемой точности воспроизведения формы выходного импульсного сигнала (1).

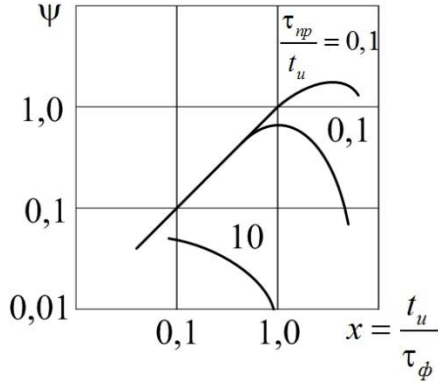


Рис. 1. Зависимость коэффициента различимости для системы фильтр-приёмник лучистой энергии

Обычно фильтр описывается уравнением

$$\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{\sqrt{1 + (2\pi\tau_{\phi}f)^2}}{1 + (2\pi\tau_{\phi}f)^2}, \quad (4)$$

где $\tau_{\text{нр}}$ – постоянная времени приёмника лучистой энергии; τ_{ϕ} – постоянная времени фильтра.

Если постоянная времени приёмника лучистой энергии мала по сравнению с длительностью импульса, то коэффициент различимости принимает максимальное значение при $t_u / \tau_{\phi} = 3$, т.е. когда постоянная времени фильтра составляет 1/3 от длительности импульса. Такой выбор τ_{ϕ} обеспечивает хорошее воспроизведение импульса. При $\tau_{\text{нр}} = 0,1t_u$ это условие ещё сохраняется. Если $\tau_{\text{нр}} / t_u$ велико, то величину ψ невозможно максимизировать путём изменения τ_{ϕ} , поддерживая в то же время должную разрешающую способность фильтра.

Из формулы (2) может быть получено выражение для идеализированной дальности D_0 , т.е. дальности, при которой отношение сигнала к среднеквадратичному напряжению шумов равно единице [14]:

$$D_0 = \frac{\pi n \sin \vartheta d_{\text{об}}}{2F_{\text{нор}}} \left(\frac{\Psi r}{\dot{\Omega}} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (5)$$

Аналогичная формула приводится в работе [3] для случая, когда преобладающим ис-

точником шумов являются флуктуации излучения фона.

В этом случае

$$\frac{U_c}{U_u^2} = \tau_a I \frac{\Psi^5}{D^2 \sqrt{S_B \omega}}, \quad (6)$$

где τ_a – коэффициент пропускания атмосферы (пропускание оптической системы не учитывается, так как сигнал и шум подвергаются одинаковому воздействию); S_B – спектральная плоскость шумов лучистости (энергетической яркости) фона; ω – мгновенный угол зрения системы; Ψ – коэффициент различимости, который для прямоугольного поля обзора, прямоугольного импульса сигнала и электронного противомехового фильтра, описываемого уравнением (4), подсчитывается по формуле

$$\Psi = \frac{2x(e^2 - 1) \exp\left(-\frac{2xe^x}{e^x - 1}\right)}{x - \frac{3}{2} + \frac{1}{2}(x + 3)e^{-x}}, \quad (7)$$

где $x = \frac{t_u}{\tau_{\phi}}$.

График $\Psi(x)$ изображён на рис. 2, на котором показано, что в случае $\tau_{\phi} > t_u$ числовое выражение U_c / U_u^2 выходит низкого качества; в случае $\tau_{\phi} = t_u / 6$ это числовое выражение получает максимальный результат.

Эстетизированная дальность реализации СТЗ D_0 в наблюдающемся эпизоде зависит от новых переменных и равна:

$$D_0 = \left(\tau I \sqrt{2S_B} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\Psi}{\omega} \right)^{\frac{1}{4}}. \quad (8)$$

Определим теперь дальность, на которой цель может быть обнаружена с заданной вероятностью, при условии наличия в поле зрения также ложных целей.

Напряжение шума, вызванного внутренними шумами канала преобразования и усиления информации, внешними шумами, обусловленными неравномерностью лучистого фона, характеризуется вероятностью достижения им определенного значения. Обычно считается, что плотность вероятности подчиняется нормальному закону распределения, или закону Гаусса.

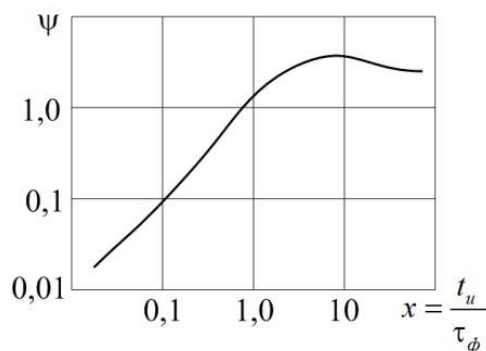


Рис. 2. Зависимость коэффициента $\Psi(x)$ различимости для противополевого фильтра

Если задаться каким-либо значением напряжения шума $U_{ш} = U^*$, то площадь, расположенная под кривой $F(U_{ш})$ слева от ординаты, проходящей через точку U^* , определяет вероятность того, что значения $U_{ш}$ будут меньше U^* , а площадь справа от координаты, проходящей через точку U^* , – вероятность того, что значения $U_{ш}$ будут больше U^* .

Вероятность того, что за время t_u напряжение шума превысит заданную величину U^* , определяется выражением

$$P_1 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{U^*/\bar{U}_{ш}}^{\infty} e^{-\frac{z^2}{2}} dz = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} e^{-\frac{z^2}{2}} dz - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{U^*/\bar{U}_{ш}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz = 0,5 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{U^*/\bar{U}_{ш}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz. \quad (9)$$

Вероятность того, что за время просмотра всего поля зрения напряжение шума будет меньше U^* , равна

$$P_2 = (1 - P_1)^r, \quad (10)$$

$$\text{где } r = \frac{\Omega}{\omega}.$$

Так как в сканирующих устройствах $r \geq 1$, то

$$P_1 \approx \frac{1}{r} \ln \frac{1}{P_2}. \quad (11)$$

Задаваясь значением вероятности P_2 , можно вычислить величину P_1 , а затем найти отношение $U^*/\bar{U}_{ш}$ и U^* , при котором с установленной вероятностью напряжение шума не превзойдёт величину U^* за промежуток времени обзора.

Вероятность того, что совокупное напряжение сигнала и шума превзойдёт значение U^* , равняется:

$$P_3 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{U^*}{\bar{U}_{ш}} - \frac{U_c}{\bar{U}_{ш}}}^{\infty} e^{-\frac{z^2}{2}} dz. \quad (12)$$

Определим вероятность обнаружения отдельной цели на разных дистанциях при разном количестве компонентов поля обзора. Предопределяемся вероятностью того, что за промежуток времени обзора поля зрения в целом не возникнет напряжение шума, превосходящее величину U^* , $P_2 = 0,5$, $I = 0,8$ (вероятность непоявления фальшивого сигнала). Таким образом, в конгруэнтности с выражением (11) приобретём $P_1 = \frac{0,693}{r}$.

По таблицам величин интеграла вероятности [16] определим значение $U^*/\bar{U}_{ш}$.

Так, при $r = 100$ имеем $P_1 = 6,93 \cdot 10^{-3}$,

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\frac{U^*}{\bar{U}_{ш}}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz = 0,5 - P_1 = 0,4931,$$

что соответствует $\frac{U^*}{\bar{U}_{ш}} = 2,48$.

При $D = D_0 \frac{U^*}{\bar{U}_{ш}} = 1$, вследствие чего по

выражению (12) определим:

$$P_3 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{U^*}{\bar{U}_{ш}} - \frac{U_c}{\bar{U}_{ш}}}^{\infty} e^{-\frac{z^2}{2}} dz - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{2,48-1,0} e^{-\frac{z^2}{2}} dz = 0,5 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{1,48} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \approx 0,07.$$

При $D = 0,5 \frac{U^*}{\bar{U}_{ш}} = 4$,

$$P_3 = 0,5 + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{4-2,48} e^{-\frac{z^2}{2}} dz = 0,5 + 0,4357 = 0,9357.$$

Показатели подсчёта вероятности выявления цели на разных дистанциях и при различных $r = \frac{\Omega}{\omega}$ представлены наглядными зависимостями на графике 3.

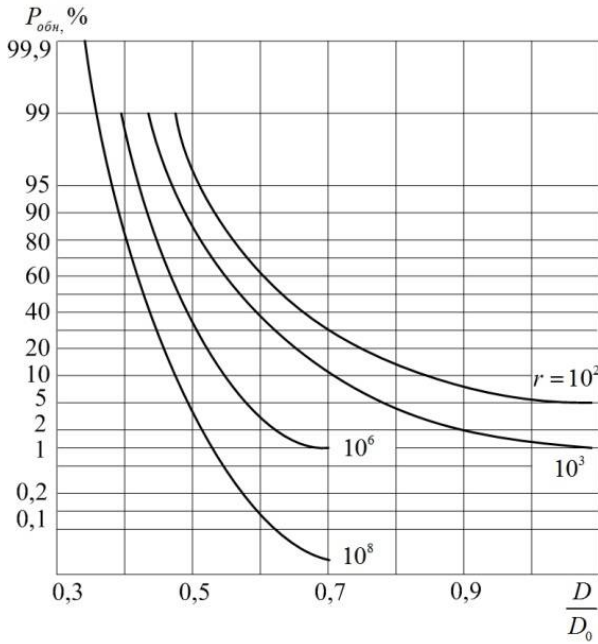


Рис. 3. Вероятность обнаружения цели в зависимости от дальности действия прибора и числа элементов поля обзора г.

В заключение приведём приближенные формулы для расчёта дальности действия инфракрасных сканирующих систем пассивного типа.

Одна из них имеет вид

$$D_{\max} = \sqrt{\sqrt{\frac{\pi}{32} \left(r_0 d_{об} \frac{I}{F_{нор} m \Delta\gamma} \right) \sqrt{\frac{t_u}{r}}}}, \quad (13)$$

где r_0 – коэффициент пропускания оптической системы; $d_{об}$ – диаметр входного отверстия оптической системы; I – сила излучения цели в диапазоне длин волн чувствительности приёмника лучистой энергии, Вт/стер; $F_{нор}$ – пороговая чувствительность приёмника лучистой энергии; $m = \frac{U_c}{U_{ш}}$ – необходимое выражение сигнал/шум по напряжению; $\Delta\gamma$ – угловой потенциал разрешения оптической системы, рад; t_u – промежуток времени обзора мгновенного поля зрения, сек.; r – количество компонентов системы поля зрения.

Так, при $r_0 = 0,6$; $d_{об} = 30$ см, $I = 76,4$ Вт/стер; $F_{нор} = 0,5 \cdot 10^{-10}$ Вт/см*Гц^{1/2}; $m = 5$; $\Delta\gamma = 4,33 \cdot 10^{-3}$ рад; $t_u = 0,1$ сек и $r = 12$, получено $D_{\max} = 9,55 \cdot 10^6$ см или около 95 км.

В работе [16] приводится номограмма для вычисления максимальной дальности ра-

боты ИК-оборудования, в базу которой заложено последующее итоговое выражение:

$$D_{\max} = \sqrt{\int_0^\infty \frac{I_\lambda \tau_a \tau_o}{F_{эв}} d\lambda \frac{d_{об}}{f_{об}} \left(\frac{rT}{\Omega \tau_{пр}} \right)} \quad (14)$$

где $D_{\max}$ – предельная дальность работы оборудования, морск. миль; I_λ – плотность спектра силы излучения цели, Вт/стер·мк; τ_a, τ_o – значения спектрального пропускания атмосферы и оптической структуры оборудования соответственно; $F_{эв}$ – эквивалентная мощность шумов приёмника, Вт; $d_{об}/f_{об}$ – относительная апертура объектива оптической системы; r – количество компонентов системы поля обзора; T – промежуток времени сканирования угла обзора, сек.; Ω – угол обзора, стер; $\tau_{пр}$ – постоянная времени приёмника лучистой энергии.

Для образца на рис. 4 показано вычисление через указанные зависимости на графике для очередных исходных значений: $\frac{d_{об}}{f_{об}} = 5$;

$r = 10$; $T = 1$ сек.; $\Omega = 1$ стер; $\tau_{пр} = 10^{-4}$ сек.;

$\frac{rT}{\Omega \tau_{пр}} = 10^5$; $(I_\lambda)_{ср} = 200$ Вт/стер; $F_{эв} = 10^{-9}$ Вт;

$\tau_a = \tau_o = 0,70$.

Потому как значение спектра указано усреднёнными данными, то

$$\frac{\int_0^\infty \frac{I_\lambda \tau_a \tau_o d\lambda}{F_{эв}}}{F_{нор}} = \frac{(I_\lambda)_{ср} \tau_a \tau_o}{F_{нор}} = \frac{200 \cdot 0,7 \cdot 0,7}{10^{-9}} = 10^{11}$$

На представленной номограмме рис. 4 соединяем обозначенные точки

$$\frac{d_{об}}{f_{об}} = 5; \quad \frac{rT}{\Omega \tau_{пр}} = 10^5;$$

и образуется дополнительная точка C, которую связывают прямой линией с точкой B, соответствующей

$$\int_0^\infty \frac{1}{F_{эв}} I_\lambda \tau_a \tau_o d\lambda = 10^{11}.$$

В точке пересечения этой прямой со шкалой $D_{\max}$ получаем результат $D_{\max} = 26$ морск. миль (48 км).

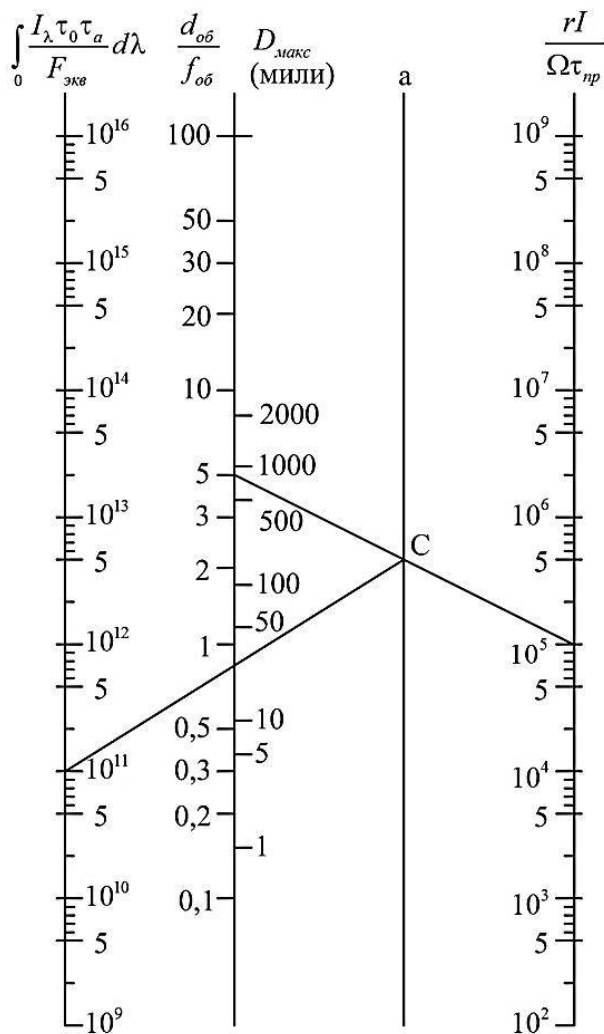


Рис. 4. Номограмма для расчёта максимальной дальности действия ИК прибора.

Заключение

Приведённая методика расчёта дальности действия сканирующих систем пассивного типа помогла определить необходимый параметр обнаружения цели – максимальная дальность действия аппаратуры системы технического зрения по обнаружению заданной цели. Данную методику необходимо внедрить в алгоритм работы СТЗ и широко использовать в деятельности по обнаружению и распознаванию объ-

ектов с помощью СТЗ.

Литература

1. Системы технического зрения / А.Н. Писаревский, А.Ф. Черняховский, Г.К. Афанасьев и др. Л.: Машиностроение, 1988. 424 с.
2. Техническое зрение роботов / В.И. Мокшин, А.А. Петров, В.С. Титов, Ю.Г. Якушенков. М.: Машиностроение, 1990. 272 с.
3. Кориков А.М., Сырякин В.И., Ангелов М.П. Исследование корреляционно-экстремального сенсорного устройства для промышленных роботов // Корреляционно-экстремальные системы управления. Томск: ТГУ, 1980. С.218-229.
4. Кориков А.М., Сырякин В.И., Титов В.С. Корреляционно зрительные системы роботов / под ред. А.М. Корикова. Томск: Радио и связь. Томск. отдел, 1990. 264 с.
5. Никитина Ю.А., Сырякин В.И., Титов В.С. Особенности обработки цветных изображений в телевизионных системах технического зрения. Томск, 1991. 36 с. Деп. ВИНТИ 05.08.91.
6. Системы технического зрения: Справочник / В.И. Сырякин, В.С. Титов, Ю.Г. Якушенков и др.; под ред. В.И. Сырякина, В.С. Титова. Томск: МГП «РАС-КО» при изд. «Радио и связь», 1992. 367 с.
7. Якушенков Ю.Г. Теория и расчёт опико-электронных приборов. М.: Логос, 2004. 480 с.
8. Алеев Р.М., Иванов В.Н., Овсянников В.А. Основы теории анализа и синтеза воздушной тепловизионной аппаратуры. Казань: Изд. Казанского университета, 2000. 342 с.
9. Криксунов К.З. Справочник по основам инфракрасной техники. М.: Советское радио, 1978. 400 с.
10. Инфракрасная термография, основы, техника, применение/ пер. с фран.; под ред. чл.-кор. АН СССР Л.Н. Курбатова. М.: Мир, 1998. 395 с.
11. Фомин Ю.А. Графоаналитический метод оценки дальности действия бортовой тепловизионной аппаратуры обзора // Техника средств связи. Серия Техника телевидения. М.: ЗАО «МНИТИ», 2009. Вып. 1. С. 37-45.
12. Криксунов Л.З., Усольцев И.Ф. Инфракрасные устройства самонаведения управляемых снарядов. М.: Советское радио, 1963. 240 с.
13. Криксунов Л.З., Усольцев И.Ф. Инфракрасные системы обнаружения, пеленгации и автоматического сопровождения движущихся объектов. М.: Сов. Радио, 1968. 320 с.
14. Козёлкин В.В., Усольцев И.Ф. Основы инфракрасной техники. М.: Машиностроение, 1974. 336 с.
15. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учебник для вузов. 6 изд. стер. М.: Высш. шк., 1999. 576 с.
16. Брамсон М.А., Каликеев А.Е. Инфракрасная техника капиталистических стран: [Обзор зарубежной периодич. печати за 1956-1959 гг.]. М.: Сов. радио, 1960. 183 с.

Поступила 05.09.2022; принята к публикации 10.10.2022

Информация об авторах

Смирнов Дмитрий Андреевич - инженер-испытатель войсковой части 15650, Государственный лётно-испытательный центр Министерства обороны имени В.П. Чкалова (416504, Россия, г. Ахтубинск), e-mail: drone0806@rambler.ru
Делендик Алексей Михайлович – начальник отделения, старший инженер-испытатель войсковой части 15650, Государственный лётно-испытательный центр Министерства обороны РФ имени В.П. Чкалова (416504, Россия, г. Ахтубинск), e-mail: cu-25cm@rambler.ru

Николенько Александр Владимирович - младший научный сотрудник 21 отдела научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией ВВС), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А), e-mail: nikolenko.alexandr.93@yandex.ru.

Вахмин Сергей Юрьевич – канд. физ.-мат. наук, старший преподаватель кафедры физики и химии, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А), e-mail: vax_serg@mail.ru.

Николенько Ксения Владимировна - студентка кафедры технологии машиностроения, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: ks11nikolenko@yandex.ru.

METHOD OF CALCULATING THE RANGE OF INFRARED SCANNING SYSTEMS OF PASSIVE TYPE

D.A. Smirnov¹, A.M. Delendik¹, A.V. Nikolenko², S.Yu. Vakhmin², K.V. Nikolenko³

¹Military unit 15650, Akhtubinsk, Russia

²Military Training and Research Center of the Air Force «Air Force Academy
named after Prof. N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin», Voronezh, Russia

³Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article presents and reveals a computational and experimental technique for the range of infra-red scanning systems of the passive type, which is part of the technical vision system. We note that in this article, the technical vision system is understood as a complex of on-board equipment intended for viewing during sequential scanning of the underlying earth's surface, which can be represented as consisting of special components, the angular magnitude of which is equally similar to the short angle of the angle of the technical vision system. In some cases, a target landmark is detected in a short area of vision, while the microelectronic circuit multicontroller issues a short-term command pulse, which affects the components of the electrical circuit structure with switching the target search regulations to the target capture regulations and its automatic continuous tracking. The maximum range at which a target with a specific probability should be detected is determined by the numerical ratio: signal/noise. The energy of the accompanied target signal is also recorded when a target landmark is detected at the maximum range with the specified values and characteristics. It is necessary to define the so-called detection parameter. It is determined by the detection curves based on the set values of the detection quality indicators – the probability of correct detection and the probability of a false alarm

Key words: range calculation method, computational and experimental method, technical vision system, infrared scanning systems, passive systems, recognition and detection of objects of interest

References

1. Pisarevskiy A.N., Chernyakhovskiy A.F., Afanas'ev G.K. et al. "Systems of technical vision" ("Sistemy tekhnicheskogo zreniya"), Leningrad: Mashinostroyeniye, 1988, 424 p.
2. Mokshin V.I., Petrov A.A., Titov V.S., Yakushenkov Yu.G. "Technical vision of robots" ("Tekhnicheskoe zrenie robotov"), Moscow: Mashinostroyeniye, 1990, 272 p.
3. Korikov A.M., Syryamkin V.I., Angelov M.P. "Research of correlation-extreme sensor device for industrial robots", *Correlation-but-extreme control systems (Korrel'ya-tcionno-ekstremal'nye sistemy upravleniya)*, Tomsk: TSU, 1980, pp. 218-229.
4. Korikov A.M., Syryamkin V.I., Titov V.S. ed. Korikov A.M. "Correlation visual systems of robots" ("Korrel'yatsionno zritel'nye sistemy robotov"), Tomsk: Radio i svyaz'. 1990, 264 p.
5. Nikitina Yu.A., Syryamkin V.I., Titov V.S. "Features of color image processing in television vision systems" ("Osobennosti obrabotki tsvetnykh izobrazheniy v televizionnykh sistemakh tekhnicheskogo zreniya"), Tomsk, 1991, 36 p.
6. Syryamkin V.I., Titov V.S., Yakushenkov Yu.G., et al., ed Syryamkin V.I., Titov V.S. "Systems of technical vision" ("Sistemy tekhnicheskogo zreniya"), handbook, Tomsk: MGP «RAS-KO», «Radio i svyaz'», 1992, 367 p.
7. Yakushenkov Yu.G. "Theory and calculation of optoelectronic devices" ("Teoriya i raschet optiko-elektronnykh priborov"), Moscow: Logos, 2004, 480 p.
8. Aleev R.M., Ivanov V.N., Ovsyannikov V.A. "Fundamentals of the theory of analysis and synthesis of air thermal imaging equipment" ("Osnovy teorii analiza i sinteza vozduшной teplovizionnoy apparatury"), Kazan University, 2000, 342 p.
9. Kriksunov K.Z. "Handbook on the basics of infrared technology" ("Spravochnik po osnovam infrakrasnoy tekhniki"), Moscow: Sovetskoe radio, 1978, 400 p.
10. Kurbatova L.N. "Infrared thermography, fundamentals, technique, application" ("Infrakrasnaya termografiya, osnovy, tekhnika, primeneniye"), Moscow: Mir, 1998, 395 p.
11. Fomin Yu.A. "Graphoanalytical method of assessing the range of on-board thermal imaging survey equipment", *Communication Equipment (Tekhnika sredstv svyazi)*, Moscow, CJSC «MNITI», 2009, issue 1, pp. 37-45.
12. Kriksunov L.Z., Usol'tsev I.F. "Infrared homing devices of guided projectiles" ("Infrakrasnye ustroystva samonavedeniya upravlyaemykh snaryadov"), Moscow: Sovetskoe Radio, 1963, 240 p.

13. Kriksunov L.Z., Usol'tsev I.F. "Infrared detection systems, direction finding and automatic tracking of moving objects" ("Infrakrasnye sistemy obnaruzheniya, pelengatsii i avtomaticheskogo soprovozhdeniya dvizhushchikhsya ob'ektov"), Moscow: Sovetskoe Radio, 1968, 320 p.
14. Kozyelkin V.V., Usol'tsev I.F. "Fundamentals of infrared technology" ("Osnovy infrakrasnoy tekhniki"), Moscow: Mashinostroenie, 1974, 336 p.
15. Wentzel E.S. "Probability theory" ("Teoriya veroyatnostey"), textbook for universities, Moscow: Vysshaya shkola, 1999, 576 p.
16. Bramson M.A., Kalikeev A.E. "Infrared technology of capitalist countries" ("Infrakrasnaya tekhnika kapitalisticheskikh stran"), Moscow: Sovetskoe Radio, 1960, 183 p.

Submitted 05.09.2022; revised 10.10.2022

Information about the authors

Dmitriy A. Smirnov, Test engineer of military unit 15650, V.P. Chkalov State Flight Test Center of the Ministry of Defense (Akhtubinsk 416504, Russia), e-mail: drone0806@rambler.ru.

Aleksey M. Delendik, Head of the Department, Senior Test Engineer of Military unit 15650, V.P. Chkalov State Flight Test Center of the Ministry of Defense of the Russian Federation (Akhtubinsk 416504, Russia), e-mail: cu-25cm@rambler.ru.

Aleksandr V. Nikolenko, Junior Researcher of the 21st Department of the Research Center (Air Force Aviation Application, Support and Management), Military Training and Research Center of the Air Force «Military Air Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin» (54A Starykh Bolshevikov str., Voronezh 394064, Russia), e-mail: nikolenko.alexandr.93@yandex.ru.

Sergey Yu. Vakhmin, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Assistant Professor, Military Training and Research Center of the Air Force «Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin» (54A, Starykh Bolshevikov str., Voronezh, 394064, Russia), e-mail: vax_serg@mail.ru.

Kseniya V. Nikolenko, student, Voronezh State Technical University (84, 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: ks11nikolenko@yandex.ru.

КОЭФФИЦИЕНТНАЯ ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА В МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА НЕФТЕПЕРЕРАБОТКИ**Лэ Ван Хуен****Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия**

Аннотация: в рамках математической модели кинетики процесса нефтепереработки изучена обратная задача: по заданным концентрациям исходного вещества и продуктов определить константы скорости реакций. Предложена методика решения этой задачи, основанная на методе конечных разностей, методе интерполирования исходных данных – кубического сплайна и методе регуляризации Тихонова. В результате проведенных расчетов найдены приближительные константы скорости реакций. Чтобы оценить приемлемость найденных приближительных констант скорости реакций, проверено совпадение между измеренными и расчетными концентрациями исходного вещества и продуктов. Для этого использованы статистические параметры: коэффициент корреляции Пирсона R^2 и показатель эффективности Нэша-Сатклиффа NSE . Найденные приближительные константы скорости реакций позволяют прогнозировать концентрации исходного вещества и продуктов в любой момент времени путем решения системы дифференциальных уравнений. Например, когда нужно определить концентрацию веществ в какой-то момент в прошлом, но мы не можем произвести измерение, или в будущем без проведения измерения. Более того, из найденных приближительных констант скорости реакций можно определить показатели в реакциях процесса нефтепереработки, такие как энергию активации, температуру

Ключевые слова: обратная задача, математическая модель, химическая кинетика, процесс нефтепереработки, метод конечных разностей, метод кубического сплайна, метод регуляризации Тихонова

Благодарности: автор выражает благодарность и глубокую признательность д-ру техн. наук, профессору Фирсову Андрею Николаевичу за руководство, советы и ценные замечания при работе над данной статьей

Введение

В последние десятилетия с появлением и развитием мощных ЭВМ обратная задача стала популярным направлением исследований в области вычислительной и прикладной математики. Она имеет широкое применение в идентификации систем, оптике, радаре, акустике, теории связи, обработке сигналов, медицинской визуализации, геофизике, океанографии, астрономии, дистанционном зондировании, обработке естественных языков, машинном обучении и многих других областях. На основе входных данных, полученных путем наблюдения, обратная задача позволяет идентифицировать параметры, которые мы не можем непосредственно измерять. В связи с большой практической применимостью она превращается в междисциплинарную науку, развивается как новое перспективное направление исследований. Вот почему обратная задача привлекает все больше и больше внимания многих ученых.

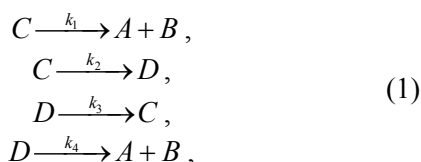
В данной работе будет сформирована и решена обратная задача в рамках математической модели кинетики реакции каталитическо-

го крекинга (т.е. процесса нефтепереработки): по заданным концентрациям исходного вещества и продуктов определить константы скорости реакций. Для процессов нефтепереработки и нефтехимии характерен сложный состав реагирующей смеси, большое количество одновременно протекающих реакций и взаимных превращений реагентов. Структура кинетических уравнений реакций зависит от физико-химических представлений состава реагирующей смеси и получаемых продуктов. В [1,2] была описана система дифференциальных уравнений математической модели кинетики одного из процессов нефтепереработки. Для этого взята гипотетическая гомогенная химическая реакция превращения углеводородов парафинового ряда в процессе каталитического крекинга. Решение данной системы позволило бы прогнозировать превращение концентраций исходного вещества и продуктов, управлять им и решать проблемы масштабного перехода от лабораторных исследований к работе промышленных агрегатов.

Математическая модель кинетики процесса нефтепереработки

Рассмотрим математическую модель кинетики процесса нефтепереработки в случае, когда исходная смесь состоит из одного тяжелого углеводорода C [1,2]. Под действием температуры и соударений углеводород C распадается на углеводороды A , B и также превращается в изомер D с тем же количеством атомов углерода, что и в исходной молекуле. Вещество D также распадается на A и B либо обратно превращается в C . Пусть продукты реакции A , B – это более легкие углеводороды, и с ними никаких превращений далее не происходит.

Схема химических превращений при каталитическом крекинге будет иметь вид:



где k_1, k_2, k_3, k_4 – константы скорости реакций, c^{-1} [3].

Скорость реакций в схеме превращений (1) определяется формулами [3]:

$$\begin{aligned} v_1 &= -\frac{dC}{dt} = \frac{dA}{dt} = \frac{dB}{dt} = k_1[C], \\ v_2 &= -\frac{dC}{dt} = \frac{dD}{dt} = k_2[C], \\ v_3 &= -\frac{dD}{dt} = \frac{dC}{dt} = k_3[D], \\ v_4 &= -\frac{dD}{dt} = \frac{dA}{dt} = \frac{dB}{dt} = k_4[D], \end{aligned} \quad (2)$$

где v_1, v_2, v_3, v_4 – скорость реакций, $\frac{\text{моль}}{\text{л.с}}$;

$\frac{dA}{dt}, \frac{dB}{dt}, \frac{dC}{dt}, \frac{dD}{dt}$ – изменение концентрации веществ A, B, C, D за малое время, $\frac{\text{моль}}{\text{л.с}}$;
 $[C], [D]$ – концентрация веществ C, D , $\frac{\text{моль}}{\text{л}}$.

Из (2) следует, что изменение концентрации веществ A, B, C, D за малое время определяется по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \frac{dA}{dt} &= k_1[C] + k_4[D], \\ \frac{dB}{dt} &= k_1[C] + k_4[D], \\ \frac{dC}{dt} &= -k_1[C] - k_2[C] + k_3[D], \\ \frac{dD}{dt} &= k_2[C] - k_3[D] - k_4[D]. \end{aligned} \quad (3)$$

Математическая модель кинетики реакции каталитического крекинга, описанная схемой превращений (1) и (3), представляет собой систему дифференциальных уравнений [1,2]:

$$\begin{cases} \frac{dy_1(t)}{dt} = k_1 y_3(t) + k_4 y_4(t); \\ \frac{dy_2(t)}{dt} = k_1 y_3(t) + k_4 y_4(t); \\ \frac{dy_3(t)}{dt} = -(k_1 + k_2) y_3(t) + k_3 y_4(t); \\ \frac{dy_4(t)}{dt} = k_2 y_3(t) - (k_2 + k_4) y_4(t), \end{cases} \quad (4)$$

где $y_1(t), y_2(t), y_3(t), y_4(t)$ – концентрация веществ A, B, C, D в момент времени t . Предположим, что в начальный момент времени $t=0$ концентрация веществ A, B, C, D равна $y_1(0), y_2(0), y_3(0), y_4(0)$. Из первых двух уравнений системы (4) видно, что изменение концентрации веществ A, B за малое время одинаково.

Постановка обратной задачи

Будем рассматривать следующие две задачи, построенные в рамках математической модели кинетики реакции каталитического крекинга (4).

Задача 1. По заданным $k_1 = k_{10}, k_2 = k_{20}, k_3 = k_{30}, k_4 = k_{40}$ и концентрациям исходного вещества продуктов A, B, C, D в начальный момент времени $t=0$, определить $y_1(t), y_2(t), y_3(t), y_4(t)$.

Задача 1 представляет собой задачу построения решения линейной системы дифференциальных уравнений с заданными начальными условиями (задачу Коши). Эту задачу будем называть прямой задачей в рамках математической модели (4). Существуют разные методы для решения задачи 1, такие как метод

Эйлера в [2], одношаговый метод Рунге-Кутты и многошаговый метод Адамса-Башфорта в [4]. Решение задачи 1 позволяет определить концентрацию веществ A , B , C , D в любой момент времени, а также показывает, как меняется их концентрация во времени.

Можно переписать (4) в матрично-векторном виде: $\frac{dY(t)}{dt} = AY(t)$, где

$A = (a_{ij})_{i,j=1}^4$ – матрица с элементами k_1 , k_2 , k_3 ,

k_4 ; $Y(t) = (y_1(t), y_2(t), y_3(t), y_4(t))^T$. Решение

задачи 1 имеет вид: $Y(t) = e^{At}Y(0)$, где

$Y(0) = (y_1(0), y_2(0), y_3(0), y_4(0))^T$ – вектор

начальных условий; e^{At} определяется соотно-

шением: $e^{At} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(At)^k}{k!}$. Нетрудно доказать, что

прямая задача 1 корректно поставлена по Адамару (см. определение корректной задачи в [5–9]).

Задача 2. По заданным концентрациям исходного вещества и продуктов A , B , C , D в моменты времени t_i , $i = 1, 2, \dots$, определить k_1 , k_2 , k_3 , k_4 (т.е. k_{10} , k_{20} , k_{30} , k_{40}).

Задачу 2 будем называть обратной задачей по отношению к задаче 1. В прикладных исследованиях, как правило, концентрацию веществ A , B , C , D можно измерить в любой момент времени t , т.е. нам известны $y_1(t)$, $y_2(t)$, $y_3(t)$, $y_4(t)$. Очевидно, что первое и второе уравнения системы (4) совпадают. Удалив одно из них, получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dy_1(t)}{dt} = k_1 y_3(t) + k_4 y_4(t), \\ \frac{dy_3(t)}{dt} = -(k_1 + k_2) y_3(t) + k_3 y_4(t), \\ \frac{dy_4(t)}{dt} = k_2 y_3(t) - (k_2 + k_4) y_4(t). \end{cases} \quad (5)$$

Применяя метод конечных разностей, из (5) получаем систему алгебраических уравнений относительно k_1 , k_2 , k_3 , k_4 :

$$\begin{cases} \frac{y_1(t+h) - y_1(t-h) - o(h^3)}{2h} = y_3(t)k_1 + y_4(t)k_4, \\ \frac{y_3(t+h) - y_3(t-h) - o(h^3)}{2h} = -y_3(t)k_1 - y_3(t)k_2 + \\ + y_4(t)k_3, \\ \frac{y_4(t+h) - y_4(t-h) - o(h^3)}{2h} = [y_3(t) - y_4(t)]k_2 - \\ - y_4(t)k_4. \end{cases} \quad (6)$$

Подставляя $t = t_1$ и $t = t_2$ в (6), получаем систему шести уравнений. Однако система (6) содержит четыре неизвестных k_1 , k_2 , k_3 , k_4 , поэтому из шести уравнений будем выбирать только четыре. Таким образом, получаем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{y_1(t_1+h) - y_1(t_1-h) - o(h^3)}{2h} = y_3(t_1)k_1 + y_4(t_1)k_4, \\ \frac{y_3(t_1+h) - y_3(t_1-h) - o(h^3)}{2h} = -y_3(t_1)k_1 - y_3(t_1)k_2 + \\ + y_4(t_1)k_3, \\ \frac{y_4(t_1+h) - y_4(t_1-h) - o(h^3)}{2h} = [y_3(t_1) - y_4(t_1)]k_2 - \\ - y_4(t_1)k_4, \\ \frac{y_1(t_2+h) - y_1(t_2-h) - o(h^3)}{2h} = y_3(t_2)k_1 + y_4(t_2)k_4. \end{cases} \quad (7)$$

Систему (7) можно представить в векторно-матричном виде: $AK = B$. Отметим, что процесс кинетики реакции каталитического крекинга произошёл, поэтому система (7) всегда имеет хотя бы одно решение. Искомое решение задачи 2, обозначаемое $K_0 = (k_{10}, k_{20}, k_{30}, k_{40})^T$, является точным решением системы (7). Пренебрегая $o(h^3)$, из (7) получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{y_1(t_1+h) - y_1(t_1-h)}{2h} = y_3(t_1)k_1 + y_4(t_1)k_4, \\ \frac{y_3(t_1+h) - y_3(t_1-h)}{2h} = -y_3(t_1)k_1 - y_3(t_1)k_2 + y_4(t_1)k_3, \\ \frac{y_4(t_1+h) - y_4(t_1-h)}{2h} = [y_3(t_1) - y_4(t_1)]k_2 - y_4(t_1)k_4, \\ \frac{y_1(t_2+h) - y_1(t_2-h)}{2h} = y_3(t_2)k_1 + y_4(t_2)k_4. \end{cases} \quad (8)$$

Значения $y_3(t_1)$, $y_4(t_1)$, $y_3(t_2)$, $y_4(t_2)$

получены из эксперимента, а $y_1(t_1 + h)$, $y_1(t_1 - h)$, $y_3(t_1 + h)$, $y_3(t_1 - h)$, $y_4(t_1 + h)$, $y_4(t_1 - h)$, $y_1(t_2 + h)$, $y_1(t_2 - h)$ получены методом кубического сплайна. Поскольку $y_3(t_1)$, $y_4(t_1)$, $y_3(t_2)$, $y_4(t_2)$ измерены экспериментально, то они могут содержать ошибки измерения и округления. Аналогично, $y_1(t_1 + h)$, $y_1(t_1 - h)$, $y_3(t_1 + h)$, $y_3(t_1 - h)$, $y_4(t_1 + h)$, $y_4(t_1 - h)$, $y_1(t_2 + h)$, $y_1(t_2 - h)$ найдены интерполяцией, поэтому они, очевидно, содержат не только ошибки округления, но и ошибки интерполяции.

Систему (8) можно представить в векторно-матричном виде: $A_h K = B_b$, где A_h – приближение к матрице A , B_b – приближение к вектору B . Пусть система (8) имеет решение $K_{h\delta}$. При малом изменении A и B искомое решение K_0 может изменяться сильно, т.е. $K_{h\delta}$ может не стремиться к K_0 [10]. При этом систему (8) целесообразно решать методом регуляризации Тихонова [5–9].

Будут найдены приближенные константы скорости реакций по следующему условию:

$$\|A_h K - B_b\|^2 + \alpha \|K\|^2 \rightarrow \min_{\alpha} \min_K, \quad (9)$$

где $\alpha = \text{const} > 0$ – параметр регуляризации. Из (9) вытекает регуляризующее уравнение:

$$A_h^* A_h K + \alpha K = A_h^* B_b, \quad (10)$$

где A_h^* – сопряженный к матрице A_h .

Решение системы (10), обозначаемое $K^\alpha = (k_1^\alpha, k_2^\alpha, k_3^\alpha, k_4^\alpha)^T$, есть регуляризованное решение системы (8) [7,9]. В методе регуляризации Тихонова необходимо найти параметр регуляризации α так, чтобы K^α стремился к искомому решению K_0 , т.е. K^α является приближением к K_0 .

Проанализируем (9) и (10). С увеличением же параметра α решение K^α становится глаже и устойчивей, т.е. уменьшается норма решения $\|K^\alpha\|^2$, но увеличивается невязка $\|A_h K^\alpha - B_b\|^2$. Истина – посередине, т.е. при некотором умеренном α решение K^α будет иметь и умеренную гладкость, и умеренную невязку. Суще-

ствует несколько способов выбора параметра α [9,11]. В данной работе проводим расчеты с несколькими значениями параметра, составляющими геометрическую прогрессию $\alpha = \{10^{-2}, 10^{-3}, 10^{-4}\}$ [9].

Рассмотрим пример. Пусть нам известны концентрации A , C , D в разные моменты времени, т.е. $y_1(t)$, $y_3(t)$, $y_4(t)$ (см. табл. 1).

Таблица 1
Измеренные концентрации веществ A , C , D

$t(c)$	$y_1(t)$	$y_3(t)$	$y_4(t)$
0	0	90	10
20	32.96800	59.27746	7.75455
30	45.11884	48.11464	6.76653
60	69.88058	25.74512	4.37430
100	86.46647	11.19889	2.33464
150	95.02129	3.96468	1.01403
170	96.66267	2.61883	0.71850
200	98.16844	1.40688	0.42469
220	98.77227	0.93015	0.29758
250	99.32621	0.50037	0.17343

Используя метод кубического сплайна, вычисляем $y_1(t_1 + h)$, $y_1(t_1 - h)$, $y_3(t_1 + h)$, $y_3(t_1 - h)$, $y_4(t_1 + h)$, $y_4(t_1 - h)$, $y_1(t_2 + h)$, $y_1(t_2 - h)$ и построим систему (8) при $t_1 = 20$, $t_2 = 30$, $h = 0.001$. Регуляризованное решение системы (8) находим методом регуляризации Тихонова. В результате проведенных расчетов находим приближенные константы скорости реакций k_1 , k_2 , k_3 , k_4 (см. табл. 2).

Таблица 2
Найденные приближенные константы скорости реакций k_1 , k_2 , k_3 , k_4

α	k_1	k_2	k_3	k_4
0.0100	0.02009	0.00091	0.00095	0.01939
0.0010	0.01994	0.00108	0.00108	0.02051
0.0001	0.01992	0.00110	0.00110	0.02063

Ниже будем представлять метод выбора лучшего параметра α . Идея состоит в выборе α так, чтобы расчетная концентрация веществ A , C , D была наиболее близка к измеренной концентрации. Для этого будем подставлять найденные приближенные константы скорости реакций k_1 , k_2 , k_3 , k_4 (см. табл. 2) в (4) и решать прямую задачу. Из решения прямой задачи рассчитываются концентрации веществ A , C , D в разные моменты времени, т.е. $Y_{K_\alpha}(t)$.

Расчетные концентрации веществ A , C , D будут сравниваться с измеренными значениями, т.е. $Y_{K_0}(t)$.

Чтобы проверить совпадение между расчетными и измеренными значениями, будем использовать статистические параметры: коэффициент корреляции Пирсона R^2 и показатель эффективности Нэша–Сатклиффа (Nash-Sutcliffe efficiency NSE) [12,13].

Коэффициент R^2 ($0 \leq R^2 \leq 1$) помогает предсказать, существует ли линейная корреляция между измеренными и расчетными концентрациями веществ A , C , D . Если $R^2 = 0$, то полностью отсутствует линейная корреляция между измеренными и расчетными концентрациями веществ A , C , D . Если $R^2 = 1$, то существует идеальная линейная корреляция между измеренными и расчетными концентрациями веществ A , C , D [12,13].

Показатель NSE ($-\infty < NSE \leq 1$) помогает предсказать, насколько хорошо график измеренных и расчетных данных соответствует линии 1:1. Если $NSE = 0$, то полностью отсутствует совпадение между измеренными и расчетными концентрациями веществ A , C , D . Если $NSE = 1$, то существует идеальное совпадение между расчетными и измеренными концентрациями A , C , D [12,13].

Рассмотрим задачу 1. Матрица A_K с элементами $k_1 = k_1^\alpha$, $k_2 = k_2^\alpha$, $k_3 = k_3^\alpha$, $k_4 = k_4^\alpha$ обозначается A_{K^α} . Матрица A_K с элементами $k_1 = k_{10}$, $k_2 = k_{20}$, $k_3 = k_{30}$, $k_4 = k_{40}$ обозначается A_{K_0} . Решение задачи 1 при $A_K = A_{K^\alpha}$, $A_K = A_{K_0}$ обозначается $Y_{K^\alpha}(t)$ и $Y_{K_0}(t)$. Прямая задача 1 корректно поставлена, поэтому при малом изменении матрицы A_{K^α} решение $Y_{K^\alpha}(t)$ тоже мало изменяется, т.е. $\|Y_{K^\alpha}(t) - Y_{K_0}(t)\| \rightarrow 0$ при $\|A_{K^\alpha} - A_{K_0}\| \rightarrow 0$. Имеем, что $\|A_{K^\alpha} - A_{K_0}\| \rightarrow 0$ при $\|K^\alpha - K_0\| \rightarrow 0$. Отсюда, $Y_{K^\alpha}(t)$ непрерывно зависит от K^α . При этом будет выбран параметр α так, чтобы $\|Y_{K^\alpha}(t) - Y_{K_0}(t)\|$ достигало минимума. Здесь под $Y_{K^\alpha}(t)$ понимается расчетная концентрация веществ A , C , D , а под $Y_{K_0}(t)$ – измеренная концентрация веществ A , C , D . Поэтому будет выбран параметр α так, чтобы отклонение между расчетными и изме-

ренными концентрациями веществ A , C , D достигало минимума, т.е. показатель $NSE \rightarrow 1$.

В случае, когда $\alpha = 0.01$, имеем $k_1 = 0.02009$, $k_2 = 0.00091$, $k_3 = 0.00095$, $k_4 = 0.01939$. Расчетные концентрации A , C , D в разные моменты времени представляются в табл. 3.

Таблица 3
Расчетные концентрации веществ A , C , D
при $\alpha = 0.01$

$t(c)$	$y_1(t)$	$y_3(t)$	$y_4(t)$
0	0	90	10
20	32.98874	59.27021	7.74812
30	45.14089	48.10546	6.76363
60	69.89516	25.73437	4.38705
100	86.47201	11.19056	2.35926
150	95.02754	3.96021	1.03731
170	96.67124	2.61553	0.73898
200	98.18104	1.40489	0.44052
220	98.78748	0.92878	0.31049
250	99.34483	0.49962	0.18259

Для вещества A коэффициент $R^2 = 0.9999999482 \approx 1$ показывает, что существует линейная корреляция между измеренными и расчетными концентрациями; $NSE = 0.9999996350 \approx 1$ показывает, что существует совпадение между расчетными и измеренными концентрациями. Следовательно, существует линейная корреляция 1:1 между измеренными и расчетными концентрациями A , т.е. расчетная концентрация в любой момент времени немного отличается от измеренной.

Для вещества C коэффициент $R^2 = 0.9999999621 \approx 1$, $NSE = 0.9999998757 \approx 1$, а для D коэффициент $R^2 = 0.9999913692 \approx 1$, $NSE = 0.9999689627 \approx 1$. Это показывает, что существует линейная корреляция 1:1 между расчетными и измеренными концентрациями веществ C , D . При этом будем делать вывод: найденные приближенные константы $k_1 = 0.02009$, $k_2 = 0.00091$, $k_3 = 0.00095$, $k_4 = 0.01939$, т.е. регуляризованное решение K^α , можно рассматривать как решение обратной задачи 2.

В случаях, когда $\alpha = 0.001$ и $\alpha = 0.0001$, мы делаем то же самое, что и в случае, когда $\alpha = 0.01$. Значения R^2 и NSE при оценке линейной корреляции 1:1 между измеренными и расчетными концентрациями веществ A , C , D представляются в табл. 4 и 5.

Таблица 4

Коэффициент R^2 при оценке линейной корреляции между измеренными и расчетными концентрациями веществ A, C, D

α	$R^2(y_1)$	$R^2(y_3)$	$R^2(y_4)$
0.0100	0.9999999478	0.9999999759	0.9999964323
0.0010	0.9999999687	0.9999999772	0.9999974410
0.0001	0.9999999579	0.9999999773	0.9999961333

В табл. 4 $R^2(y_1)$, $R^2(y_2)$, $R^2(y_3)$ обозначают коэффициенты корреляции Пирсона R^2 при оценке линейной корреляции между измеренными и расчетными концентрациями веществ A, C, D .

Из табл. 4 следует, что при $\alpha = \{0.01, 0.001, 0.0001\}$ существует линейная корреляция между измеренными и расчетными концентрациями веществ A, C, D .

Таблица 5

Показатель NSE при оценке совпадения между измеренными и расчетными концентрациями веществ A, C, D

α	$NSE(y_1)$	$NSE(y_3)$	$NSE(y_4)$
0.0100	0.9999997955	0.9999999339	0.9999816447
0.0010	0.9999997402	0.9999999470	0.9999883439
0.0001	0.9999997201	0.9999999480	0.9999823819

В табл. 5 $NSE(y_1)$, $NSE(y_3)$, $NSE(y_4)$ обозначают показатели NSE при оценке совпадения между измеренными и расчетными концентрациями веществ A, C, D . Из табл. 5 следует, что существует совпадение между измеренными и расчетными концентрациями веществ A, C, D при $\alpha = \{0.01, 0.001, 0.0001\}$.

Будем выбирать $\alpha = 0.001$ таким образом, чтобы сумма $NSE(y_1) + NSE(y_3) + NSE(y_4)$ достигала максимума (≈ 2.9999880311). При $\alpha = 0.001$ имеем приближенные константы скорости реакций: $k_1 = 0.01994$, $k_2 = 0.00108$, $k_3 = 0.00108$, $k_4 = 0.02051$. Нахождение приближенных констант скорости реакций k_1 , k_2 , k_3 , k_4 может остановиться здесь. Однако чтобы доказать правильность выбора параметра $\alpha = 0.001$, будем строить:

– график изменения (расчетной) концентрации веществ A, C, D с течением времени при $k_1 = 0.01994$, $k_2 = 0.00108$, $k_3 = 0.00108$, $k_4 = 0.02051$;

– диаграммы рассеивания, изображающие

измеренные и расчетные концентрация веществ A, C, D в виде точек на декартовой плоскости.

На рис. 1 звездочками обозначены измеренные концентрации веществ A, C, D (см. табл. 1). Кривые $y_1(t)$, $y_3(t)$, $y_4(t)$ показывают, как меняется концентрация веществ A, C, D с течением времени. Нетрудно видеть, что измеренные значения очень близки к кривым $y_1(t)$, $y_3(t)$, $y_4(t)$. Это показывает, что отклонение между измеренными и расчетными значениями очень малое. Это согласуется с тем, что $NSE(y_1) \approx 1$, $NSE(y_3) \approx 1$ и $NSE(y_4) \approx 1$.

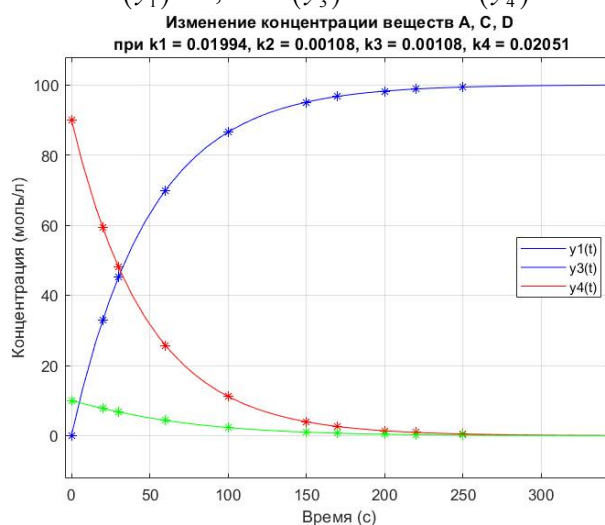


Рис. 1. Изменение концентрации веществ A, C, D в процессе реакции крекинга при $k_1 = 0.01994$, $k_2 = 0.00108$, $k_3 = 0.00108$, $k_4 = 0.02051$

При $\alpha = 0.001$, т.е. при $k_1 = 0.01994$, $k_2 = 0.00108$, $k_3 = 0.00108$, $k_4 = 0.02051$, расчетные концентрации веществ A, C, D в разные моменты времени представляются в табл. 6.

Таблица 6

Расчетные концентрации веществ A, C, D при $\alpha = 0.001$

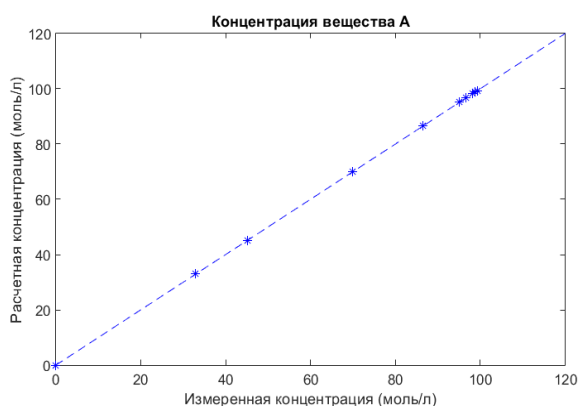
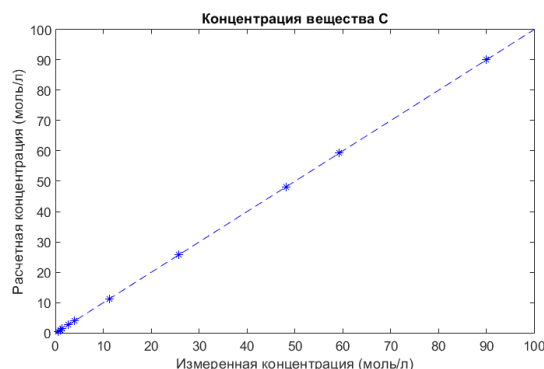
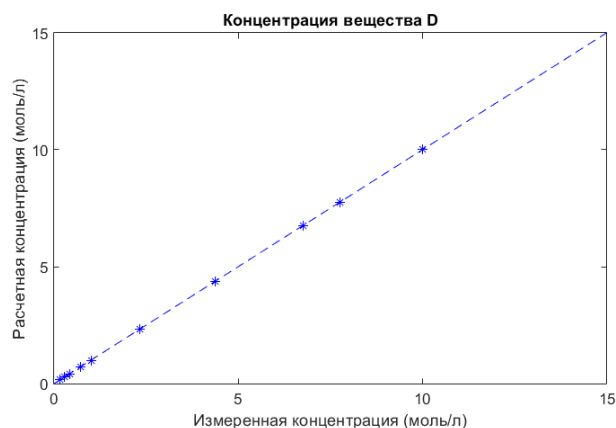
$t(c)$	$y_1(t)$	$y_3(t)$	$y_4(t)$
0	0.00000	90.00000	10.00000
20	32.97008	59.26537	7.76455
30	45.12504	48.10053	6.77442
60	69.89901	25.73180	4.36919
100	86.49119	11.19061	2.31820
150	95.04190	3.96092	0.99718
170	96.68033	2.61614	0.70353

Продолжение табл. 6

200	98.18168	1.40526	0.41306
220	98.78291	0.92899	0.28810
250	99.33362	0.49966	0.16672

Из данных табл. 1 и 6 будем строить диаграммы рассеивания, чтобы показать, что существует линейная корреляция 1:1 между измеренными и рассчитанными концентрациями веществ A , C , D (см. рис. 2–4). На этих диаграммах координата каждой точки по горизонтальной оси выражает измеренную концентрацию, а по вертикальной оси – расчетную концентрацию. Видно, что точки, выражающие концентрации веществ A , C , D , распределяются близко к линейной кривой 1:1. Это согласуется с тем, что существует линейная корреляция 1:1 между измеренными и расчетными концентрациями (значение R^2 и NSE см. в табл. 4 и 5).

Отсюда, найденные приближенные константы скорости реакций $k_1 = 0.01994$, $k_2 = 0.00108$, $k_3 = 0.00108$, $k_4 = 0.02051$ можно рассматривать как решение обратной задачи 2.

Рис. 2. Линейная корреляция 1:1 между измеренными и расчетными концентрациями вещества A Рис. 3. Линейная корреляция 1:1 между измеренными и расчетными концентрациями вещества C Рис. 4. Линейная корреляция 1:1 между измеренными и расчетными концентрациями вещества D

Заключение

В представленной работе была построена методика решения обратной задачи в рамках математической модели кинетики процесса нефтепереработки. В результате проведенных расчетов были найдены методом регуляризации Тихонова приближенные константы скорости реакций в процессе нефтепереработки. Для проверки совпадения между измеренными и расчетными концентрациями исходного вещества и продуктов были использованы коэффициент корреляции Пирсона R^2 и показатель эффективности Нэша-Сатклиффа NSE . Мы обнаружили, что существует линейная корреляция и совпадение (т.е. линейная корреляция 1:1) между измеренными и расчетными концентрациями веществ A , C , D . В этом случае были приняты найденные приближенные константы скорости реакций в процессе нефтепереработки.

Литература

1. О математическом моделировании каталитического крекинга: монография/ В.С. Микшина и др. СПб.: Научные технологии, 2021. С. 120.
2. Заикин П.В., Лысенкова С.А., Микшина В.С. Аналитическое решение системы дифференциальных уравнений математической модели кинетики процесса нефтепереработки // Вестник кибернетики. 2018. № 2. С. 120–126.
3. Колинко П.А., Козлов Д.В. Химическая кинетика в курсе физической химии. Новосибирск, 2013. 99 с.
4. Лысенкова С.А. О математическом моделировании каталитического крекинга // Вестник кибернетики. 2018. № 4. С. 107–110.
5. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. 2-е изд. М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1979. 285 с.
6. Тихонов А.Н. О некорректных задачах линейной

алгебры и устойчивом методе их решения // Докл. АН СССР. 1965. Т. 163. № 3. С. 591–594.

7. Денисов А.М. Введение в теорию обратных задач. М.: Изд-во МГУ, 1994. 208 с.

8. Кабанихин С.И. Обратные и некорректные задачи. Новосибирск: Сибирский федеральный университет, 2009. 457 с.

9. Ольховой А. Введение в теорию обратных и некорректных задач. LAP Lambert Academic Publishing, 2012. 124 с.

10. Сумин М.М. Метод регуляризации А.Н. Тихонова для решения операторных уравнений первого рода. Н.Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2016.

56 с.

11. Леонов А.С., Ягола А.Г. Можно ли решить некорректную задачу без знания погрешности данных? // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика, астрономия. 1987. Т. 36. № 4. С. 28–33.

12. Krause P., Boyle D.P., Båse F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment // Adv. Geosci. 2005. Т. 5. С. 89–97.

13. Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Эффективность моделирования и прогнозирования речного стока // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. Т. 375. № 1. С. 176–189.

Поступила 29.08.2022; принята к публикации 17.10.2022

Информация об авторах

Ль Ван Хуен – аспирант высшей школы киберфизических систем и управления, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29), тел. +7(999)683-79-22, e-mail: huyenlevan120193@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8645-821X>

COEFFICIENT INVERSE PROBLEM IN THE MATHEMATICAL MODEL OF THE REFINING PROCESS KINETICS

Le Van Huyen

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

Abstract: within the framework of the mathematical model of the kinetics of the oil refining process, the inverse problem was studied: to determine the reaction rate constants from the given concentrations of the starting substance and products. A technique for solving this problem based on the method of finite differences, the method of interpolation of the initial data - the cubic spline and the Tikhonov's regularization method is proposed. As a result of the calculations performed, approximate reaction rate constants will be found. In order to assess the acceptability of the found approximate reaction rate constants, the agreement between the measured and calculated concentrations of the starting material and products will be checked. For this, statistical parameters will be used: The Pearson correlation coefficient and the Nash-Sutcliffe efficiency indicator. The found approximate reaction rate constants make it possible to predict the concentrations of the initial substance and products at any time by solving a system of differential equations. For example, when it is necessary to determine the concentration of substances at some point in the past, but we cannot make a measurement or in the future without taking a measurement. Moreover, from the found approximate reaction rate constants, it is possible to determine the indicators in the reactions of the oil refining process, such as activation energy, temperature

Key words: inverse problem, mathematical model, chemical kinetics, oil refining process, finite difference method, cubic spline method, Tikhonov's regularization method

Acknowledgments: the author expresses his gratitude and deep gratitude to Doctor of Technical Science, Professor, Firsov Andrey Nikolaevich for guidance, advice and valuable comments when working on this article.

References

1. Mikshina V.S. et al. "On mathematical modeling of catalytic cracking" ("O matematicheskom modelirovanii kataliticheskogo krekinga"), monograph, St. Petersburg: Naukoyemkie tekhnologii, 2021, 120 p.
2. Zaikin P.V., Lysenkova S.A., Mikshina V.S. "Analytical solution of differential equation system of mathematical model of refining process kinetics", *Bulletin in Cybernetics (Vestnik kibernetiki)*, 2018, no. 2, pp. 120–126.
3. Kolinko P.A., Kozlov D.V. "Chemical kinetics in the course of physical chemistry" ("Khimicheskaya kinetika v kurse fizicheskoy khimii"), Novosibirsk, 2013, 99 p.
4. Lysenkova S.A. "On mathematical modeling of catalytic cracking", *Bulletin in Cybernetics (Vestnik kibernetiki)*, 2018, no. 4, pp. 107–110.
5. Tikhonov A.N., Arsenin V.Ya. "Methods for solving incorrectly-posed problems" ("Metody resheniya nekorrektnykh zadach"), Moscow: Nauka, 1979, 285 p.
6. Tikhonov A.N. "On incorrectly -posed problems of linear algebra and a stable method for their solution", *Papers of AN SSSR (Dokl. AN SSSR)*, 1965, vol. 163, no. 3, pp. 591–594.
7. Denisov A.M. "Introduction to the theory of inverse problems" ("Vvedenie v teoriyu obratnykh zadach"), Moscow, 1994, 208 p.
8. Kabanikhin S.I. "Inverse and incorrectly-posed problems" ("Obratnyye i nekorrektnyye zadachi"), Novosibirsk: Siberian Federal University, 2009, 457 p.

9. Olkhovoi A. "Introduction to the theory of inverse and incorrectly-posed problems" ("Vvedeniye v teoriyu obratnykh i nekorrektnykh zadach"), LAP Lambert Academic Publishing, 2012, 124 p.
10. Sumin M.M. "Tikhonov for solving operator equations of the first kind" ("Metod regularizatsii A. N. Tikhonova dlya resheniya operatornykh uravneniy pervogo roda"), Nizhniy Novgorod, 2016, 56 p.
11. Leonov A.S., Yagola A.G. "Is it possible to solve an incorrectly-posed problem without knowing the data error?", *Vestnik of MSU (Vestnik Moskovskogo universiteta)*, 1987, vol. 36, no. 4, pp. 28–33.
12. Krause P., Boyle D.P., Bäse F. "Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment", *Adv. geosci.*, 2005, vol. 5, pp. 89–97.
13. Borshch S.V., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. "Efficiency of streamflow modeling and forecasting", *Hydrometeorological Research and Forecasting (Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy)*, 2020, vol. 375, no. 1, pp. 176–189.

Submitted 29.08.2022; revised 17.10.2022

Information about the author

Le Van Huyen, graduate student, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (29 Politekhnicheskaya str., St. Petersburg 195251, Russia), tel.: +7(999)683-79-22, e-mail: huyenlevan120193@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8645-821X>

ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ НОРМАЛЕЙ НА ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЯХ МОДЕЛЕЙ ДЕТАЛЕЙ СБОРОЧНЫХ УЗЛОВ

А.Н. Юров

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: при проектировании систем, отвечающих за частичную или фрагментную автоматизацию, необходимо проведение исследований касательно тех компонентов инженерных программных продуктов, где это действительно целесообразно. Операции по работе с нормальными могут быть востребованы при задании направлений установки размеров, технических требований в составе сборочной единицы, а также анализе взаимных пересечений поверхностей моделей деталей в составе сборочных единиц при проектировании изделий. Для автоматизации процесса по внесению размеров в модель требуется корректно определять направление построения размеров, иначе размер будет скрыт формой объекта цифровой модели. Одним из вариантов решения проблемы по определению направления построения размеров является подход позиционирования нормалей к поверхности, на которой есть заданные контрольные точки, относительно которых создаются размеры. Приведены компоненты геометрического ядра, обеспечивающие разделение сборочного узла на отдельные объекты-модели, рассмотрена топология моделей, а также порядок извлечения граней из формы модели. Определена схема разработки программного решения для разработки программного приложения. Создан автономный пользовательский интерфейс приложения с реализацией построения нормалей средствами Open CASCADE. Реализация выполнена для операционных систем Linux с 64-разрядной архитектурой

Ключевые слова: представление моделей, моделирование процессов и систем, построение нормали к поверхности, цифровые макеты изделий, геометрическое ядро Open Cascade, операционные системы с открытым исходным кодом

Введение

Системы моделирования позволяют выполнить реализацию этапа проектирования в процессе производства изделий [10,11]. Проектирование выполняется как в основной программной системе, так и построенных на ее основе компонентных модулей. Часто отдельные специализированные модули используют импорт данных для того, чтобы произвести анализ отдельных деталей или узлов, создать управляющие программы для твердотельных моделей и многое другое.

При проектировании систем, отвечающих за частичную или полную автоматизацию, необходимо проведение исследований касательно предметной области автоматизации. Например, для подготовки конструкторской документации необходимы чертежи с нанесёнными размерами и техническими требованиями.

Получение видов для чертежа можно выполнить с имеющейся твердотельной модели. Отдельные виды получить сечением. А размеры извлечь исходя из того факта, что в цифровом аналоге реального изделия уже есть

информация обо всех геометрических атрибутах объекта. Однако следует отметить, что при извлечении такой информации и отрисовке размера потребуется дополнительная работа по определению направления построения размера. Ведь если линии и обозначения размера будут скрыты топологическими элементами этой же модели, вопрос автоматизации по заданной проблеме останется открытым.

Одним из вариантов решения по определению направления построения размеров является поиск нормалей к поверхности, на которой есть заданные контрольные точки, относительно которых создаются размеры. Для эскизов на плоскости такие точки имеются, а в плоскости нормали строятся относительно заданных отрезков и представляют собой перпендикуляр.

В большинстве случаев при рассмотрении проблем в системах, связанных с моделированием, опираются на их функциональные возможности для решения определенного класса задач [4-9]. Нахождение и построение нормалей, как отмечалось ранее, является задачей вспомогательной и, как вариант, такое знание может помочь в

автоматическом построении и размещении размеров для деталей. Более широкие задачи могут возникнуть при решении проблем, связанных с пространственными ограничениями или взаимосвязями на плоскости. В этом случае потребуется программное обеспечение, которое обеспечивает необходимый функционал, называемый решателем (Solver).

Инструменты геометрического ядра для проектного решения

Набор решений, который сократит трудоёмкость при разработке, можно найти в виде функциональных классов, входящих в состав геометрического ядра Open CASCADE [1-3].

```
class TopExp_Explorer
```

Функционал класса представлен инструментами для получения состава топологических данных из пакета TopoDS.

Диаграмма класса и подключение его к проекту показаны на рис. 1.

```
#include <TopExp_Explorer.hxx>
```

Inheritance diagram for TopExp_Explorer:

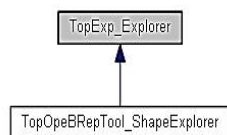


Рис. 1. Получение состава топологических элементов

```
class GeomLProp_SLProps
```

Функционал класса реализует инициализацию локальных свойств поверхности <S> для значений параметров (<U>, <V>). Текущая точка и производные вычисляются одновременно, что позволяет оптимизировать время вычислений. Определяет максимальное количество производных, которые должны быть использованы в работе (0, 1 или 2).

```
class GProp_GProps
```

Класс реализует общий механизм для вычисления глобальных свойств "сложной геометрической системы" в 3D пространстве путем композиции глобальных свойств "элементарных геометрических сущностей", таких как кривая, поверхность, твердое тело, набор точек. Можно также компоновать

свойства нескольких "составных геометрических систем" (рис. 2).

```
#include <GProp_GProps.hxx>
```

Inheritance diagram for GProp_GProps:

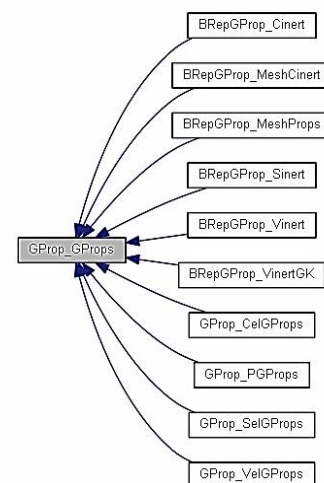


Рис. 2. Диаграмма класса GProp_GProps

Handle(AIS_Line) aVecAIS = new AIS_Line (pnt1,pnt2) – инструкция обеспечивает создание отрезков в контексте отображения визуализатора геометрического ядра с различными атрибутами.

Проектирование модуля

В процессе разработки модуля по работе с нормальными следует ориентироваться на основную задачу проекта - поиск и получение нормалей для заданной (любой) грани цифрового двойника детали, входящей в состав сборочного узла. Следует заранее подготовить несколько сборочных конструкций с разноплановой поверхностной геометрией деталей, чтобы протестировать ряд граней на предмет работы с ними. Проблема заключается в том, что при импорте сборок некоторые поверхности могут быть геометрически искажены (или разбиты на несколько элементов), что позволит неправильно интерпретировать работу с гранями, и, как следствие, отображать неверно нормали.

Загрузку моделей в модуль можно выполнить, используя экспортный формат step и несколько несложных сборочных единиц, детали которых имеют преимущественно плоские поверхности. Используем следующий подход к визуализации сборочных узлов: "Открытие через стандартный диалог сборки в формате step" → "Разбор компонентов и получение некоторого объекта в памяти" →

“Рендер объекта (настройки)” →
“Визуализация объекта”.

После того, как сборка загружена и показана в окне, необходимо сформировать список входящих в нее компонентов с возможностью их удаления (скрытия). Удаление потребуется для того, чтобы была возможность добраться до деталей, которые скрыты другими элементами.

Также необходимо в приложении организовать работу с просмотром сборок, их вращением, перемещением и представлением в аксонометрическом виде. Эти процедуры требуются в работе оператора, чтобы имелась возможность посмотреть на результаты программной системы.

Кроме того, следует спроектировать класс (или группу методов), в котором обеспечивается автоматический и интерактивный режим построения нормалей к заданным граням объектов. Компоновка программной системы, исходя из вышесказанного, может выглядеть так, как показано на рис. 3.

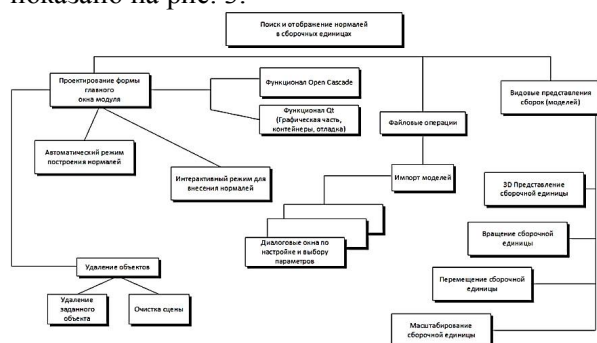


Рис. 3. Компоновка модуля программного решения

Опираясь на вышеперечисленные материалы, был разработан метод построения нормали к заданной грани, который обеспечивает направление вектора нормали всегда во внешнее пространство относительно заданного топологического элемента твердотельной модели.

Результаты работы приложения по построению нормалей при использовании автоматического режима разбора на топологические элементы всех поверхностей моделей, которые входят в состав сборочного узла, показаны на рис. 4.

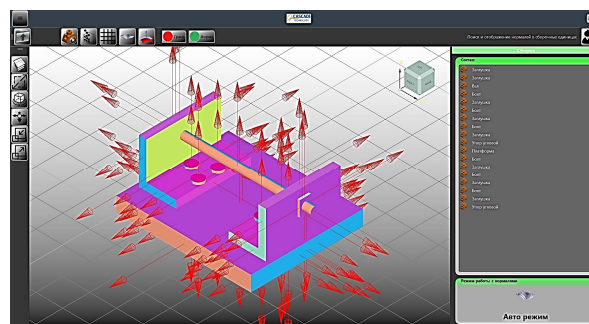


Рис. 4. Автоматический режим по построению нормалей для каждой поверхности модели в составе сборки

На рис. 5 показан режим по интерактивному размещению нормалей для сборок.

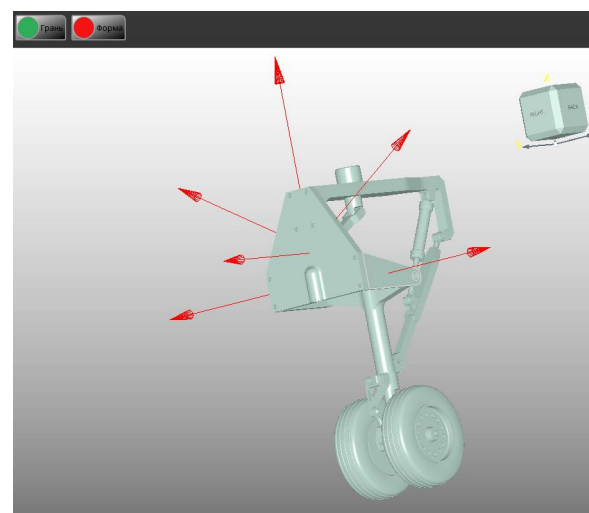


Рис. 5. Интерактивный режим по построению нормалей для заданной поверхности модели в сборке

Для построения требуется выбрать режим по работе с гранями тела, выделить грань, убедившись, что сработало выделение, и воспользоваться функционалом по внесению нормали к выбранной грани.

Заключение

Модуль позволяет в автоматическом или интерактивном режимах выполнить построение нормалей к топологическим поверхностям моделей в составе сборочного узла, реализация которого построена на методах и классах геометрического ядра Open CASCADE.

Для позиционного расположения нормали был подготовлен метод, обеспечивающий направление вектора нормали всегда во внешнее пространство

относительно заданного топологического элемента твердотельной модели.

Программное решение обладает развитыми средствами интерактивности в работе с цифровыми макетами изделий. Выбор варианта работы с нормальными осуществляется посредством указания типа действия на отдельной инструментальной панели.

Приложение включает в себя полный набор динамических библиотек и зависимостей для обеспечения автономности в процессе работы.

Основные возможности:

- загрузка моделей в экспортном формате. step;
- получение перечня деталей в составе сборочной единицы;
- интерактивная подсветка деталей в составе сборочной единицы при выборе;
- видовые изменения для сборочного узла (масштабирование, 3D проекция, перемещение и вращение всех компонентов);
- автоматический режим подготовки и построения нормалей на поверхностях деталей, входящих в состав сборочного узла;
- интерактивный режим подготовки и построения нормалей на поверхностях деталей, входящих в состав сборочного узла;
- выбор режима по сегментации объектов (форма-грань);
- интерактивные инструкции в процессе работы.

Актуальность разработки состоит в создании отечественного ПО и некоторого функционала программных решений по моделированию для операционных систем с открытым исходным кодом.

Литература

1. Горбачев И.В., Похилько А.Ф. Представление модели в среде построения функционально адаптированных САПР на базе Open CASCADE //

Вестник Ульяновского государственного технического университета. 2007. № 3 (39). С. 32-35.

2. Сафаров Е.Т. Основные модули Open CASCADE и их назначение // Современные материалы, техника и технология: материалы 3-й Междунар. науч.-практ. конф. Курск, 2013. С. 320-322.

3. Еремин И.А., Чижов М.И. Проектирование винтовых деталей с помощью открытого ядра Open CASCADE // Насосы. Турбины. Системы. 2014. № 2 (11). С. 39-42.

4. Цыганков Д.Э. Технология структурно-семантического 3D-моделирования в комплексном процессе конструирования // Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей». 2017. № 4. С. 91-97.

5. Цыганков Д.Э., Похилько А.Ф. Отображение структуры проектируемого изделия в процессе построения 3D-модели // Перспективные информационные технологии (ПИТ-2017): тр. Междунар. науч.-техн. конф./ под ред. С.А. Прохорова. Самара: Издательство Самарского научного центра РАН, 2017. С. 1030-1033.

6. Рыжков В.А. Разработка системы визуализации разнородных данных цифрового макета изделия // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № 4-3. С. 634-637.

7. Реализация методики создания 3D параметрических моделей типовых деталей узлов авиационных конструкций в среде Siemens NX / Е.С. Горячкин, А.И. Рязанов, А.В. Урлапкин, Л.А. Чемпинский // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2012. № 5-2 (36). С. 187-193.

8. Похилько А.Ф., Цыганков Д.Э. Отображение функциональной структуры проектируемого изделия в дереве построения его 3D-модели // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2017. Т. 19. №1 (2). С. 424-427.

9. Погребняк Г.Е. 3D-моделирование конструкторски сложных узлов изделий машиностроения на ранних этапах анализа и проектирования //САПР и Графика. 2017. № 3. С. 59-63.

10. Alemanni M., Destefanis F., Vezzetti E. Model-based Definition Design in the Product Lifecycle Management Scenario // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2011. Vol. 52. № 1-4. P. 1-14.

11. Advances in Parameterized CAD Feature Translation / S. Bondar, A. Shammaa, J. Stjepandić, K. Tashiro // Transdisciplinary Lifecycle Analysis of Systems: Proceedings of the 22nd ISPE Inc. International Conference on Concurrent Engineering, IOS Press, Amsterdam, 2015. P. 615-624.

Поступила 05.09.2022; принята к публикации 10.10.2022

Информация об авторах

Юров Алексей Николаевич – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kitp@vorstu.ru, тел. +7(951)548-63-12

POSITIONING NORMALS ON THE TOPOLOGICAL SURFACES OF ASSEMBLY PART MODELS

A.N. Yurov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: when designing systems that are responsible for partial or fragmented automation, it is necessary to conduct research regarding those components of engineering software products, where it is really expedient. Operations with normals can be in demand when setting dimensional directions, technical requirements as part of an assembly unit, as well as the analysis of mutual intersections of surfaces of part models as part of assembly units in the design of products. To automate the process of entering dimensions into a model, it is necessary to correctly determine the dimensioning direction, otherwise the dimension will be hidden by the shape of the digital model object. One solution to the problem of determining the direction of dimensioning is the approach of positioning normals to the surface, on which I give control points, relative to which I created the dimensions. I considered in the work the components of the geometric kernel, providing the division of the assembly unit into separate object-models, the topology of models, as well as the order of facet extraction from the form of the model. I defined the scheme for developing a software solution to develop a software application. I created an autonomous user interface of the application with the implementation of normals construction by means of Open CASCADE. I performed implementation for Linux operating systems with 64-bit architecture

Key words: model representation, surface normal construction, digital product layouts, Open Cascade geometric kernel, open-source operating systems

References

1. Gorbachev I.V., Pokhil'ko A.F. "Model representation in the environment of building functionally adapted CAD on the basis of Open CASCADE", *Bulletin of Ulyanovsk State Technical University (Vestnik Ul'yanovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2007, no. 3 (39), pp. 32-35.
2. Safarov E.T. "Main modules of Open CASCADE and their purpose", *Proc. of the 3rd International Scientific-Practical Conf.: Modern Materials, Technology and Technology (Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologiya)*, 2013, pp. 320-322.
3. Eremin I.A., Chizhov M.I. "Designing screw parts using the Open CASCADE kernel", *Pumps. Turbines. Systems (Nasosy. Turbiny. Sistemy)*, 2014, no. 2 (11), pp. 39-42.
4. Tsygankov D.E. "The technology of structural-semantic 3D-modeling in the complex design process", *Bulletin of Concern VKO "Almaz-Antey" (Vestnik Kontserna VKO «Almaz-Antey»)*, 2017, no. 4, pp. 91-97.
5. Tsygankov D.E., Pokhilko A.F. "Displaying the structure of the designed product in the process of building a 3D model", *Proc. of the Int. Sc. and Tech. Conf.: Perspective Information Technologies (PIT-2017)*, Samara Scientific Center RAS Publishing House, 2017, pp. 1030-1033.
6. Ryzhkov V.A. "Development of visualization system of heterogeneous data of the digital layout of the product", *News Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk)*, 2016, vol. 18, no. 4-3, pp. 634-637.
7. Goryachkin E.S., Ryazanov A.I., Urlapkin A.V., Chempinskiy L.A. "Implementation of methods for creating 3d parametric models of typical parts of aircraft structures in Siemens NX", *Bulletin of Samara University. Aerospace Engineering, Technology and Mechanical Engineering (Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroyeniye)*, 2012, no. 5-2 (36), pp. 187-193.
8. Pokhilko A.F., Tsygankov D.E. "Display of functional structure of the designed product in the tree of its 3D-model", *News Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk)*, 2017, vol. 19, no. 1 (2), pp. 424-427.
9. Pogrebnyak G.E. "3D-modeling of design-complex units of mechanical engineering products at the early stages of analysis and design", *CAD and Graphic Design (SAPR i Grafika)*, 2017, no. 3, pp. 59-63.
10. Alemanni M., Destefanis F., Vezzetti E. "Model-based definition design in the product lifecycle management scenario", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, vol. 52. No. 1-4, pp. 1-14.
11. Bondar S., Shammaa A., Stjepandić J., Tashiro K. "Advances in parameterized CAD feature translation", *Transdisciplinary Lifecycle Analysis of Systems: Proceedings of the 22nd ISPE Inc. International Conference on Concurrent Engineering*, IOS Press, Amsterdam, 2015, pp. 615-624.

Submitted 05.09.2022; revised 10.10.2022

Information about the author

Aleksey N. Yurov, Cand. Sci. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kitp@vorstu.ru, tel.: +7 (951) 548-63-12

ПРЯМАЯ И ОБРАТНАЯ ЗАДАЧИ ДЛЯ ПАССИВНЫХ ЗОН КОНВЕЙЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ПРОТЯЖЕННОГО ОБЪЕКТА

Н.М. Мишачев, А.М. Шмырин, И.И. Супрунов

Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия

Аннотация: рассматривается задача аддитивной конвейерной обработки протяженного объекта при наличии трех последовательных зон конвейера. Первая и третья зоны являются пассивными, в этих зонах изменение свойств объекта описывается некоторым локальным детерминированным законом, примером которого является уравнение теплопроводности. Аддитивная обработка объекта происходит во второй, активной зоне. Алгоритм обработки был описан ранее в статьях авторов. Исходными данными для алгоритма являются профили свойств объекта на выходе из первой зоны и на входе в третью. В то же время исходными данными общей задачи являются другие профили, а именно, профили свойств объекта на входе в первую зону и на выходе из третьей зоны. Для нахождения двух требуемых профилей нужно решить прямую задачу для детерминированного самодействия объекта в первой пассивной зоне конвейера и обратную задачу для самодействия в третьей пассивной зоне. Движение объекта можно описывать в координатах Лагранжа (т.е. в системе координат объекта) или в координатах Эйлера (т.е. в системе координат конвейера). В данной работе для решения прямой и обратной задач используются координаты Эйлера

Ключевые слова: конвейерная обработка, пассивные зоны, прямая и обратная задачи

Введение

Настоящая работа продолжает цикл работ [1]-[4], стимулом для которых послужила задача моделирования процесса принудительного охлаждения полосы горячей прокатки на отводящем рольганге посредством душирующих установок – см., например, [5]-[8]. В работах [1]-[4] рассматривалась абстрактная и значительно упрощенная одномерная версия этой задачи, которая в силу общности постановки может быть полезна и в других случаях, например в задачах логистики. Моделируется абстрактный процесс последовательной (конвейерной) аддитивной обработки движущегося одномерного протяженного объекта или серии движущихся точечных объектов однотипными неподвижными устройствами конвейера. Предполагается, что профиль свойств объекта, разделенного на условные последовательные фрагменты, на входе в конвейер описывается некоторой дискретной функцией или дискретным одномерным случайным процессом и, в общем случае, объект обладает локальным самодействием. Профиль свойств объекта на выходе из конвейера считается заданным. По аналогии с процессом охлаждения полосы на отводящем рольганге условный конвейер считается разделенным на три последовательные зоны, при этом активной зоной или зоной обра-

ботки является только вторая зона. В задаче охлаждения полосы этой зоне соответствует зона душирующих установок. Аддитивность обработки означает, что значения управляющих воздействий устройств активной зоны прибавляются к профилю свойств объекта. В пассивных зонах изменение свойств объекта является результатом только самодействия. В исходной задаче охлаждения полосы горячей прокатки случайный процесс – это регистрируемая пирометром температура на входе, а локальное самодействие соответствует теплообмену (внутреннему и с окружающей средой), то есть описывается уравнением теплопроводности.

В работах [1], [2] были предложены две дискретные окрестностные модели для задачи конвейерной обработки движущейся полосы. В модели Эйлера использовались координаты Эйлера, связанные с неподвижным конвейером, в модели Лагранжа использовались координаты Лагранжа, связанные с движущейся полосой. Оказалось, что модель Эйлера более удобна для описания алгоритма обработки, изложенного в [3] и более подробно в [4]. Целью алгоритма обработки, то есть управления режимами включения-выключения устройств активной зоны, является достижение или, по крайней мере, аппроксимация некоторого заранее заданного профиля свойств объекта на выходе из конвейера. В задаче охлаждения полосы горячей прокатки такой целью является аппроксимация требуемого профиля температуры смотки при

сходе с рольганга, этот профиль должен обеспечивать достаточную равномерность дальнейшего охлаждения рулона. Исходными данными для алгоритма, описанного в работах [3],[4], являются профили свойств объекта на входе в активную зону и на выходе из активной зоны. Предполагается, что исходными данными общей задачи являются профили свойств объекта на входе в конвейер и на выходе из конвейера. При прохождении пассивных зон профиль свойств объекта изменяется детерминировано, в результате самодействия. Таким образом, мы имеем две дополнительные задачи для пассивных зон конвейера: прямую задачу для первой зоны и обратную для третьей. В работах [3],[4] эти задачи были поставлены, но решение не обсуждалось. В данной работе мы обсуждаем решения прямой и обратной задач в рамках описанной ранее дискретной окрестностной модели Эйлера. В связи с построением дискретной модели (для процесса типа процесса теплообмена) непосредственно, а не в результате дискретизации непрерывной модели, уместно напомнить мнение А.Н. Колмогорова о дискретных и непрерывных моделях, высказанное им в статье [9]: «Реальный процесс теплопроводности не более похож на свою непрерывную модель, чем на дискретную модель».

Фазовые и динамические окрестностные структуры

Модели конвейерной обработки, построенные в работах [1]-[4], основаны на понятии окрестностной структуры и окрестностной системы. Напомним (см. [10], [11]), что окрестностная структура представляет собой оснащенный орграф, с вершинами которого ассоциированы переменные (скалярные или векторные) моделируемого объекта. Все вершины орграфа разделяются на входы, узлы и выходы. На рисунках входы и выходы мы изображаем квадратами, узлы – окружностями. Абстрактная окрестностная система или, в терминологии [11], окрестностная «метасистема» состоит из статических или динамических уравнений связи между переменными модели и однозначно определяется окрестностной структурой. Абстрактная окрестностная система является прототипом конкретной окрестностной системы, в которой типы уравнений (линейные, полиномиальные или какие-либо другие) уже заданы полностью или с точностью до неизвестных параметров. Окрестностные структуры и си-

стемы являются удобным способом представления системы управления в пространстве состояний в случае, когда зависимости между переменными являются разреженными, например, в линейном случае это системы с разреженной матрицей коэффициентов. Окрестностные структуры, соответствующие дискретным динамическим системам, обычно представляют собой произведения фазовой окрестностной структуры на конечное или счетное множество моментов времени, при этом все дуги фазовой структуры получают дополнительную составляющую, соответствующую сдвигу по времени – см. пример перехода на рис. 1.

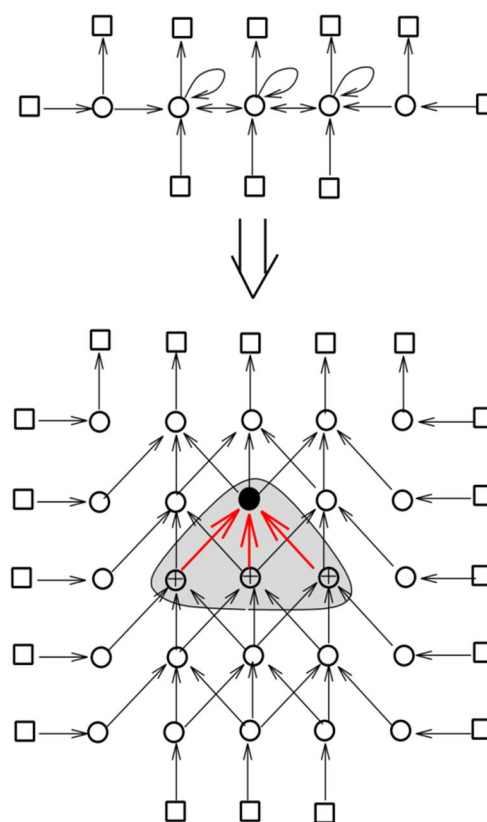


Рис. 1. Фазовая и соответствующая динамическая окрестностные структуры

Заметим, что петли фазовой структуры становятся вертикальными дугами динамической. На рис. 1 мы дополнительно предполагаем, что нижние входы фазовой структуры действуют только в начальный момент времени, а верхние выходы – только в конечный момент времени. Без этого условия дуги от каждого нижнего входа динамической структуры должны были бы идти в каждый из вертикально расположенных над ним узлов и, в свою очередь, каждый из этих узлов должен был бы иметь дугу, идущую в расположенный над ним вы-

$$\left\{ \begin{array}{l}
X^t(0) = \tilde{U}^t, \\
t = 0, \dots, N-1 \\
X^1(1) = F_1^0(X^0(0)) \\
X^{t+1}(1) = F_1^t(X^t(0), X^t(1)), \\
t = 1, \dots, N-1 \\
X^2(2) = F_2^1(X^1(0), X^1(1)) \\
X^{t+1}(2) = F_2^t(X^t(0), X^t(1), X^t(2)), \\
t = 2, \dots, N-1 \\
X^{N+1}(2) = F_2^N(X^N(1), X^N(2)) \\
X^3(3) = F_3^2(X^2(1), X^2(2)) \\
X^{t+1}(3) = F_3^t(X^t(1), X^t(2), X^t(3)), \\
t = 3, \dots, N \\
X^{N+2}(3) = F_3^{N+1}(X^{N+1}(2), X^{N+1}(3)) \\
X^4(4) = F_4^3(X^3(2), X^3(3), \tilde{U}^3(3)) \\
X^{t+1}(4) = F_4^t(X^t(2), X^t(3), X^t(4), \tilde{U}^t(3)), \\
t = 4, \dots, N+1 \\
X^{N+3}(4) = F_4^{N+2}(X^{N+2}(3), X^{N+2}(4), \tilde{U}^{N+2}(3)) \\
X^5(5) = F_5^4(X^4(3), X^4(4), \tilde{U}^4(4)) \\
X^{t+1}(5) = F_5^t(X^t(3), X^t(4), X^t(5), \tilde{U}^t(4)), \\
t = 5, \dots, N+2 \\
X^{N+4}(5) = F_5^{N+3}(X^{N+3}(4), X^{N+3}(5), \tilde{U}^{N+3}(4)) \\
X^6(6) = F_6^5(X^5(4), X^5(5)) \\
X^{t+1}(6) = F_6^t(X^t(4), X^t(5), X^t(6)), \\
t = 6, \dots, N+3 \\
X^{N+5}(6) = F_6^{N+4}(X^{N+4}(5), X^{N+4}(6)), \\
W^t = X^t(6) \\
t = 6, \dots, N+5.
\end{array} \right.$$

Эта система, очевидно, не совпадает с динамической окрестностной системой, записанной формально по фазовой окрестностной структуре. Таким образом, в задаче с движением объекта фазовая окрестностная структура (и в модели Эйлера, и в модели Лагранжа) не дает полной информации об окрестностной системе. Чтобы формально (используя только дуги и узлы окрестностной структуры) записать адекватную задаче систему, нужно построить полную динамическую окрестностную структуру модели.

Динамическая окрестностная модель для пассивных зон конвейера

В работах [3], [4] было сделано упрощающее предположение о малом влиянии самодействия объекта на процесс обработки в ак-

тивной зоне конвейера. Соответствующая этому предположению редуцированная фазовая окрестностная структура изображена на рис. 3.

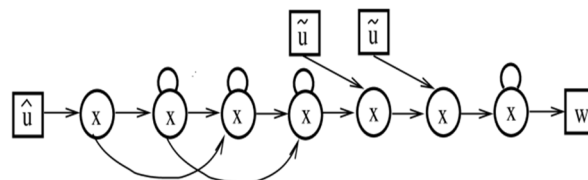


Рис. 3. Фазовая окрестностная структура модели Эйлера ($n_1 = n_2 = n_3 = 2$) при отсутствии самодействия в активной зоне

Это упрощение позволило описать алгоритм обработки объекта в активной зоне без построения динамической окрестностной структуры, только на основании фазовой. Для решения прямой и обратной задач самодействия объекта в пассивных зонах конвейера нам все же потребуется динамическая структура модели Эйлера, но только ее часть, соответствующая пассивным зонам. Более того, поскольку мы предполагаем, что законы самодействия в пассивных зонах являются локальными, то есть на каждый узел влияет только он сам и два соседних узла, то динамические структуры в двух пассивных зонах не отличаются и потому достаточно рассмотреть одну пассивную зону и решить для нее прямую и обратную задачи.

Далее мы рассматриваем конвейер, состоящий только из одной пассивной зоны. Для случая пяти узлов конвейера (включая нулевой – копию входа) и объекта, состоящего из десяти фрагментов (то есть $n = 4$ и $N = 10$), динамическая окрестностная структура модели Эйлера представлена на рис. 4. В верхней части рисунка для наглядности изображена исходная фазовая окрестностная структура.

В общем случае значения переменных в k -том столбце динамической окрестностной структуры образуют профиль свойств объекта при прохождении фазового узла x_k , то есть вектор

$$\bar{X}(k) = [X^{k+1}(k), \dots, X^{k+N}(k)]^T.$$

В частности, $\bar{X}(0) = \bar{U}$ – это профиль свойств на входе, и $\bar{X}(n) = \bar{W}$ – это профиль свойств на выходе. Можно считать, что все профили $\bar{X}(0), \dots, \bar{X}(n)$ являются векторами одного и того же пространства $\mathbb{R}^n$. Это соответствует «выпрямлению» динамической структуры преобразованием $(t, x) \rightarrow (t - x, x)$, см. рис. 5, и

будет особенно полезно для анализа линейных моделей.

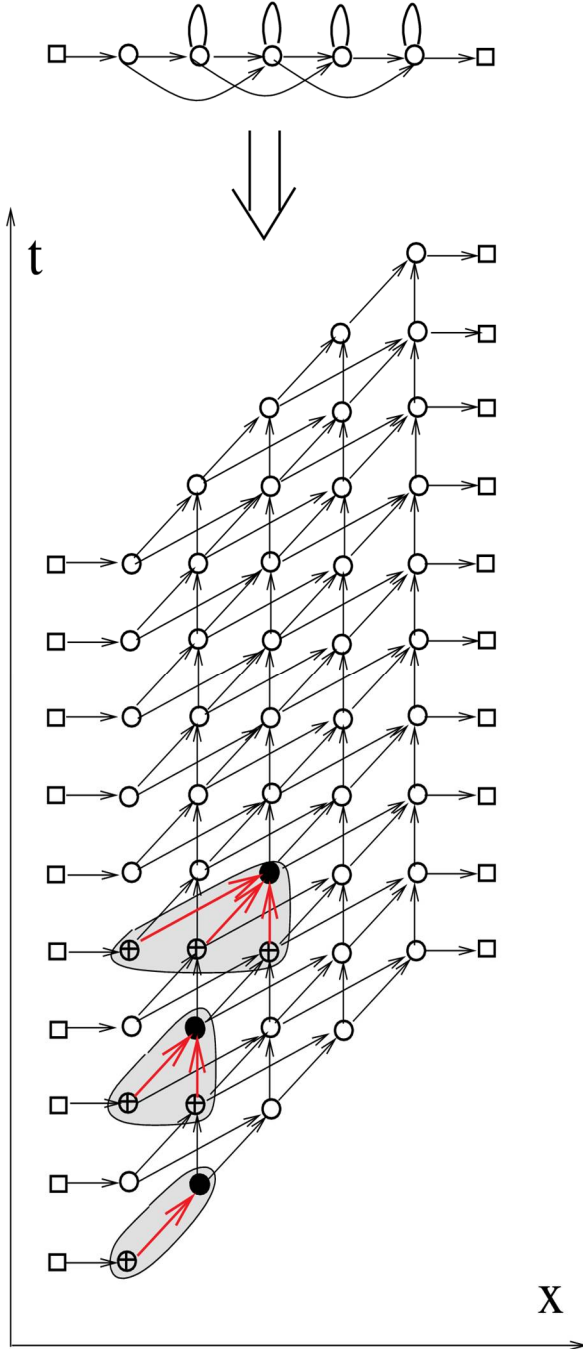


Рис. 4. Динамическая окрестностная структура пассивной зоны в модели Эйлера, $n = 4$, $N = 10$.

Решение прямой и обратной задач в общем случае

Локальное самодействие объекта в векторных обозначениях описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \bar{X}(1) = \bar{F}_1(\bar{X}(0), \bar{X}(1)) \\ \bar{X}(k) = \bar{F}_k(\bar{X}(k-2), \bar{X}(k-1), \bar{X}(k)) \quad (*) \\ k = 2, \dots, n \end{cases}$$

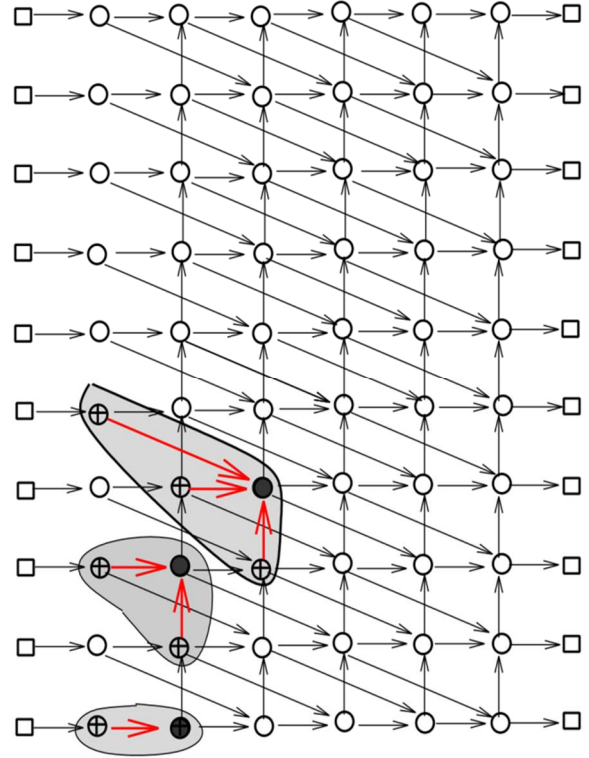


Рис. 5. Динамическая окрестностная структура после выпрямления $(t, x) \rightarrow (t - x, x)$

В данной векторной записи специфика рассматриваемой окрестностной системы частично теряется, тем не менее, запись полезна тем, что позволяет решить прямую и обратную задачи в общем виде. Решая уравнения системы относительно $\bar{X}(1)$ и $\bar{X}(k)$ (в предположении, что это возможно), мы получаем систему

$$\begin{aligned} \bar{X}(1) &= \bar{G}_1(\bar{X}(0)) \\ \bar{X}(k) &= \bar{G}_k(\bar{X}(k-2), \bar{X}(k-1)) \\ k &= 2, \dots, n \end{aligned}$$

Заметим, что если самодействие инвариантно относительно сдвигов по длине объекта, то $\bar{G}_k = \bar{G}$, то есть операторы $\bar{G}_k$ не зависят от $k = 2, \dots, n$. Рекуррентно определяются операторы

$$\begin{aligned} \bar{R}_1(\bar{X}(0)) &= \bar{G}_1(\bar{X}(0)) \\ \bar{R}_2(\bar{X}(0)) &= \bar{G}_2(\bar{X}(0), \bar{R}_1(\bar{X}(0))) \\ \bar{R}_3(\bar{X}(0)) &= \bar{G}_3(\bar{R}_1(\bar{X}(0)), \bar{R}_2(\bar{X}(0))) \\ &\dots \\ \bar{R}_n(\bar{X}(0)) &= \bar{G}_n(\bar{R}_{n-2}(\bar{X}(0)), \bar{R}_{n-1}(\bar{X}(0))) \end{aligned}$$

Построенный оператор $\bar{R}_n$ решает прямую задачу,

$$\bar{W} = \bar{X}(n) = \bar{R}_n(\bar{X}(0));$$

обратный оператор $\bar{R}_n^{-1}$ решает обратную задачу,

$$X(0) = \bar{R}_n^{-1}(X(n)) = \bar{R}_n^{-1}(\bar{W}).$$

Решение прямой и обратной задач для линейных систем

В случае линейных моделей введенная выше векторной запись системы (*) позволяет полностью учесть специфику задачи. Для записи линейной системы нам потребуются матрицы

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \text{ и } S^T = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Система (*) в линейной версии на основании структуры, изображенной на рис. 5, может быть записана в виде

$$\begin{aligned} \bar{X}(1) &= B_1 \bar{X}(0) + C_1 S \bar{X}(1) \\ \bar{X}(k) &= A_k S^T \bar{X}(k-2) + B_k \bar{X}(k-1) + C_k S \bar{X}(k) \\ k &= 2, \dots, n \end{aligned}$$

где B_1, C_1, A_k, B_k, C_k – квадратные матрицы порядка n . В простейшем случае (аналогичном разностным схемам) эти матрицы заменяются числами, самодействие инвариантно относительно сдвигов по длине объекта, и мы получаем систему

$$\begin{aligned} \bar{X}(1) &= \lambda \bar{X}(0) + \mu S \bar{X}(1) \\ \bar{X}(k) &= \alpha S^T \bar{X}(k-2) + \beta \bar{X}(k-1) + \gamma S \bar{X}(k) \\ k &= 2, \dots, n \end{aligned}$$

Операторы $\bar{G}_1$ и $\bar{G}$ имеют вид

$$\begin{aligned} \bar{X}(1) &= \lambda(E - \mu S)^{-1} \bar{X}(0) \\ \bar{X}(k) &= (E - \gamma S)^{-1} (\alpha S^T \bar{X}(k-2) + \beta \bar{X}(k-1)) \\ k &= 2, \dots, n \end{aligned}$$

Далее операторы $\bar{R}_n$ и $\bar{R}_n^{-1}$ могут быть вычислены рекуррентно по формулам, указанным выше.

Заключение

Статья дополняет исследования, проведенные ранее авторами в [1]-[4]. Описан метод решения прямой и обратной задач для пассивных зон конвейера, позволяющий найти начальные данные для алгоритма управления обработкой протяженного объекта в активной зоне конвейера, предложенного в [4].

Литература

1. Мишачев Н.М., Шмырин А.М., Супрунов И.И. Окрестностные структуры для модели конвейерной обработки протяженного объекта // Вестник Липецкого государственного технического университета. 2020. № 1(42). С. 22-27.
2. Mishachev N.M., Shmyrin A.M., Suprunov I.I. Simulation of sequential processing of a moving extended object // International Transaction Journal of Engineering, Management and Applied Sciences and Technologies. 2020. Vol. 11. № 7. P. 1107
3. Шмырин А.М., Мишачев Н.М., Супрунов И.И. Окрестностное моделирование конвейерной обработки стохастического потока данных // Системы управления и информационные технологии. 2021. № 2(84). С. 19-22.
4. Mishachev N., Shmyrin A., Suprunov I. Generating Schedule in Linear Additive Neighborhood Model // Proceedings - 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2021 (3). P. 15-18.
5. Filipczyk W., Fredrick W., Chang Fu-Hsiang. Advanced control of coiling temperature in China steel's hot mill // 12th IFAC Symposium on Automation in Mining, Mineral and Metal Processing. 2007. Vol. 40. Issue 11. P. 421-426.
6. Simulation of accelerated strip cooling on the hot rolling mill run-out roller table/ U. Muhin, S. Belskij, E. Makarov, T. Koynov // Frattura ed Integrita Strutturale. 2016. Vol. 10. Issue 37. P. 305-311.
7. Koinov T., Kihara J. Process Optimization for Hot Strip Mill // Trans. of the ISI of Japan, 1986. P. 895-902.
8. Method of calculating the cooling of steel strips on the collecting roller table/ G.S. Senichev, G.A. Medvedev, S.A. Denisov, A.G. Medvedev // Steel. 2007. №2. P. 77-78.
9. Колмогоров А.Н. Комбинаторные основания теории информации // Успехи математических наук. 1983. №38(4). С. 27-36.
10. Мишачев Н.М., Шмырин А.М. Окрестностные структуры и метаструктурная идентификация // Таврический вестник информатики и математики. 2017. Т. 37. Вып. 4. С. 87-95.
11. Мишачев Н.М., Шмырин А.М. Метаструктурная идентификация. Воронеж: Ритм, 2019. 189 с.

Поступила 01.08.2022; принята к публикации 17.10.2022

Информация об авторах

Мишачев Николай Михайлович – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры высшей математики, Липецкий государственный технический университет (398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, д. 30), e-mail: nmish52@mail.ru

Шмырин Анатолий Михайлович – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой высшей математики, Липецкий государственный технический университет (398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, д. 30), e-mail: amsh46@mail.ru

Супрунов Игорь Иванович – старший преподаватель кафедры высшей математики, Липецкий государственный технический университет (398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, д. 30), e-mail: i.i.suprunov@yandex.ru

DIRECT AND INVERSE PROBLEMS FOR PASSIVE ZONES OF CONVEYOR PROCESSING OF EXTENDED OBJECT

N.M. Mishachev, A.M. Shmyrin, I.I. Suprunov

Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

Abstract: the paper considers the problem of additive conveying processing of an extended object in the presence of three successive conveyor zones. The first and third zones are passive, in these zones the change in the properties of the object is described by some local deterministic law, an example of which is the heat equation. Additive processing of the object takes place in the second, active zone. The processing algorithm was described earlier in the articles of the authors. The initial data for the algorithm are the profiles of the properties of the object at the exit from the first zone and at the entrance to the third. At the same time, the initial data of the general problem are other profiles, namely, the profiles of the properties of the object at the entrance to the first zone and at the exit from the third zone. To find the two required profiles, it is necessary to solve the direct problem for the deterministic self-action of the object in the first passive zone of the conveyor and the inverse problem for the self-action in the third passive zone. The movement of an object can be described in Lagrange coordinates (i.e. in the object coordinate system) or in Euler coordinates (i.e. in the conveyor coordinate system). In this paper, the Euler coordinates are used to solve direct and inverse problems

Key words: conveyor processing, passive zones, direct and inverse problems

References

1. Mishachev N.M., Shmyrin A.M., Suprunov I.I. "Neighborhood structures for a model of conveyor processing of an extended object", *Bulletin of Lipetsk State Technical University (Vestnik Lipetskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2020, no. 1(42), pp. 22-27.
2. Mishachev N.M., Shmyrin A.M., Suprunov I.I. "Simulation of sequential processing of a moving extended object", *Int. Transaction J. of Engineering, Management and Applied Sciences and Technologies*, 2020, vol. 11, no 7, pp. 1107
3. Shmyrin A.M., Mishachev N.M., Suprunov I.I. "Neighborhood modeling of conveyor processing of stochastic data flow", *Control Systems and Information Technologies (Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii)*, 2021, no. 2(84), pp. 19-22.
4. Mishachev N., Shmyrin A., Suprunov I. "Generating schedule in linear additive neighborhood model", *Proc. of 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA*, 2021, no. (3), pp. 15-18.
5. Filipczyk W., Fredrick W., Chang Fu-Hsiang "Advanced control of coiling temperature in China steel's hot mill", *12th IFAC Symposium on Automation in Mining, Mineral and Metal Processing*, 2007, vol. 40, issue 11, pp. 421-426.
6. Muhin U., Belskij S., Makarov E., Koynov T. "Simulation of accelerated strip cooling on the hot rolling mill run-out roller table", *Frattura ed Integrita Strutturale*, 2016, vol. 10, issue 37, pp. 305-311.
7. Koinov T., Kihara J. "Process optimization for hot strip mill", *Trans. of the ISI of Japan*, 1986, pp. 895-902.
8. Senichev G.S., Medvedev G.A., Denisov S.A., Medvedev A.G. "Method of calculating the cooling of steel strips on the collecting roller table", *Steel*, 2007, no. 2, pp. 77-78.
9. Kolmogorov A.N. "Combinatorial foundations of information theory", *Advances in Mathematical Sciences (Uspekhi matematicheskikh nauk)*, 1983, no. 38(4), pp. 27-36.
10. Mishachev N.M., Shmyrin A.M. "Neighborhood structures and metastructural identification", *Taurida Journal of Computer Science Theory and Mathematics (Tavricheskiy vestnik informatiki i matematiki)*, 2017, vol. 37, no. 4, pp. 87-95.
11. Mishachev N.M., Shmyrin A.M. "Metastructural identification" ("Metastrukturnaya identifikatsiya"), *Voronezh, Ritm*, 2019, 190 p.

Submitted 01.08.2022; revised 17.10.2022

Information about the authors

Nikolay M. Mishachev, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Lipetsk State Technical University (30 Moskovskaya St., Lipetsk 398055, Russia), e-mail: nmish52@mail.ru

Anatoliy M. Shmyrin, Dr. Sc. (Technical), Professor, Head of the Higher Mathematics Department, Lipetsk State Technical University (30 Moskovskaya St., Lipetsk 398055, Russia), e-mail: amsh46@mail.ru

Igor' I. Suprunov, Assistant Professor, Lipetsk State Technical University (30 Moskovskaya St., Lipetsk 398055, Russia), email: i.i.suprunov@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕДАЧИ ТРАФИКА В ПРОГРАММНО-КОНФИГУРИРУЕМОЙ СЕТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ CISCO PACKET TRACER

К.И. Никишин

Пензенский государственный университет, г. Пенза, Россия

Аннотация: распределенные компьютерные сети упрощают архитектуру сети и администрирование сети, повышая ее отказоустойчивость и возможность процесса резервного копирования. К такому типу сети относится программно-конфигурируемая сеть (ПКС). ПКС является перспективной и востребованной технологией передачи разнородного трафика, при котором для его направления в сети и взаимодействия с базовой аппаратной инфраструктурой используются контроллеры на базе ПО или API-интерфейсы. Цель - исследовать ПКС с помощью имитационного моделирования через специализированные сетевые программы для оценки передачи трафика в сети, пропускной способности и задержки передачи. Описана некоторая часть передачи трафика в ПКС с помощью аппарата сетей Петри пакета CPN Tools. Проведено имитационное моделирование в программе Cisco packet tracer. Была разработана и исследована сеть ПКС с одиночным контроллером в Cisco packet tracer. Описаны особенности конфигурирования сети, формирования IP-адресов, масок и шлюзов. Исследовано перемещение трафика в ПКС, оценены быстродействие пакетов в сети и доля потери пакетов, а также корректность работы оборудования в сети. В разработанной модели Cisco packet tracer представлены диаграммы состояния хостов и сетевых устройств (коммутаторы, маршрутизаторы), показано количество отправленных команд ping к хостам и процент дошедших до них пакетов, для сетевых устройств – процент состояния управления ими

Ключевые слова: программно-конфигурируемая сеть, Ethernet, OpenFlow, разнородный трафик, сети Петри, CPN Tools, Cisco Packet Tracer

Введение

Компьютерная сеть позволяет передавать данные по сети. Передача осуществляется коммутатором Ethernet, маршрутизаторами, роутерами [1]. Быстрая передача трафика возможна только при разграничении и классификации трафика [2]. Это стало возможно благодаря введению «качества обслуживания» (Quality of Service QoS) и стандарту IEEE 802.1 [3-4].

Дальнейшим развитием компьютерных сетей стало возникновение распределенных сетей. Распределенные сети упрощают архитектуру сети, упрощают администрирование сети, повышая отказоустойчивость сети и возможность процесса резервного копирования [5-7].

К распределенной сети можно отнести программно-конфигурируемую сеть (ПКС) [8-10]. ПКС – это новая парадигма в развитии компьютерных сетей, которая появилась сравнительно недавно в университетах Беркли и Стэнфорда, в 2006 году [11-13].

ПКС - это сетевая парадигма, при которой для направления трафика в сети и взаимодействия с базовой аппаратной

инфраструктурой используются контроллеры на базе ПО или API-интерфейсы.

Такая сеть отличается от традиционных сетей, в которых для управления сетевым трафиком используются специальные устройства (маршрутизаторы и коммутаторы Ethernet).

ПКС можно использовать для создания и администрирования виртуальной сети или для управления обычной аппаратной сетью с помощью ПО.

В то время как виртуализация сети обеспечивает возможность разбивать одну физическую сеть на разные виртуальные сети или объединять устройства из разных физических сетей в одну виртуальную сеть, ПКС предлагает новый способ управления маршрутизацией пакетов данных через централизованный сервер.

Выделяют следующие преимущества ПКС:

- более широкие возможности управления с повышенными скоростью и гибкостью;
- настраиваемая сетевая инфраструктура;
- высокий уровень безопасности

CPN Tools.

Основным узлом протокола OpenFlow являются таблицы потоков. Эти таблицы представляют собой сочетание полей из заголовка поступившего кадра согласно стандарту IEEE 802.1, таймаутов, статистики, набор правил потоков.

Таблица потоков принимает решение о дальнейшей передаче кадра, потока в ПКС. Кадр может быть удален из сети и формируется сигнал, оповещение контроллеру о повторной передаче.

В связи с этим возникла необходимость исследовать передачу разнородного трафика в ПКС. Для этих целей подходит имитационное моделирование. Одним из способов имитационного моделирования является формализация с помощью математического аппарата.

Главное преимущество аппарата сетей Петри [16] – построение сложных с модульной иерархией систем для исследования динамических параметров системы. Таким образом, для исследования различных традиционных и распределенных компьютерных сетей, облачной инфраструктуры, сетевых протоколов и алгоритмов подходит наилучшим образом данный математический аппарат.

В данной статье не акцентируется полноценно внимание на исследовании передачи трафика с использованием аппарата сетей Петри, а только приводится часть ПКС. Более подробное исследование ПКС представлено в статьях [18-19].

Page

Через позицию Flow Table 1 задается структура, соответствующая физической таблице потоков. Через позицию Frame In

задается поступающий кадр на порт коммутатора. Часть сети Петри, моделирующая классификацию разнородного трафика, представлена на рис. 2.

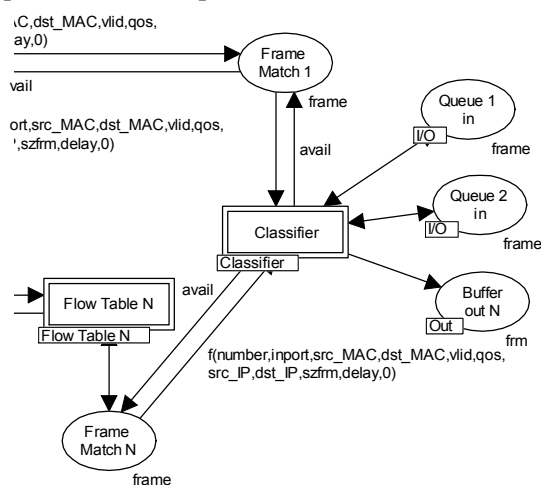


Рис. 2. Часть сети Петри, моделирующая классификацию трафика

В позиции Drop Frames 1 происходит удаление кадров в случае, если не выполняются действия с тайментами (жесткий таймаут `hard_timeout` и таймаут передачи кадра `idle_timeout`).

В таблице потоков находится узел классификации, осуществляющий как раз определенное действие с кадром, потоком. Классификатор в соответствии с правилом в таблице потоков определяет следующий маршрут кадра: отправить в очередь коммутатора в соответствии с его приоритетом или сразу же в выходной порт коммутатора.

Таким образом, с помощью аппарата сетей Петри была исследована передача трафика в ПКС.

Как было сказано ранее, моделирование с помощью какого-либо математического аппарата это одна сторона имитационного моделирования. Другой стороной является применение специализированных сетевых программ для эмуляции заданной сети [20]. Для этих целей была выбрана программа Cisco Packet Tracer для исследования уже непосредственно на физических и промышленных телекоммуникационных устройствах и оборудовании.

Разработка и исследование ПКС в Cisco Packet Tracer

Разработанная ПКС с одиночным контроллером представлена на рис. 3.

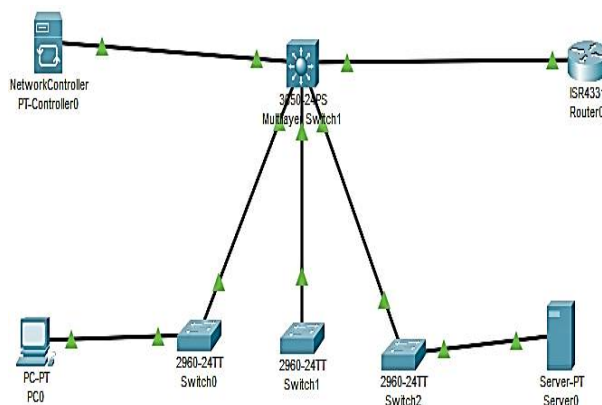


Рис. 3. ПКС с одиночным контроллером

Вначале производится настройка компонентов ПКС: персональные компьютеры PC, коммутаторы Switch 3 штуки, сервер Server, моноиерархический коммутатор Multilayer Switch и контроллер ПКС Network Controller. Для ПК прописываются параметры IP – 192.168.0.15, маска – 255.255.255.0 и шлюз – 192.168.0.254. С помощью ПК можно контролировать состояние сети через контроллер.

В файле конфигурации Switch прописываются интерфейсы `vlan1` на коммутаторе, команду `IP address` для назначения IP-адреса и маски подсети в режиме конфигурации интерфейса. Далее открываются порты командой `no shutdown` и проделывается то же самое для оставшихся двух коммутаторов.

В файле конфигурации для роутера прописывается IP адрес – 192.168.0.254 и маска – 255.255.255.0, аналогичным образом как на рис. 4. Для сервера задается шлюз – 192.168.0.254, IP – 192.168.0.253 и маска – 255.255.255.0. Для контроллера ПКС задается шлюз – 192.168.0.254, IP – 192.168.0.1 и маска – 255.255.255.0.

Для достоверности и работоспособности ПКС отправляется команда `ping` контроллеру и осуществляется контроль на присутствие или отсутствие потери пакетов и на задержку в ПКС (рис. 4).

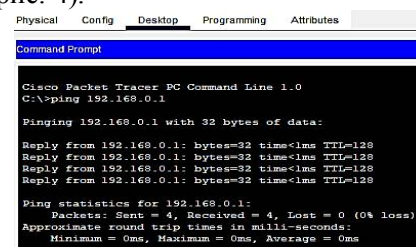


Рис. 4. Проверка отклика контроллера ПКС

Для определения валидации и работоспособности сети убеждаемся в движении трафика во всей ПКС. На рис. 5 показаны пакеты, дошедшие до своего места назначения через иконку зеленое письмо.

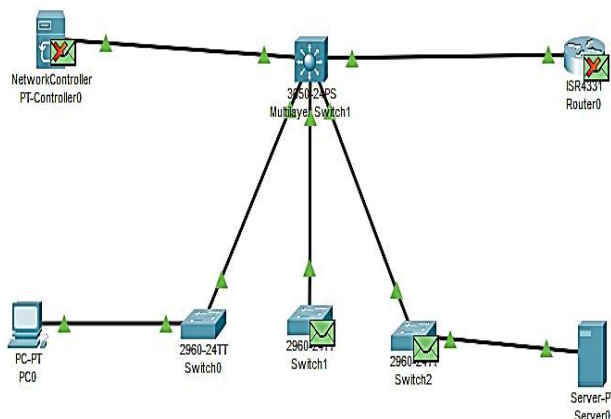


Рис. 5. Движение маршрутов трафика в ПКС

На рис. 6 представлены замеры времени перемещения пакетов в ПКС.

Vis.	Time(sec)	Last Device	At Device	Type
0.000	-	-	PC0	ICMP
0.000	-	-	PC0	ARP
0.001	0.001	PC0	Switch0	ARP
0.002	0.002	Switch0	Multilayer Switch1	ARP
0.003	0.003	Multilayer Switch1	Switch1	ARP
0.003	0.003	Multilayer Switch1	Switch2	ARP
0.003	0.003	Multilayer Switch1	Router0	ARP
0.003	0.003	Multilayer Switch1	PT-Controller0	ARP
0.004	0.004	Switch2	Server0	ARP

Рис. 6. Время перемещения пакетов в ПКС

Далее через рабочий стол PC заходим в браузер и прописываем команды, предварительно вписав логин и пароль, которые прописывались в файле конфигурации коммутаторов и маршрутизатора.

Вводится в браузере PC ссылка с нашим IP-адресом <https://192.168.0.1>. При необходимости можно ввести и другую ссылку.

Для отображения полной статистики нужно добавить несколько устройств. Для начала во вкладке “credentials” прописывается логин и пароль администратора ПКС, а также пользовательский пароль. Затем во вкладке “discovery” вводятся параметры для поиска устройств, а именно имя устройства, через которое ищутся остальные устройства (SW1),

IP-адрес этого устройства и шаблон данных для входа.

Присутствует вкладка сетевых устройств ПКС, на которой показывается название узла, его тип, IP-адрес, время его работы, последние обновления устройства и состояние управление им.

В результате работы ПКС программа Cisco Packet Tracer предоставляет диаграммы состояния хостов (PC и Server) и сетевых устройств (коммутаторы, маршрутизаторы) на вкладке сетевого контроллера. Можно увидеть отправку команд ping к хостам и процент дошедших до них пакетов, для сетевых устройств – процент состояния управления ими (рис. 7).

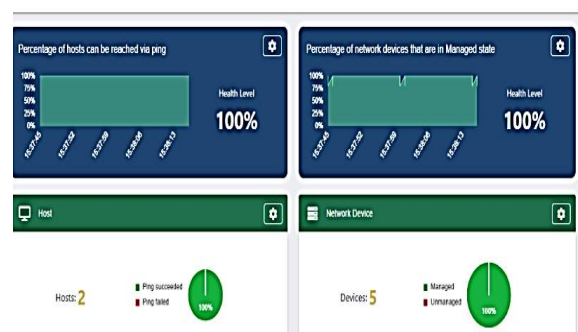


Рис. 7. Вкладка сетевого контроллера

Можно просмотреть более полное состояние устройств сети во вкладке “assurance”. В ней сетевые устройства разделены на более простые устройства для упрощения контроля сетевого состояния.

Заключение

ПКС является перспективной и востребованной технологией передачи разнородного трафика, при которой для его направления в сети и взаимодействия с базовой аппаратной инфраструктурой используются контроллеры на базе ПО или API-интерфейсы.

Все поставленные задачи и цель по исследованию ПКС были выполнены с помощью имитационного моделирования. Одним из способов имитационного моделирования является формализация с помощью математического аппарата.

Описана часть передачи трафика в ПКС с помощью аппарата сетей Петри пакета CPN Tools. Было проведено имитационное моделирование в одной из специализированных сетевых программ для

эмуляции заданной сети, для этих целей лучшим образом подошла программа Cisco Packet Tracer.

Была разработана, исследована сеть ПКС с одиночным контроллером в Cisco Packet Tracer. Описаны особенности конфигурирования сети, формирования IP-адресов, масок и шлюзов. Исследовано перемещение трафика в ПКС, оценены быстродействие пакетов в сети и доля потери пакетов, а также корректность работы оборудования в сети.

Литература

1. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. 4-е изд. СПб.: Питер, 2010. 943 с.
2. Никишин К.И. Механизм управления трафиком реального времени в коммутаторе Ethernet // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2015. № 10. С. 32–37.
3. Описание стандарта IEEE 802.1q [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.1Q.
4. Scheduling queues in the Ethernet switch, considering the waiting time of frames/ E. Kizilov, N. Konnov, K. Nikishin, D. Pashchenko, D. Trokoz // MATEC Web of Conferences. 2016. Vol. 44. P. 01011.
5. Корячко В.П., Перепелкин Д.А. Программно-конфигурируемые сети: учебник для вузов. М.: Горячая линия – Телеком, 2020. 288 с.
6. Advanced study of SDN/OpenFlow controllers/ A. Shalimov et al. // Proceedings of the 9th Central & Eastern European Software Engineering Conference in Russia. ACM, 2013.
7. Nikishin K., Konnov N. Schedule Time-Triggered Ethernet // International Conference on Engineering Management of Communication and Technology, EMCTECH 2020. DOI: 10.1109/EMCTECH49634.2020.9261540.
8. Перепелкин Д.А. Концептуальный подход динамического формирования трафика программно-конфигурируемых телекоммуникационных сетей с балансировкой нагрузки // Информационные технологии. 2015. Т. 21. № 8. С. 602–610.
9. Перепелкин Д.А., Бышов В.С. Балансировка потоков данных в программно-конфигурируемых сетях с обеспечением качества обслуживания сетевых сервисов // Радиотехника. 2016. № 11. С. 111–119.
10. Программная инфраструктура и визуальная среда распределенной обработки потоков данных в программно-конфигурируемых сетях / В.П. Корячко, Д.А. Перепелкин, М.А. Иванчикова, В.С. Бышов, И.Ю. Цыганов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2018. № 65. С. 44–54. DOI: 10.21667/1995-4565-2018-65-3-44-54.
11. Openflow: enabling innovation in campus networks/ N. McKeown, T. Anderson, H. Balakrishnan et al. // ACM SIGCOMM Computer Communication Review. 2008. Vol. 38. No. 2. P. 69–74.
12. Maturing of OpenFlow and Software-Defined Networking Through Deployments/M. Kobayashi, S. Seetharaman, G. Parulkar, G. Appenzeller, J. Little, J. Van Reijendam, N. McKeown // Computer Networks. 2014. Vol. 61. P. 151–175.
13. Ушакова М.В., Ушаков Ю.А. Исследование сети виртуальной инфраструктуры центра обработки данных с гибридной программно-конфигурируемой коммутацией // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2021. № 75. С. 34–43. DOI: 10.21667/1995-4565-2021-75-34-43.
14. Никульчев Е.В., Паян С.В., Плужник Е.В. Динамическое управление трафиком программно-конфигурируемых сетей в облачной инфраструктуре // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2013. № 3 (45). С. 54–57.
15. Леохин Ю.Л., Фатхулин Т.Д. Оценка возможности предоставления гарантированной скорости передачи данных в программно-конфигурируемой оптической сети // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2020. № 71. С. 45–59. DOI: 10.21667/1995-4565-2020-71-45-59.
16. Wael Hosny Fouad Aly. A novel controller placement using Petri-nets for SDNs//Wseas Transactions on Mathematics. 2020. Vol. 19. P. 598–605.
17. Никишин К.И., Коннов Н.Н. Генератор трафика Ethernet на основе цветных сетей Петри // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2016. № 1 (17). С. 299–307.
18. Никишин К.И. Моделирование и верификация топологий программно-конфигурируемых сетей // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2022. № 80. С. 67–74.
19. Никишин К.И. Моделирование контроллера и верификация процесса передачи данных в программно-конфигурируемых сетях // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2022. № 80. С. 75–83.
20. Никишин К.И. Моделирование беспроводной сенсорной сети с использованием OMNET++ // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2021. № 78. С. 46–54.

Поступила 27.06.2022; принята к публикации 10.10.2022

Информация об авторах

Никишин Кирилл Игоревич – канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры вычислительной техники, Пензенский государственный университет (440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, д. 40), e-mail: nkipnz@mail.ru

RESEARCH OF TRAFFIC TRANSMISSION IN A SOFTWARE DEFINED NETWORK USING CISCO PACKET TRACER

K.I. Nikishin

Penza State University, Penza, Russia

Abstract: distributed computer networks simplify the network architecture and network administration, increase network fault tolerance and the possibility of a backup process. This type of network includes a software defined network (SDN). SDN is a promising and in-demand technology for the transmission of heterogeneous traffic, in which software-based controllers or

APIs are used to direct it to the network and interact with the underlying hardware infrastructure. The goal is research SDN using simulation modeling through specialized network programs to assess the transmission of traffic in the network, bandwidth and latency. Some part of the traffic transfer to the SDN using the device of the CPN Tools package Petri nets is described. Simulation modeling was carried out in the Cisco packet tracer program. A network of SDN with a single controller in Cisco packet tracer was developed and investigated. The features of network configuration, formation of IP addresses, masks and gateways are described. The movement of traffic to the PC was investigated, the speed of packets in the network and the proportion of packet loss, as well as the correctness of the operation of equipment in the network were evaluated. The developed Cisco packet tracer model presents diagrams of the status of hosts and network devices (switches, routers), shows the number of ping commands sent to hosts and the percentage of packets that reached them, for network devices – the percentage of their management status

Key words: software defined network, Ethernet, OpenFlow, heterogeneous traffic, Petri nets, CPN Tools, Cisco Packet Tracer

References

1. Olifer V.G., Olifer N.A. "Computer networks. Principles, technologies, protocols." ("Komp'yuternye seti. Printsipy, tekhnologii, protokoly"), St. Petersburg: Piter, 2010, 943 p.
2. Nikishin K.I. "Real-time traffic control mechanism in an Ethernet switch", *Bulletin of Computer and Information Technologies (Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy)*, 2015, no. 10, pp. 32–37.
3. Description of the IEEE 802.1q standard, available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.1Q.
4. Kizilov E., Konnov N., Nikishin K., Pashchenko D., Trokoz D. "Scheduling queues in the Ethernet switch, considering the waiting time of frames", *MATEC Web of Conferences*, 2016, vol. 44, pp. 01011-p.1–01011-p.
5. Koryachko V.P., Perepelkin D.A. "Software defined networks" ("Programmno-konfiguriruyemye seti"), Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2020, 288 p.
6. Shalimov A. et al. "Advanced study of SDN/OpenFlow controllers", *Proc. of the 9th Central & Eastern European Software Engineering Conference in Russia*. ACM, 2013.
7. Nikishin K., Konnov N. "Schedule time-triggered ethernet", *Int. Conf. on Engineering Management of Communication and Technology*, EMCTECH 2020. DOI: 10.1109/EMCTECH49634.2020.9261540.
8. Perepelkin D.A. "Conceptual approach of dynamic traffic shaping of software-defined telecommunication networks with load balancing", *Information technologies (Informatsionnye tekhnologii)*, 2015, vol. 21, no. 8, pp. 602–610.
9. Perepelkin D.A., Byshov V.S. "Balancing data flows in software-defined networks with ensuring the quality of service for network services", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2016, no. 11, pp. 111–119.
10. Koryachko V.P., Perepelkin D.A., Ivanchikova M.A., Byshov V.S., Tsyganov I.Yu. "Software infrastructure and visual environment for distributed processing of data flows in software-defined networks", *Bulletin of Ryazan State Radio Engineering University (Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta)*, 2018, no. 65, pp. 44–54. DOI: 10.21667/1995-4565-2018-65-3-44-54.
11. McKeown N., Anderson T., Balakrishnan H. et al. "Openflow: enabling innovation in campus networks", *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2008, vol. 38, no. 2, pp. 69–74.
12. Kobayashi M., Seetharaman S., Parulkar G., Appenzeller G., Little J., Van Reijendam J., McKeown N. "Maturing of OpenFlow and Software-Defined Networking Through Deployments", *Computer Networks*, 2014, vol. 61, pp. 151–175.
13. Ushakova M.V., Ushakov Yu.A. "Study of the virtual infrastructure network of a data center with hybrid software-defined switching", *Bulletin of Ryazan State Radio Engineering University (Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta)*, 2021, no. 75, pp. 34–43. DOI: 10.21667/1995-4565-2021-75-34-43.
14. Nikul'chev E.V., Payain S.V., Pluzhnik E.V. "Dynamic traffic management of software-defined networks in cloud infrastructure", *Bulletin of Ryazan State Radio Engineering University (Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta)*, 2013, no. 3 (45), pp. 54–57.
15. Leokhin Yu.L., Fathulin T.D. "Evaluation of the possibility of providing a guaranteed data transfer rate in a software-defined optical network", *Bulletin of Ryazan State Radio Engineering University (Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta)*, 2020, no. 71, pp. 45–59. DOI: 10.21667/1995-4565-2020-71-45-59.
16. Wael Hosny Fouad Aly "A novel controller placement using Petri-nets for SDNs", *Wseas Transactions on Mathematics*, 2020, vol. 19, pp. 598–605.
17. Nikishin K.I., Konnov N.N. "Ethernet traffic generator based on colored Petri nets", *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society (Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve)*, 2016, no. 1 (17), pp. 299–307.
18. Nikishin K.I. "Modeling and verification of topologies of software-defined networks", *Bulletin of Ryazan State Radio Engineering University (Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta)*, 2022, no. 80, pp. 67–74.
19. Nikishin K.I. "Controller modeling and verification of the data transfer process in software-defined networks", *Bulletin of Ryazan State Radio Engineering University (Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta)*, 2022, no. 80, pp. 75–83.
20. Nikishin K.I. "Modeling a wireless sensor network using OMNET++", *Bulletin of Ryazan State Radio Engineering University (Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta)*, 2021, no. 78, pp. 46–54.

Submitted 27.06.2022; revised 10.10.2022

Information about the authors

Kirill I. Nikishin, Cand. Sci. (Technical), Assistant Professor, Penza State University (40 Krasnaya str., Penza 440026, Russia), e-mail: nkipnz@mail.ru

О ПРИМЕНЕНИИ РЕГУЛЯРИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ БОЛЬШИХ ДАННЫХ ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ СБОРА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

С.С. Колмогорова¹, Н.О. Голубятникова²

¹ Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова,
г. Санкт-Петербург, Россия

² Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация: за последнее десятилетие значительно увеличилось число методов машинного обучения, а также областей их применения и подходов в связи с необходимостью разработки более точных и надежных моделей прогнозирования. Рассмотрен подход прогнозирования параметров электромагнитного поля на основе распределенной среды Apache Spark Streaming. Первоначально данные с различных датчиков электромагнитного поля в реальном времени обрабатываются до уровня структурированных данных, являющихся входными данными в модели прогнозирования, которая фокусируется на прогнозировании типа значения с учетом нескольких классов. Кроме того, для повышения эффективности прогнозирования был использован метод регуляризации для выбора признаков, чтобы уменьшить переобучение. Описанная архитектура представляет собой интеграцию Apache Kafka, Spark и Cassandra и рекомендуется к применению для прикладного мониторинга и прогнозирования состояния систем различного профиля. Экспериментальный анализ показывает, что использование метода регуляризации повышает эффективность рекуррентной нейронной сети при прогнозировании параметров электромагнитного поля. Предложенная модель способна эффективно использовать смешанные прикладные данные, уменьшает вероятность переобучения модели и снижает вычислительные затраты

Ключевые слова: электромагнитное поле, потоковые данные, машинное обучение, Apache Cassandra, Apache Kafka, Apache Spark, большие данные, электрометрия, прогнозирование, распределенная система сбора данных

Введение

В связи с ускоренным совершенствованием производственных процессов своевременное получение необходимой информации о среде стало основной тенденцией развития систем сбора и обработки данных. Например, полевая система мониторинга параметров электромагнитных полей (ЭМП) на базе сенсорной сети, построенная на основе концептуальной модели Интернета вещей и теории нечеткого управления [1, 2]. Модель состоит из системы сбора данных, системы передачи и хранения данных и платформы визуализации для анализа больших данных. Система сбора данных тесно интегрирована с системой передачи и хранения данных для получения в реальном времени данных о среде в различных областях мониторинга. Система передачи данных реализует предоставление данных в реальном времени через сеть на платформу анализа больших данных.

Развитие всех отраслей производства и глобальная цифровизация общества порождает

ряд проблем, связанных с возникновением электромагнитных полей техногенной природы, их воздействием на технические и биологические объекты. Все устройства автоматики, в определенной мере, подвержены влиянию помех. Помехи могут быть связаны с электропитанием, наводками в измерительных цепях, механическим воздействием, а также воздействием электромагнитных полей. Выход из строя элемента системы управления взрывоопасным производством, например, нефтеперерабатывающий завод, может нести масштабные последствия, вплоть до уровня техногенной катастрофы. Поэтому контроль электромагнитных полей влияет на промышленную безопасность [1].

Медицинское оборудование, использующее статические поля (например, магнитно-резонансный томограф), электрические приборы, использующие низкочастотные электрические и магнитные поля (50/60 Гц), а также различные беспроводное, телекоммуникационное и радиовещательное оборудование, использующее высокочастотные электромагнитные поля (100 кГц - 300 ГГц), значительно улучшают качество жизни.

Однако при превышении определенных уровней возникающие электромагнитные поля могут быть вредными для здоровья и по-разному влиять на организм человека в зависимости от их частоты.

В [3] реализован автоматизированный программно-технический комплекс системы сбора и интеллектуальной обработки данных. Разработанный интеллектуальный набор устройств системы раннего предупреждения основан на бесконтактном измерении электромагнитных полей, для обеспечения безопасности персонала и стабильной работы оборудования. Автоматизация обработки сигналов датчиков напряженности электрического поля, входящих в информационно измерительную систему [4], позволяет получать данные об изменяющихся параметрах поля с реализацией алгоритмов коррекции и позволяет системе быстро адаптироваться к изменениям технологических условий. Распределённая система контроля техногенных электромагнитных полей с применением инновационных датчиков [2] рассматривает измерение параметров полей в рамках практической задачи децентрализованной «облачной» информационно-аналитической системы и представлена программной реализацией сбора данных с сенсоров новой формы, автоматической оценкой и прогнозированием.

Для получения больших данных о показателях распределения электромагнитных полей в мониторинговой области используется платформа анализа и сбора данных [1]. В результате её применения получается ряд реляционных баз данных, представляющих набор результатов измерения параметров ЭМП — представление форм временных характеристик различных параметров. Все они являются достаточно информативными для кодирования, идентификации и дальнейшей интеллектуальной обработки больших данных нейросетевыми технологиями в составе информационно-измерительного IoT комплекса по оценке ЭМП на соответствие нормам и правилам промышленной безопасности.

Платформа анализа больших данных получает данные опрашиваемого участка и анализирует их благодаря установленным закономерностям по накопленным ранее данным с помощью технологии сбора больших данных и визуализации, осуществляет раннее

предупреждение и прогноз аварийных ситуаций, а также предоставляет необходимую сервисную информацию для принятия решений.

Предлагаемая в статье модель использует распределенную среду Apache Spark Streaming для получения, хранения и обработки данных с различных датчиков ЭМП в режиме реального времени.

Постановка задачи

В реальных условиях технической эксплуатации при работе с большими данными возникает необходимость в использовании специализированных платформ, в которых применяются различные подходы к извлечению, хранению и индексированию данных.

Одним из хорошо известных методов для поддержки выполнения крупномасштабных распределенных прикладных программ является MapReduce [5]. Для решения актуальных вопросов по работе с большими данными в настоящее время известно множество фреймворков и распределенных хранилищ данных, таких как Hadoop, Spark, Storm, Flink, Cassandra и HBase, которые могут быть использованы. Они эффективно обрабатывают огромные объемы данных.

Кроме того, существуют библиотеки, такие как MLlib от Spark, которые позволяют использовать методы машинного обучения в облаке. Существуют также две различные категории обработки больших данных, а именно пакетные и потоковые механизмы. Первая связана с управлением огромным объемом данных, а вторая - с обработкой высокоскоростных данных. При этом наиболее распространенной платформой, управляющей средами больших данных для пакетной обработки MapReduce, является Hadoop. Стоит отметить, что современные приложения требуют анализа в режиме реального времени, которые эффективно и оперативно обеспечивают работу с потоковыми механизмами, такими как Spark и Storm Streaming [6].

Важно отметить также, что при работе с большими данными необходимо сделать акцент на системах обработки данных в реальном времени, потоковой передаче, базах данных NoSQL, инфраструктурах облачных вычислений [7].

Для отображения эффективности предложенной схемы авторами реализован метод регуляризации для выбора признаков, чтобы избежать переобучения модели. Задача экспериментального анализа предполагает, что использование метода регуляризации значительно повысит эффективность прогнозирования.

Задача внедрения инфраструктуры облачных вычислений, в которой использовались технологии больших данных, таких как Kafka, Spark Streaming и Cassandra, важна для разработки эффективной схемы хранения и обработки данных о постоянно изменяющихся параметрах ЭМП в зоне мониторинга.

Агрегирование данных о параметрах ЭМП. Наборы данных

Набор данных состоит из переменных, связанных с микрофизикой ЭМП, и представлен характеристиками в таблице. В этом наборе данных применяется контролируемое обучение с помощью нескольких моделей классификации потоковых данных. Используемый набор данных, состоит из огромного количества экземпляров, что необходимо для корректной оценки алгоритмов в контексте потоков данных и регуляризации структуры данных.

Описание данных, несущих информацию о характеристиках ЭМП

Переменная	Описание
$E(\text{В/м})$	суммарная напряженность ЭМП
$E_x(\text{В/м})$	составляющая напряженности ЭМП по оси x
$E_y(\text{В/м})$	составляющая напряженности ЭМП по оси y
$E_n(\text{В/м})$	нормальная составляющая напряженности ЭМП
$E_t(\text{В/м})$	тангенциальная составляющая напряженности ЭМП
$G_{xx}(\text{В/м}^2)$	градиент напряженности по оси xx
$G_{yy}(\text{В/м}^2)$	градиент напряженности по оси yy
$G_{xy}(\text{В/м}^2)$	градиент напряженности по оси xy

Продолжение таблицы

$D(\text{Кл/м}^2)$	смещение ЭМП
$D_x(\text{Кл/м}^2)$	смещение ЭМП по оси x
$D_y(\text{Кл/м}^2)$	смещение ЭМП по оси y
$D_n(\text{Кл/м}^2)$	нормальное смещение ЭМП
$D_t(\text{Кл/м}^2)$	тангенциальное смещение ЭМП
$w(\text{Дж/м}^3)$	плотность энергии ЭМП

Имитационное моделирование на рис. 1 дает наглядную картину графической формы распределения эквипотенциальных линий ЭМП при взаимодействии точечного источника ЭМП и датчика для различных степеней неоднородности реальных условий эксплуатации. На рис. 2 представлен пример полученных расчетных данных различных характеристик ЭМП, согласно таблице. Расчет степени неоднородности ЭМП [8] предполагает оценку, необходимую для определения типа поля для дальнейшей типологической классификации. Классификация и количественная оценка степени неоднородности позволит выявить информативные параметры о состоянии мониторинговой области для обеспечения безопасности.

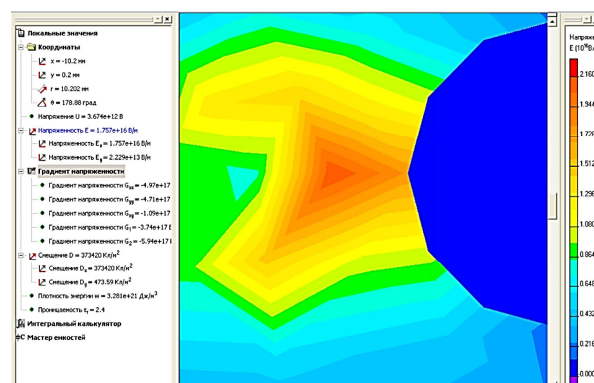


Рис. 1. Графическое моделирование распределения эквипотенциальных линий при взаимодействии точечного источника ЭМП

Подходы и методы

Apache Spark Streaming. Поточковые данные рассматриваются как большое число данных, полученных от огромного количества датчиков с одновременной отправкой записей этих данных. Для извлечения необходимой информации эти данные требуют подготовки на предварительной стадии. Более того, аналитика может быть выборочной, отфильтрованной, коррелированной или даже агрегированной, и этот анализ может происходить как в структуре, связанной с учетом интересов пользователя, так и в другом секторе частного. Со временем используются алгоритмы потоковой обработки с целью дальнейшего уточнения полученных данных. Apache Spark Streaming преобразует входной поток в режиме реального времени в пакеты, которыми впоследствии манипулирует движок Spark для получения выходных данных в виде последующих пакетов. Таким образом, дискретизированные потоки D-потоки (DStream) представляют собой высокоуровневую абстракцию, предлагаемую Spark Streaming, в то время как последний предоставляет возможность параллельной

Apache Cassandra представляет собой широко масштабируемую базу данных NoSQL с открытым исходным кодом. Поэтому она идеально подходит для обработки огромных объемов данных в различных центрах обработки данных и облачной инфраструктуре. К ее достоинствам можно отнести следующие характеристики: постоянная доступность, прямая масштабируемость, а также простота работы на разных серверах без единой точки отказа [10]. Проект *Cassandra* основан на допущении, что системные и аппаратные сбои происходят постоянно, и этот факт приводит к созданию одноранговой распределенной системы. Информация распределяется между всеми узлами кластера, а стратегии репликации и обмена информацией являются автоматическими и прозрачными. Более того, обеспечивается прогрессивная пользовательская репликация, которая сохраняет дубликаты данных на всех узлах, участвующих в кольце *Cassandra*. Если узел отключается, то по крайней мере одна копия данных узла будет доступна с другого узла кластера. Наконец, *Cassandra* обеспечивает линейное масштабирование [11], что означает, что общие возможности системы могут быть немедленно расширены путем включения в сеть дополнительных узлов.

Система основана на модели Producer–Consumer [13], хранит события, сгруппированные в отдельные темы. Producer публикует сообщения в теме, а пользователи,

зарегистрированные в этой области, получают опубликованное сообщение. Kafka реализует четыре типа API для связи с другими приложениями. Первые два называются Producer и Consumer и используются для публикации сообщений в одной или нескольких областях, а также для отображения активности в областях и обработки данных, соответственно. Последние два — это API Streams и Connector. Первый используется для приложений, выступающих в качестве обработчиков данных, а второй — для создания повторно используемых потребителей или производителей и соединения тем с другими приложениями или компьютерными системами. По этим причинам Apache Kafka является идеальным решением для создания каналов реального времени и разработки приложений, обрабатывающих потоки данных.

Техника регуляризации

В процессе обучения модели машинного обучения важно исключать переобучение [14]. Если модель избыточно обучена, она будет иметь низкую точность, поскольку будет пытаться уловить шум обучающего набора данных. Понятие шума относится к тем моментам данных, которые не отражают реальные свойства данных, а являются случайными. Модель более гибко реагирует на риск чрезмерного смещения, предварительно изучив такие точки данных. Основная сложность такого подхода заключается в нахождении оптимального баланса. Поэтому были предложены различные методы выбора параметров регуляризации [15].

Сложной темой в классификации является выбор признаков, поскольку признаки с минимальной степенью важности редко известны заранее. Добавление большего числа признаков в набор улучшает заданную метрику эффективности классификации и точно описывает заданный набор данных. Однако слишком большое количество признаков может помешать классификатору.

Регуляризация L_1 или регрессия Лассо (оператор наименьшего абсолютного сокращения и выбора) добавляет «абсолютное значение величины» коэффициента в качестве штрафного члена к функции потерь (L) и сокращает коэффициент менее важного признака до нуля, тем самым удаляя некоторый признак вообще [16]. Согласно

Лассо, регрессия наименьших квадратов с функцией штрафа L_1 записывается как

$$Loss = \sum_{j=1}^m (y_i - w_0 - \sum_{i=1}^n w_i x_{ij})^2 + \lambda \sum_{i=1}^n |w_i|,$$

где $y = w_0 + w_1 x_1 + w_2 x_2 + \dots + w_n x_n$ — прогнозируемое значение. Характеристики, определяющие ценность y , это $x_1, x_2, \dots, x_n$; w_0 это смещение, $w_1, w_2, \dots, w_n$; это коэффициенты к $x_1, x_2, \dots, x_n$. В уравнении λ — параметр регуляризации, который контролирует важность члена регуляризации. В заключение отметим, что при наличии коллинеарности во входных значениях метод регрессии Лассо может работать эффективно, в отличие от метода обыкновенных наименьших квадратов (OLS), который чрезмерно подгоняет данные, что является распространенным методом оценки параметров. По сравнению с регрессией Риджа, также называемой нормой L_2 или регуляризацией [17], Лассо уменьшает коэффициенты менее важных признаков до нуля, тем самым полностью удаляя некоторые признаки. Таким образом, это хорошо работает для отбора признаков [18] в случае, если у нас есть огромное количество признаков.

Архитектура и схема обработки больших данных

В систему входит ряд данных, получаемых с различных датчиков ЭМП, а также модель численного прогнозирования (рис. 2 и рис. 3). Представленный принцип основан в том числе на предложенной в [19] процедуре обнаружения знаний. Процесс обнаружения знаний в базах данных («обнаружение знаний в данных» или KDD) включает в себя использование базы данных вместе с требуемым подбором, предварительной обработкой, выборкой и преобразованием; применение методов обработки данных (алгоритмов ИИ) для перечисления закономерностей из БД; и оценку результатов анализа данных для определения подмножества перечисленных моделей, которые считаются знаниями. Обработка данных, составляющая процесса KDD, связана с алгоритмическими средствами, с помощью которых из данных извлекаются и фиксируются закономерности. Общий процесс KDD включает в себя оценку и возможную интерпретацию найденных закономерностей,

для определения того, какие закономерности можно считать новыми знаниями. Понятие общего процесса, управляемого пользователем, разработано не только для KDD: схожие предложения были выдвинуты и в статистике [20], и в машинном обучении [21].

Рассмотрим структуру на рис. 3, в которой проводятся вычисления. Общая архитектура предлагаемой системы представлена таким образом, что учитывает соответствующие модули прикладного подхода оценки параметров ЭМП. В частности, используется этап предварительной обработки, а затем процедура классификации.

Схема прикладной архитектуры следующая. В данной работе предлагается оригинальная система, состоящая из двух важных компонентов, а именно - сбора и обработки данных. Модуль сбора данных, использующий Apache Kafka, разработан для получения данных с различных датчиков и последующего хранения этих данных в Cassandra, базе данных NoSQL, которая не имеет конкретных структур и идеально подходит для масштабирования. После процедуры хранения система в основном выполняет обработку в реальном времени, используя потоковую обработку Apache Spark Streaming. В частности, это обработка данных, связанных с параметрами ЭМП, которая инициируется датчиками, собирающими данные. Затем эти данные обрабатываются, сохраняются и анализируются. Более конкретно потоковый конвейер можно

рассмотреть с точки зрения следующих особенностей.

Датчики ЭМП агрегируют следующие характеристики: $E(B/m)$, $E_x(B/m)$, $E_y(B/m)$, $E_n(B/m)$, $E_t(B/m)$; градиент напряженности: $G_{xx}(B/m^2)$, $G_{yy}(B/m^2)$, $G_{xy}(B/m^2)$, $G_1(B/m^2)$, $G_2(B/m^2)$; смещение: $D(Кл/м^2)$, $D_x(Кл/м^2)$, $D_y(Кл/м^2)$, $D_n(Кл/м^2)$, $D_t(Кл/м^2)$; плотность энергии: $w(Дж/м^3)$.

Apache Kafka и Apache Spark Streaming: эти службы больших данных отвечают за потоковую передачу и обработку данных с датчиков; Cassandra: данные хранятся в этой конкретной базе данных NoSQL в необработанном виде, а на более позднем этапе, как в [22], преобразуются до уровня структурированных данных, удобных для дальнейшей передачи и обработки.

Техника регуляризации применяется для выделения признаков, чтобы избежать переобучения, например, регуляризация L_1 .

Предложенная схема была реализована с использованием облачной инфраструктуры Apache Spark. В состав единого центра, используемого для наших экспериментов, входят 6 вычислительных узлов, т.е. виртуальные машины, каждая из которых имеет четыре процессора CPU 2,5 ГГц, 8 Гб памяти и жесткий диск объемом 50 Гб. Одна из виртуальных машин считается ведущей, а пять других используются в качестве ведомых узлов.

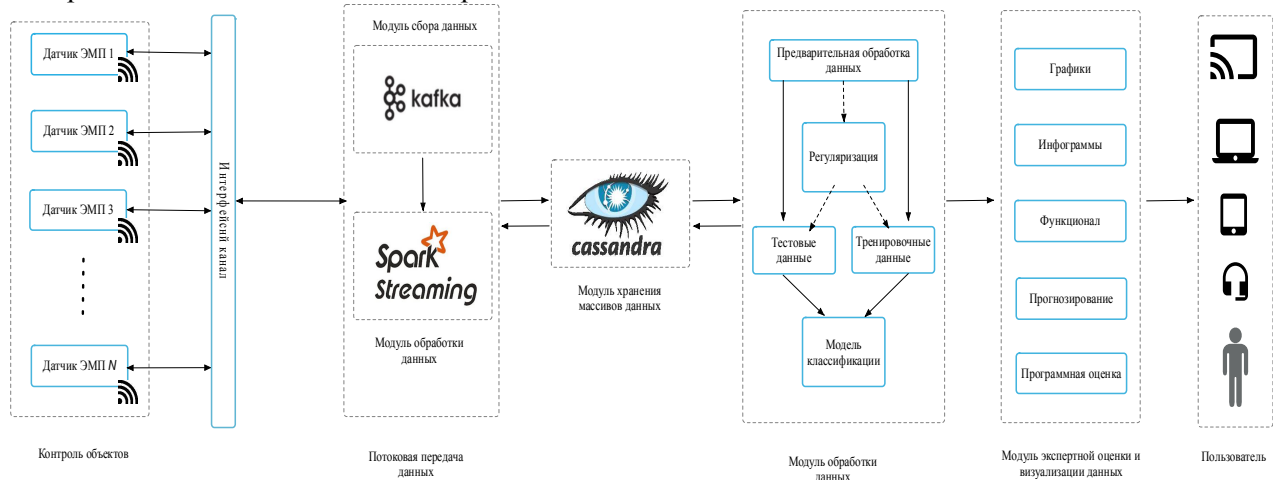


Рис. 3. Комплексная архитектура системы регуляризации структуры больших данных в анализе и прогнозировании характеристик ЭМП

Вывод и заключение

В представленной статье на прикладной задаче анализа характеристик ЭМП рассматривается подход обработки больших данных, связанный со сценариями потоковой передачи данных с сенсорных датчиков в мониторинговую область и последующей их регуляризацией.

В наборе данных применяется контролируемое обучение с помощью нескольких моделей классификации потоковых данных. Авторы полагают, что использование алгоритмов классификации совместно со стратегией регуляризации работает лучше, чем классификаторы без использования какой-либо стратегии регуляризации, с точки зрения метрики точности [3]. Более того, по мере увеличения набора данных все классификаторы работают лучше, и это свидетельствует о том, что предложенная схема может быть эффективно использована в системе реального времени, обрабатывающей потоковые данные о характеристиках ЭМП.

Стоит отметить, что с точки зрения алгоритмического подхода, использование гибридных архитектур, основанных на технике регуляризации, может быть более эффективным именно при рассмотрении распределенной инфраструктуры, и, следовательно, производительность системы в конечном итоге будет увеличена. Для дальнейших экспериментов по проверке производительности предложенной стратегии будут использованы алгоритмы классификации на наборах данных для корректной оценки алгоритмов в контексте потоков данных.

Литература

1. Платформа контроля электромагнитного поля для обеспечения безопасности труда и промышленных объектов / С.С. Колмогорова, А.С. Колмогоров, Д.С. Баранов, А.В. Мокряк // Безопасность труда в промышленности. 2022. № 2. С. 58-63. DOI 10.24000/0409-2961-2022-2-58-63. – EDN WZTIWM.
2. Распределённая система контроля техногенных электромагнитных полей с применением инновационных датчиков / С.С. Колмогорова, А.С. Колмогоров, Д.С. Баранов и др. // Проблемы машиноведения: материалы VI Междунар. науч.-техн. конф. Омск: Омский государственный технический университет, 2022. С. 102-112. DOI 10.25206/978-5-8149-3453-6-2022-102-112. – EDN CMDTRF.
3. Автоматизированный программно-технический комплекс системы сбора и

интеллектуальной обработки данных / С.С. Колмогорова, С.В. Бирюков, А.С. Колмогоров, Д.С. Баранов // Приборы. 2022. № 7(265). С. 48-55.

4. Автоматизация обработки сигналов датчиков напряженности электрического поля, входящих в информационно-измерительную систему / С.С. Колмогорова, Д.С. Баранов, А.С. Колмогоров, С.В. Бирюков // Омский научный вестник. 2019. № 4(166). С. 66-70. DOI 10.25206/1813-8225-2019-166-66-70. EDN IBOAUG.

5. Dean J., Ghemawat S. MapReduce: Simplified Data Processing on Large Clusters. In Proceedings of the Symposium on Operating System Design and Implementation (OSDI). San Francisco, CA, USA, 2004. P. 137–150.

6. Franciscus N., Milosevic Z., Stantic B. Influence of Parallelism Property of Streaming Engines on Their Performance. In Proceedings of the New Trends in Databases and Information Systems (ADBIS). Prague, Czech Republic, 2016. P. 104–111.

7. A Regularization-Based Big Data Framework for Winter Precipitation Forecasting on Streaming Data/ Kanavos Andreas, Maria Trigka, Elias Dritsas, Gerasimos Vonitsanos and Phivos Mylonas// Electronics 10. 2021. No. 16. P. 1872. URL: <https://doi.org/10.3390/electronics10161872>

8. Колмогорова С.С., Колмогоров А.С., Бирюков С.В. Измерение степени неоднородности электрического поля // Омский научный вестник. 2018. № 2(158). С. 45-47. DOI 10.25206/1813-8225-2018-158-45-48. EDN XMRQFF.

9. In-situ MapReduce for Log Processing/ D. Logothetis, C. Trezzo, K.C. Webb, K. Yocum// In Proceedings of the USENIX Annual Technical Conference. Portland, OR, USA, 2011. Vol. 11. P. 115.

10. Survey on NoSQL database/ J. Han, E. Haihong, G. Le, J. Du// In Proceedings of the 6th International Conference on Pervasive Computing and Applications. Port Elizabeth, South Africa, 2011. P. 363–366.

11. Chebotko A., Kashlev A., Lu S. A Big Data Modeling Methodology for Apache Cassandra// In Proceedings of the 2015 IEEE International Congress on Big Data. IEEE Computer Society. New York, NY, USA, 2015. P. 238–245.

12. Wu H., Shang Z., Wolter K. Learning to Reliably Deliver Streaming Data with Apache Kafka// In Proceedings of the 50th Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN). Valencia, Spain, 2020. P. 564–571.

13. Garg N. Apache Kafka. Packt Publishing: Birmingham, UK, 2013. P. 74.

14. An Introduction to Statistical Learning/G. James, D. Witten, T. Hastie, R. Tibshirani. Springer: Berlin, Germany, 2013. P. 426.

15. Bauer F., Lukas M.A. Comparing Parameter Choice Methods for Regularization of Ill-Posed Problems// Math. Comput. Simul. 2011. № 81. P. 1795–1841.

16. Muthukrishnan R., Rohini R. LASSO: A Feature Selection Technique in Predictive Modeling for Machine Learning// In Proceedings of the International Conference on Advances in Computer Applications (ICACA), Coimbatore, Tamil Nadu, India, 2016. P. 18–20.

17. McDonald G.C. Ridge Regression. Wiley Interdiscip. Rev. Comput. Stat. 2009. № 1. P. 93–100.

18. Tang J., Alelyani S., Liu H. Feature Selection for Classification: A Review. In Data Classification: Algorithms

and Applications; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2014. P. 37–64.

19. Fayyad U.M., Piatetsky-Shapiro G., Smyth P. From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases. *AI Mag.* 1996. № 17. P. 37–54.

20. Hand D.J. Deconstructing Statistical Questions. *Journal of the Royal Statistical Society A.* 1994. №157(3). P. 317-356.

21. Brodley C.E., Smyth P. Applying classification algorithms in practice. *Statistics and Computing.* Forthcoming. 1997 №7. P. 45-56.

22. A NoSQL Approach for Aspect Mining of Cultural Heritage Streaming Data/ G. Vonitsanos, A. Kanavos, A. Mohasseb, D. Tsolis// In Proceedings of the 10th International Conference on Information, Intelligence, Systems and Applications (IISA). Patras, Greece, 2019. P. 1–4.

Поступила 15.08.2022; принята к публикации 17.10.2022

Информация об авторах

Колмогорова Светлана Сергеевна - канд. техн. наук, доцент кафедры информационных систем и технологий, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова (194021, Россия, Санкт-Петербург, Институтский пер., д. 5, Литер У), e-mail: ss.kolmogorova@mail.ru, тел.: 8(960)985-14-14, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8032-0095>

Голубятникова Наталия Олеговна - старший преподаватель кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики», Омский государственный технический университет (644050, Россия, Омск, ул. Мира, д. 11), e-mail: natolgol@yandex.ru, тел.: 8(913)973-26-27, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1879-4550>

ON THE APPLICATION OF BIG DATA STRUCTURE REGULARIZATION IN A DISTRIBUTED EVALUATION SYSTEM FOR EMERGENCY PARAMETERS

S.S. Kolmogorova¹, N.O. Golubyatnikova²

¹ Saint-Petersburg State Forest Engineering University named after S.M. Kirov, Saint-Petersburg, Russia

² Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Abstract: over the past decade, the number of machine learning methods, as well as their areas of application and approaches, has increased significantly due to the need to develop more accurate and reliable forecasting models. An approach to predicting the parameters of an electromagnetic field based on the Apache Spark Streaming distributed environment is considered. Initially, data from various real-time electromagnetic field sensors are processed to the level of structured data, which is the input to the prediction model, which focuses on predicting the type of value given several classes. In addition, in order to improve the prediction performance, a regularization method was used for feature selection to reduce overfitting. The described architecture is an integration of Apache Kafka, Spark and Cassandra and is recommended for application monitoring and predicting the state of systems of various profiles. Experimental analysis shows that the use of the regularization method increases the efficiency of the recurrent neural network in predicting the parameters of the electromagnetic field. The proposed model is able to effectively use mixed applied data, reduces the likelihood of model overfitting and reduces computational costs

Key words: electromagnetic field, streaming data, machine learning, Apache Cassandra, Apache Kafka, Apache Spark, big data, electrometry, prediction, distributed data collection system

References

1. Kolmogorova S.S., Kolmogorov A.S., Baranov D.S., Mokryak A.V. "Platform for monitoring the electromagnetic field to ensure the safety of labor and industrial facilities", *Labor Safety in Industry (Bezopasnost' truda v promyshlennosti)*, 2022, no. 2, pp. 58-63. DOI 10.24000/0409-2961-2022-2-58-63. – EDN WZTIWM.
2. Kolmogorova S.S., Kolmogorov A.S., Baranov D.S. et al. "Distributed control system of technogenic electromagnetic fields using innovative sensors", *Problems of Mechanical Engineering: Proc. of the VI Int. Sci.-Tech. Conf. (Problemy mashinovedeniya)*, Omsk State Technical University, 2022, pp. 102-112. DOI 10.25206/978-5-8149-3453-6-2022-102-112. – EDN CMDTRF.
3. Kolmogorova S.S., Biryukov S.V., Kolmogorov A.S., Baranov D.S. "Automated software and hardware complex of the system for collecting and intelligent data processing", *Devices (Pribory)*, 2022, no. 7(265), pp. 48-55.
4. Kolmogorova S.S., Baranov D.S., Kolmogorov A.S., Biryukov S.V. "Automation of signal processing of electric field intensity sensors included in the information-measuring system", *Omsk Scientific Bulletin (Omskiy nauchnyy vestnik)*, 2019, no. 4(166), pp. 66-70. DOI 10.25206/1813-8225-2019-166-66-70. EDN IBOAUG.

5. Dean J., Ghemawat S. "MapReduce: simplified data processing on large clusters", *Proceedings of the Symposium on Operating System Design and Implementation (OSDI)*, San Francisco, CA, USA, 2004, pp. 137–150.
6. Franciscus N., Milosevic Z., Stantic B. "Influence of parallelism property of streaming engines on their performance", *Proceedings of the New Trends in Databases and Information Systems (ADBIS)*, Prague, Czech Republic, 2016, pp. 104–111
7. Kanavos Andreas, Maria Trigka, Elias Dritsas, Gerasimos Vonitsanos, Phivos Mylonas "A regularization-based big data framework for winter precipitation forecasting on streaming data", *Electronics* 10, 2021, no. 16, pp. 1872. URL: <https://doi.org/10.3390/electronics10161872>
8. Kolmogorova S.S., Kolmogorov A.S., Biryukov S.V. "Measurement of the degree of inhomogeneity of the electric field", *Omsk Scientific Bulletin (Omskiy nauchnyy vestnik)*, 2018, no. 2(158), pp. 45–47. DOI 10.25206/1813-8225-2018-158-45-48. EDN XMRQFF.
9. Logothetis D., Trezzo C., Webb K.C., Yocum K. "In-situ mapreduce for log processing", *Proceedings of the USENIX Annual Technical Conference. Portland, OR, USA*, 2011, vol. 11, pp. 115.
10. Han J., Haihong E., Le G., Du J. "Survey on NoSQL database", *Proceedings of the 6th International Conference on Pervasive Computing and Applications*, Port Elizabeth, South Africa, 2011, pp. 363–366.
11. Chebotko A., Kashlev A., Lu S. "A big data modeling methodology for Apache Cassandra", *Proceedings of the 2015 IEEE International Congress on Big Data. IEEE Computer Society*, New York, NY, USA, 2015, pp. 238–245.
12. Wu H., Shang Z., Wolter K. "Learning to reliably deliver streaming data with Apache Kafka", *Proceedings of the 50th Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN)*, Valencia, Spain, 2020, pp. 564–571.
13. Garg N. "Apache Kafka", Birmingham: Packt Publishing, UK, 2013, 74 p.
14. James G., Witten D., Hastie T., Tibshirani R. "An introduction to statistical learning", Berlin: Springer, Germany, 2013, 426 p.
15. Bauer F., Lukas M.A. "Comparing parameter choice methods for regularization of ill-posed problems", *Math. Comput. Simul.*, 2011, no. 81, pp. 1795–1841.
16. Muthukrishnan R., Rohini R. "LASSO: a feature selection technique in predictive modeling for machine learning", *Proceedings of the International Conference on Advances in Computer Applications (ICACA)*, Coimbatore, Tamil Nadu. India, 2016, pp. 18–20.
17. McDonald G.C. "Ridge Regression", *Wiley Interdiscip. Rev. Comput. Stat.*, 2009, no. 1, pp. 93–100.
18. Tang J., Alelyani S., Liu H. "Feature selection for classification: a review", *Data Classification: Algorithms and Applications*, Boca Raton: CRC Press, FL, USA, 2014, pp. 37–64.
19. Fayyad U.M., Piatetsky-Shapiro G., Smyth P. "From data mining to knowledge discovery in databases", *AI Mag*, 1996, no. 17, pp. 37–54.
20. Hand D.J. "Deconstructing statistical questions", *Journal of the Royal Statistical Society A*, 1994, no. 157(3), pp. 317–356.
21. Brodley C.E., Smyth P. "Applying classification algorithms in practice", *Statistics and Computing. Forthcoming*, 1997, no. 7, pp. 45–56.
22. Vonitsanos G., Kanavos A., Mohasseb A., Tsois D. "A NoSQL approach for aspect mining of cultural heritage streaming data", *Proceedings of the 10th International Conference on Information, Intelligence, Systems and Applications (IISA)*, Patras, Greece, 2019, pp. 1–4.

Submitted 15.08.2022; revised 17.10.2022

Information about the authors

Svetlana S. Kolmogorova, Cand. Sci. (Technical), Associate Professor, St. Petersburg State Forest Engineering University named after S.M. Kirov (5 Institutskiy per., Liter U, St. Petersburg 194021, Russia), e-mail: ss.kolmogorova@mail.ru, tel.: +7(960)985-14-14, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8032-0095>

Nataliya O. Golubyatnikova, Assistant Professor, Omsk State Technical University (11 Mira St., Omsk 644050, Russia), e-mail: natolgol@yandex.ru, tel.: +7(913) 973-26-27, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1879-4550>

РАЗРАБОТКА СХЕМЫ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ УСИЛИТЕЛЕМ КЛАССА D**А.В. Башкиров, И.В. Свиридова, Р.Н. Хорошайлов****Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

Аннотация: в аудиоусилителях с переключаемым режимом для улучшения качества звука усилителя использовались контуры управления. Поскольку в этих усилителях используется высокочастотная модуляция, необходимо внимательно проектировать контроллер. Кроме того, коэффициент качества выходного фильтра может оказать большое влияние на возможности контроллера по подавлению шума и отслеживанию аудиосигнала. Представлены методы проектирования современного управления высокочастотным усилителем класса D. Разработанный метод управления позволяет легко решить проблему проектирования высокопроизводительного контроллера, когда выходной фильтр имеет высокий коэффициент качества звука. Результаты показывают, что контроллер способен обеспечить явное улучшение общего уровня гармонических искажений с улучшением до 30 раз по сравнению с разомкнутым контуром при явном снижении шума, что позволяет добиться лучшего качества звука. Приведены принципы моделирования пространства состояний и то, как его можно использовать в сочетании с усилителями класса D. Современные методы теории управления будут применены для проектирования и моделирования интегрирующего контроллера с полной обратной связью по состоянию для использования с высокочастотным мостовым усилителем класса D

Ключевые слова: усилитель класса D, моделирование, оптимальное управление, модель пространства состояний

Введение

Усилитель мощности с переключаемым режимом работает путем преобразования модуляции входного аудиосигнала в дискретный сигнал высокого уровня частоты, который приводит в действие силовой каскад. Процесс модуляции сигнала является одним из основных источников искажений из-за нелинейностей в процессе. Другим источником искажений является силовой каскад. Каскад питания подключен непосредственно к питающему напряжению, что приводит к тому, что помехи в питающем напряжении отражаются на звуке. Чтобы эти помехи и нелинейности не вносили чрезмерных искажений и шума в усиленный аудиосигнал, были использованы принципы теории обратной связи и управления для исправления и подавления нежелательного поведения усилителя мощности с переключаемым режимом.

Большинство переключаемых усилителей мощности используют принципы классического управления из-за его

прямолинейной теории и простоты реализации в системах Single Input Single Output (SISO). Однако ограничения часто приводят к тому, что управляющее решение оказывается неоптимальным. В зависимости от системы ограничения метода могут быть настолько серьезными, что удовлетворительное решение может быть не получено. В аудиоприложениях это может привести к меньшему снижению искажений и шума, чем это возможно. Одним из способов решения этой проблемы является использование средств современной теории управления. Современное управление, в отличие от управления выходом, учитывает все состояния системы, что позволяет очень точно контролировать динамику.

Моделирование средних значений в пространстве состояний

Модель усреднения по пространству состояний является частным случаем моделирования пространства состояний, которое используется для описания кусочно-непрерывных систем, таких как импульсный источник питания. Метод получил широкое применение, поскольку он обеспечивает внутреннюю модель системы, что делает его

пригодным для описания свойств системы передачи небольших сигналов. Модель усреднения пространства состояний работает путем моделирования всех состояний, которые система может принять в течение периода переключения, отдельно. Затем модели усредняются с помощью средневзвешенного значения, основанного на рабочем цикле, который соответствует выбранной точке линеаризации. Рабочий цикл представляет собой процент времени в периоде переключения, когда уровень дискретного сигнала модулятора будет высоким.

Преобразование фильтра. Для усилителя класса D с нагрузкой, связанной с мостом (рис. 1а), система может принимать два состояния, предполагая, что временем простоя можно пренебречь. Это даст следующие выходные сигналы от усилителя к выходному фильтру:

$$\begin{aligned} V_{sw+} &= \begin{cases} V_{cc} & \forall dT_{sw} \\ 0 & \forall dT_{sw} \end{cases}, \\ V_{sw-} &= \begin{cases} 0 & \forall dT_{sw} \\ V_{cc} & \forall dT_{sw} \end{cases}, \end{aligned} \quad (1)$$

где V_{sw+} и V_{sw-} – дифференциальная выходная пара, d – рабочий период, V_{cc} – напряжение питания для силового каскада, а T_{sw} – время периода переключения. Дифференциальный характер мостового усилителя увеличивает сложность схемы из-за наличия большего количества внутренних состояний по сравнению с одноконтурной схемой. Чтобы свести сложность схемы к минимуму, для преобразования системы в одноконтурную эквивалентную схему используется симметрия дифференциальной конструкции.

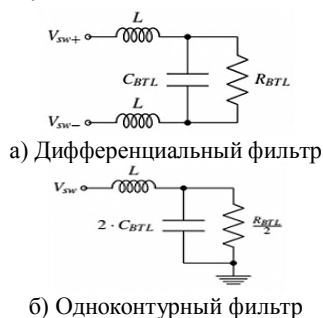


Рис. 1. Преобразование из дифференциального фильтра в одноконтурный фильтр

На рис. 1а и 1б показан дифференциальный фильтр и 1-битный

одноконтурный эквивалент с необходимым преобразованием значений компонентов для достижения тех же свойств фильтра, что и у дифференциального фильтра. Здесь C_{BTL} и R_{BTL} – это емкость и нагрузка для системы, связанной с мостом, которая изменяет значение при преобразовании.

Преобразование фильтра дополнительно упрощает выходные сигналы от силового каскада к выходному фильтру, превращая их в единый выходной сигнал, симметричный относительно опорного напряжения. Уравнение 2 показывает преобразованный выходной сигнал.

$$V_{sw} = \begin{cases} V_{cc} & \forall dT_{sw} \\ -V_{cc} & \forall dT_{sw} \end{cases}. \quad (2)$$

Поскольку аудио является сигналом переменного тока, точка линеаризации устанавливается в качестве опорного напряжения, где рабочий цикл равен $d = 0,5$.

Это приводит к тому, что средняя модель пространства состояний идентична стандартной модели пространства состояний, которая будет использоваться для описания системы. Уравнение 3 показывает стандартную форму модели пространства состояний для линейной неизменяемой по времени (LTI) системы.

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A(t) \cdot x(t) + B(t) \cdot u(t), \\ y(t) = C(t) \cdot x(t) + D(t) \cdot u(t), \end{cases} \quad (3)$$

где $x(t)$ – вектор состояния; $y(t)$ – вектор выхода; $u(t)$ – вектор управления; $A(t)$ – матрица системы; $B(t)$ – матрица управления; $C(t)$ – матрица выхода; $D(t)$ – матрица прямой связи.

Модель пространства состояний. В общем случае желательно моделировать все внутренние состояния, поскольку это обеспечит наиболее точное описание системы. Однако при проектировании аналогового контроллера полного состояния интерес представляют только те внутренние состояния, которые являются непосредственно измеряемой областью. Это связано с тем, что контроллер полного состояния должен иметь путь обратной связи для каждого состояния, что делает крайне важным доступность состояния. Теоретически для моделирования

состояний, которые не поддаются непосредственному измерению, может быть реализован наблюдатель, но на практике было бы весьма удобно использовать аналоговый наблюдатель. Если вместо этого используется цифровое управление, можно получить более полное описание усилителя и акустической системы с помощью оценки состояния. Однако динамики очень нелинейны в рабочей области, поэтому для достижения наилучших результатов следует использовать адаптивные методы.

Непосредственно измеряемыми состояниями в усилителе класса D являются: напряжение акустической системы V_{pc} , ток акустической системы I_{sp} и ток катушки индуктивности I_{ind} . Все три состояния включены в вектор состояния $x(t)$ (уравнение 4).

$$x(t) = \begin{bmatrix} I_{ind} \\ I_{spk} \\ V_{spk} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Выходной фильтр усилителя представляет собой фильтр нижних частот 2-го порядка, поэтому для его описания необходимы только два состояния (V_{spk} и I_{ind}). Включение третьего состояния (I_{spk}) позволяет моделировать динамик как последовательно соединенные резистор и катушку индуктивности. Здесь индуктивность представляет собой самоиндуктивность звуковой катушки громкоговорителя, что увеличивает порядок модели громкоговорителя с 0-го порядка до модели 1-го порядка. На рис. 2 показана смоделированная схема.

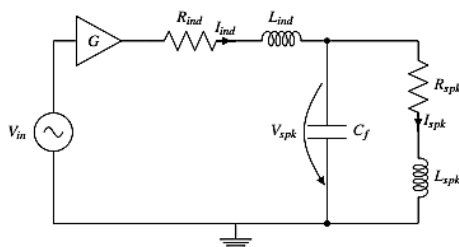


Рис. 2. Схема, смоделированная в модели пространства состояний

Здесь G - коэффициент усиления через модулятор и силовой каскад. Уравнение 5 обеспечивает приблизительное усиление через усилитель, основанное на усилении напряжения и желаемом максимальном индексе модуляции M_{max} .

$$G = \frac{V_{spk}}{V_{in}} M_{max}. \quad (5)$$

Входом в модель пространства состояний $u(t)$ в данном случае является вход аудиосигнала $V_{in}(t)$. Из этого системная матрица A (уравнение 6) и входная матрица B становятся:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_{ind}}{L_{ind}} & 0 & -\frac{1}{L_{ind}} \\ 0 & -\frac{R_{spk}}{L_{spk}} & \frac{1}{L_{spk}} \\ \frac{1}{C_f} & -\frac{1}{C_f} & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{G}{L_{ind}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Для удобства выходной сигнал системы выбирается равным напряжению на акустической системе. Выходным сигналом также может быть ток, проходящий через динамик. Это позволило бы лучше управлять динамиком акустической системы, но также повысило бы требования к точности самоиндукции звуковой катушки, что сделало бы усилитель менее приемлемым для различных аудиосистем. На основе выбранного выходного сигнала выходная матрица C и пропускная матрица D становятся:

$$C = [0 \ 0 \ 1], \quad D = 0.$$

Построив линейную модель пространства состояний, можно назначить значения компонентов. Поставляемый усилитель класса D будет иметь значения компонентов, которые обеспечивают выполнение технических характеристик, приведенных в таблице. Усилитель будет испытан на резистивной нагрузке, поэтому предполагается, что индуктивность нагрузки близка к нулю и оценивается в 2 нГн. Выполнение преобразования фильтра приведет к получению системы и входной матрицы.

Технические характеристики усилителя класса D

Технические характеристики	Значения
Частота среза (f_c)	155 кГц
Добротность (Q)	4,5
Частота переключения холостого хода (f_{sw})	1,9 МГц

Продолжение таблицы

Максимальный индекс модуляции ($M_{\max}$)	76 %
Входное напряжение (V_{in})	2 В
Коэффициент усиления (G)	19,2 дБ
Максимальная выходная мощность (P_{rms})	9 Вт
Сопротивление нагрузке (R_{spk})	8 Ом
Индуктивность нагрузки (L_{sp})	2 нГн

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{37 \text{ мкОм}}{1 \text{ мГн}} & 0 & -\frac{1}{1 \text{ мкГн}} \\ 0 & -\frac{4 \text{ Ом}}{1 \text{ нГн}} & \frac{1}{1 \text{ нГн}} \\ \frac{1}{1.32 \text{ мкФ}} & -\frac{1}{1.32 \text{ мкФ}} & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{9.32}{1 \text{ мкГн}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Ответ системы без обратной связи.

Найденные значения позволяют проанализировать реакцию системы без обратной связи. На рис. 3 показана диаграмма Боде системы без обратной связи.

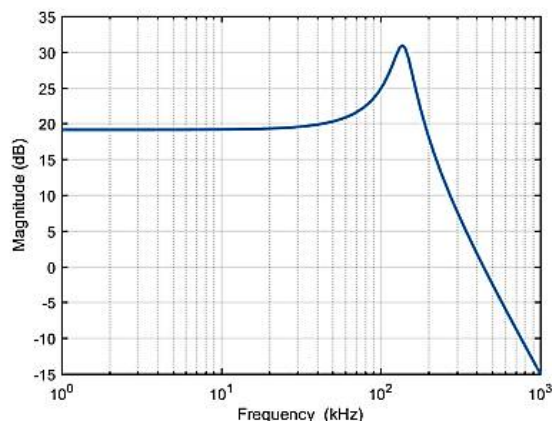


Рис. 3. Рассчитанная диаграмма Боде без обратной связи

Здесь видно, что частотная характеристика повторяет характеристику фильтра нижних частот 2-го порядка с пониженным затуханием. Недостаточное затухание приводит к большому резонансному пику, на 13 дБ превышающему постоянный ток, на собственной частоте (138,6 кГц). Обычно это нежелательно в усилителях класса D, поскольку создаваемые ими затухающие колебания препятствуют повышению точности при использовании классического управления, поскольку увеличение коэффициента усиления на резонансной частоте также увеличивает резонанс. Однако в современном управлении эта проблема легко решается, и, таким образом, резонансный пик может быть использован для улучшения распределения тепла в силовом каскаде за счет перемещения

потерь от переключающих устройств к фильтру.

Чтобы лучше понять уровень колебаний, создаваемых резонансным пиком, проводится ступенчатый отклик. На рис. 4 показан пошаговый отклик системы без обратной связи.

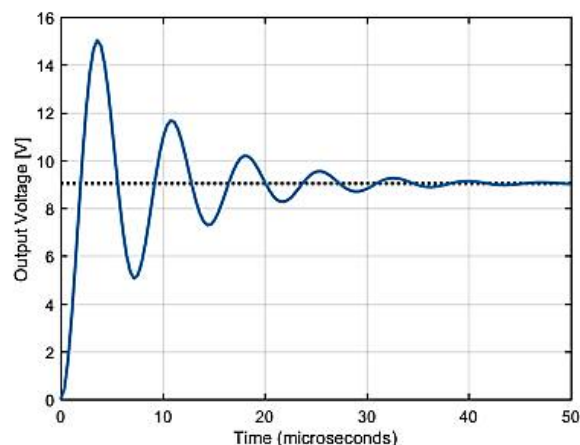


Рис. 4. Расчетная переходная характеристика без обратной связи

Здесь ясно, что колебание генерирует значительные превышения (70,4 %) и устанавливается в пределах 2% от конечного значения за 40,3 мс. Оба эти свойства должны быть уменьшены, чтобы улучшить реакцию системы.

Разработка контроллера

При проектировании контроллера общего состояния должно быть выполнено одно требование. Это необходимо для того, чтобы важные условия работы схемы были контролируемы. Состояние является управляемым, когда на него могут влиять входные данные системы. Если состояние не поддается контролю, оно должно, по крайней мере, быть стабильным, чтобы состояние не менялось с течением времени. Для исследования управляемости используется матрица регулируемости, состоящая из множества комбинаций системных матриц и входных матриц. Из матрицы управляемости количество управляемых состояний может быть определено на основе ранга матрицы. Если ранг заполнен, все состояния поддаются контролю.

Матрица ниже показывает матрицу управляемости для усилительной системы класса D.

$$M_c = \begin{bmatrix} B & AB & A^2B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{G}{L_{ind}} & -\frac{GR_{nd}}{L_{ind}^2} & -\frac{G(L_{ind} - CR_{ind}^2)}{CL_{ind}^3} \\ 0 & 0 & \frac{G}{C \cdot L_{spk} L_{ind}} \\ 0 & \frac{G}{CL_{ind}} & -\frac{GR_{ind}}{C \cdot L_{ind}^2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Поскольку доказано, что все состояния поддаются управлению, могут быть применены методы проектирования интегрального контроллера с полным состоянием.

Интегральное преобразование фильтра. Из-за нелинейностей в усилителе класса D, поступающих от модулятора и выходного фильтра, желательно использовать интегрирующий коэффициент. Понятие интеграции добавляется для улучшения возможностей мониторинга таким образом, что усилитель класса D в определенной степени поддерживает:

$$V_{spk} \propto V_{in}, \quad \forall V_{in} \subseteq V_{span}, \quad (8)$$

где V_{span} - выбранный диапазон входного напряжения, который усилитель может принимать без отсечки. Это свойство особенно полезно, когда контроллер используется в практической реализации, поскольку оно борется с нелинейным поведением. Условие интегрирования приведет к контроллеру для сигнала ошибки $e(t)$ и, таким образом, будет подключено последовательно с усилителем класса D.

Из-за этого важно, чтобы постоянная времени для интегратора приводила к полосе пропускания, превышающей полосу пропускания сигнала, поступающего в систему, для обеспечения подходящего контроля. Для усилителя класса D это означает, что полоса пропускания интегратора должна быть настолько высокой, чтобы аудиосодержание могло проходить через него без ослабления. Звук присутствует в диапазоне от 20 Гц до 20 кГц. Таким образом, интегратор легко сможет удовлетворить это требование благодаря частоте среза выходного фильтра, составляющей 155 кГц, что обеспечивает достаточную полосу пропускания для работы.

Чтобы включить член интегратора в модель пространства состояний, применяется интегральное преобразование:

$$A_i = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix}, \quad B_i = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C_i = [C \quad 0]. \quad (9)$$

Это приводит к дополнительному состоянию для интегратора (q) в модели пространства состояний, следовательно, новый массив состояния становится:

$$x(t) = \begin{bmatrix} I_{ind} \\ I_{spk} \\ V_{spk} \\ q \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Состояние интегрирования q обычно состоит из отрицательного выходного сигнала системы, который в данном случае равен $-V_{spk}$. Это используется в качестве отрицательной обратной связи для генерации сигнала ошибки для контроллера. После выполнения преобразования интегратора к системе может быть применен подход к проектированию линейного квадратичного контроллера.

Линейно-квадратичный регулятор. Линейный квадратичный регулятор (LQR) - это метод оптимизации, используемый в современном управлении для нахождения оптимального регулятора полного состояния с изменяющимся во времени коэффициентом усиления. Однако изменяющиеся во времени усиления часто непрактичны и не нужны, поэтому был разработан упрощенный метод LQR в установившемся режиме, который будет использоваться для системы. Этот метод позволяет оптимизировать функцию затрат, при этом наиболее часто используемой функцией затрат является следующий квадратичный индекс производительности:

$$J(u) = \lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t x^T(t) R_1 x(t) + u(t)^T R_2 u(t) dt, \quad (11)$$

где $x(t)$ - состояния системы, а $u(t)$ - управляющий сигнал для системы. R_1 и R_2 - это матрицы, которые используются для подчеркивания производительности конкретных состояний и управляющих сигналов.

Это может быть решено только численно для нелинейных систем, что становится очень трудоемким. При использовании линеаризованной модели пространства состояний этого можно избежать, и

статическая оптимизация может быть использована для нахождения оптимальных коэффициентов усиления в установившемся режиме для контроллера с полной обратной связью по режиму. Можно показать, что предельное постоянное решение P_∞ для оптимальной функции качества может быть найдено путем решения алгебраического уравнения Риккати

$$0 = A^T P_\infty + P_\infty A + R_1 - P_\infty B R_2^{-1} B^T P_\infty. \quad (12)$$

Из этого следует, что оптимальные постоянные коэффициенты усиления для контроллера полного состояния становятся:

$$K_\infty = R_2^{-1} B^T P_\infty. \quad (13)$$

Для усилителя класса D желательно как можно быстрее компенсировать любые нелинейности и уменьшить затухающие колебания на выходе. Чтобы реализовать это, матрица R_1 предназначена для строгого наказания состояния интеграции. Это переместит полюс интегратора влево в s -плоскости и заставит его расположиться где-то близко к полюсам фильтра 2-го порядка, что сделает постоянную времени интегратора примерно такой же, как у выходных фильтров.

Поскольку затухающие колебания ограничивают движение интегратора, следует ожидать, что LQR дополнительно увеличит затухание выходного фильтра, так что колебания будут уменьшены. Все эти перемещения полюсов приводят к увеличению управляющего сигнала, который ограничен напряжением питания. Важно, чтобы управляющий сигнал не пропадал, поскольку это привело бы к тому, что система работала бы как разомкнутая система. Чтобы избежать этого, матрица коэффициентов R_2 увеличивается, чтобы подчеркнуть размер управляющего сигнала, тем самым уменьшая его.

Результирующий коэффициент усиления показан в уравнении 12. Здесь особенно заметно, что состояние, описывающее ток через динамик, практически не представляет интереса для контроллера. Вероятно, это

связано с тем, что контроллер ориентирован на управление напряжением на динамике, а поскольку ток динамика является результатом напряжения на динамике, ток не имеет значения для управления усилителем.

$$K_\infty = \begin{bmatrix} K_{indI} & K_{spkI} & K_{spkV} & -K_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.177 & -1.062 \cdot 10^{-5} & 0.056 & -5.774 \cdot 10^4 \end{bmatrix} \quad (14)$$

С учетом усиления обратной связи и найденной постоянной времени, контур можно замкнуть в соответствии с системой с обратной связью, показанной на рис. 5

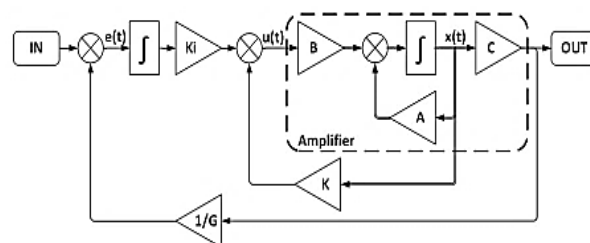


Рис. 5. Усилитель с системой управления

Блок усиления K состоит из первых трех элементов K_∞ , где каждый коэффициент усиления присваивается каждому состоянию усилителя. Последнее усиление в K_∞ устанавливается после интегратора для установки постоянной времени.

Результаты моделирования

Измерения общего гармонического искажения плюс шум (THD+N) определяют производительность системы при воспроизведении звука. На рис. 6 (а-в) показаны измеренные THD+N для реализации для трех частот: 100 Гц, 1 кГц и 6,6 кГц с подключенным контроллером и без него. Частота 6,6 кГц обеспечивает наихудшее измерение THD, поскольку это самая высокая частота до того, как третья гармоника выпадет из звукового спектра. При малой мощности, когда преобладает шум, схема с обратной связью способна подавлять шум лучше, чем схема без обратной связи, благодаря структуре управления, уменьшающей дисперсию шума.

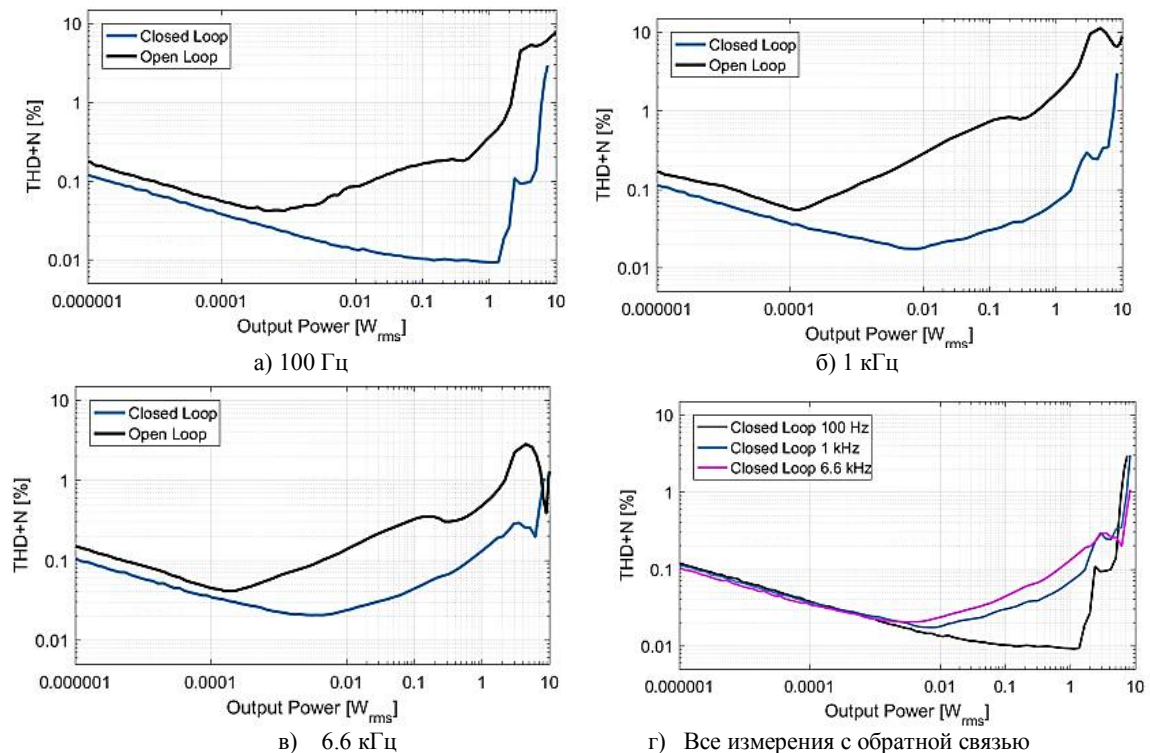


Рис. 6. THD+N в зависимости от выходной мощности, измеренной на усилителе для трех частот: 100 Гц, 1 кГц и 6,6 кГц

Заключение

В этой статье представлены основы современного управления и их использование в сочетании с усилителями класса D. Здесь преобразование фильтра и моделирование в пространстве состояний использовались для построения линейной модели высокочастотного усилителя класса D с большим резонансным пиком. Оптимальный линейный интегральный регулятор с полным состоянием, основанный на модели пространства состояний, был разработан с использованием метода LQR и проверен на линейной модели и модели переключения. Наконец, измерения на усилителе класса D с реализованным контроллером показали общее улучшение с уменьшением THD+N до 30 раз по сравнению с усилителем без контроллера, а также снижение шума через усилитель. Это доказывает, что современные принципы управления обеспечивают хорошие

характеристики усилителей класса D, даже когда выходной фильтр имеет большой резонанс.

Литература

1. Iversen N.E., Knott A. Small signal loudspeaker impedance emulator // Journal of the Audio Engineering Society. 2014. Vol. 62. № 10. P. 676–682.
2. Klippel W. Adaptive Stabilization of Electrodynamic Transducers // Journal of the Audio Engineering Society. 2015. Vol. 63. № 3. P. 154–160
3. Merit B., Novak A. Magnet-Only Loudspeaker Magnetic Circuits: A Solution for Significantly Lower Current Distortion // Journal of the Audio Engineering Society. 2015. Vol. 63. № 6. P. 463–474.
4. Хорошайлова М.В. Архитектура канального кодирования на основе ПЛИС для 5G беспроводной сети с использованием высокоуровневого синтеза // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 2. С. 99–105.
5. Хорошайлова М.В. Реализации нейронной сети на ПЛИС с использованием аппаратных ресурсов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2021. Т. 17. № 3. С. 127–134.

Поступила 01.09.2022; принята к публикации 17.10.2022

Информация об авторах

Башкиров Алексей Викторович – д-р техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: fabi7@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0939-722X>
Свиридова Ирина Владимировна – старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: riss-ka@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5279-0807>

Хорошайлов Роман Николаевич – магистрант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: hrm3001@mail.ru

DEVELOPMENT OF AN OPTIMAL CONTROL SCHEME FOR A D-CLASS HIGH-FREQUENCY AMPLIFIER

A.V. Bashkirov, I.V. Sviridova, R.N. Khoroshaylov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: in audio amplifiers with switchable mode, control loops were used to improve the sound quality of the amplifier. Since these amplifiers use high-frequency modulation, it is necessary to design the controller carefully. In addition, the quality factor of the output filter can have a big impact on the controller's ability to suppress noise and track the audio signal. This article presents design methods for modern management. The developed control method makes it easy to solve the problem of designing a high-performance controller when the output filter has a high-quality coefficient. The results show that the controller is able to provide a clear improvement in the overall level of harmonic distortion with an improvement of up to 30 times compared to an open loop with a clear reduction in noise, which allows for better sound quality. The principles of modeling the state space and how it can be used in combination with Class D amplifiers are given. Modern methods of control theory will be applied to design and simulate an integrating controller with full state feedback for use with a Class D high-frequency bridge amplifier

Key words: class D amplifier, modeling, optimal control, state space model

References

1. Iversen N.E., Knott A. "Small signal loudspeaker impedance emulator", *Journal of the Audio Engineering Society*, 2014, vol. 62, no. 10, pp. 676–682.
2. Klippel W. "Adaptive stabilization of electrodynamic transducers", *Journal of the Audio Engineering Society*, 2015, vol. 63, no. 3, pp. 154–160
3. Merit B., Novak A. "Magnet-only loudspeaker magnetic circuits: a solution for significantly lower current distortion", *Journal of the Audio Engineering Society*, 2015, vol. 63, no. 6, pp. 463–474.
3. Khoroshaylova M.V. "Architecture of FPGA based channel coding for 5G wireless network using high-level synthesis", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 2, pp. 99-105
4. Khoroshaylova M.V. "Implementation of a neural network on FPGA using hardware resources", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2021, vol. 17, no. 3, pp. 127-134

Submitted 01.09.2022; revised 17.10.2022

Information about the authors

Aleksey V. Bashkirov, Dr. Sci. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: fab7@mail.ru, ORCID ID <http://orcid.org/0000-0003-0939-722X>
Irina V. Sviridova, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: riss-ka@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5279-0807>
Rovan N. Khoroshaylov, MA, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: hmn3001@mail.ru

ЦИФРОВОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ЗНАЧЕНИЯ СИГНАЛА

В.П. Литвиненко, Ю.В. Литвиненко, Д.В. Шатилов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматривается цифровой измеритель действующего значения сигналов произвольной формы. Вычислительный алгоритм реализует прямое определение искомой величины без необходимости пересчета показаний в зависимости от формы сигнала, не требует синхронизации с обрабатываемым сигналом и обеспечивает формирование итогового результата после поступления каждого очередного символа при минимуме простых арифметических операций и высокой точности измерений. Проведен анализ характеристик измерителя, рассмотрено влияние на точность асинхронности выборки отсчетов сигнала с его периодичностью. Сформулированы требования к разрядности аналого-цифрового преобразователя и объема выборки отсчетов измеряемого сигнала. Проведено статистическое имитационное моделирование цифрового измерителя, получены оценки погрешности результата. Реализованы макеты высокоточного источника переменного напряжения на основе цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) и измерителя действующего значения напряжения на базе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС), проведена оценка необходимых аппаратных ресурсов. Получены результаты измерения постоянных и переменных (гармонического и пилообразного) напряжений, формируемых на основе прецизионных источников опорного напряжения. Измеритель может быть использован при проектировании цифровых вольтметров и амперметров переменного тока, показания которых не зависят от формы сигнала, допускает простую аппаратную реализацию и обеспечивает возможность измерения как низкочастотных, так и высокочастотных переменных сигналов

Ключевые слова: действующее значение сигнала, измерение, погрешность, моделирование, программируемые логические интегральные схемы

Введение

В различных областях радиоэлектроники возникает необходимость измерения уровней переменного напряжения (или тока), для которого наиболее распространенной мерой является действующее значение. В большинстве случаев вольтметр переменного тока реагирует (физически измеряет) средневыврявленное значение, а его шкала градуируется в действующих значениях гармонического сигнала [1].

При негармоническом сигнале показания измерителя действующего значения будут ошибочными и их необходимо пересчитывать в зависимости от известной формы сигнала [2], а если форма неизвестна, то точные измерения невозможны.

Известен цифровой измеритель действующего значения сигнала [3], описанный в [4, 5], обеспечивающий высокую точность результата при минимальных вычислительных затратах. Задачей исследований является оценка погрешностей измерения действующего значения напряжения произвольной формы при реализации устройства на базе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС).

Действующее значение сигнала

Переменный сигнал $s(t)$ характеризуется

различными параметрами [2, 6], его энергетическим эквивалентом является действующее значение, определяемое выражением

$$S_d = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} s(t)^2 dt}, \quad (1)$$

t_0 – момент начала интегрирования, T – период интегрирования. При произвольном интервале измерения T_i , не синхронизированном с сигналом, приближенно получим

$$\tilde{S}_d \approx \sqrt{\frac{1}{T_i} \int_{t_0}^{t_0+T_i} s(t)^2 dt}. \quad (2)$$

В [5] показано, что для гармонического сигнала при $T_i/T > 10 \div 20$ величина $\tilde{S}_d$ отличается от S_d (1) меньше чем на 0,8%.

Действующее значение сигнала $s(t)$ можно определить по последовательности из N отсчетов s_i , i – текущий номер отсчета, в виде [3-5]

$$\tilde{S}_{di} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} s_{i-j}^2}, \quad (3)$$

время измерения T_i равно

$$T_i = N\tau, \quad (4)$$

τ – интервал дискретизации сигнала.

Цифровой алгоритм измерения действующего значения сигнала

Структурная схема цифрового измерителя действующего значения напряжения показана на рис. 1 [3]. Входной сигнал $s(t)$ поступает на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП), формирующего его отсчеты s_i . Они поступают на оба входа цифрового умножителя и

на его выходе формируются квадраты s_i^2 , поступающие в блок накопления отсчетов (БНО), в котором вычисляется сумма

$$S_i = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} s_{i-j}^2. \quad (5)$$

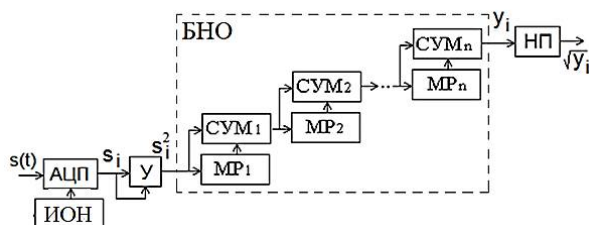


Рис. 1. Структурная схема измерителя

В первом сумматоре СУМ₁ формируется сумма текущего s_i и предшествующего s_{i-1} отсчетов (значение s_{i-1} записано в предыдущем такте в многоразрядный регистр сдвига МР₁ емкостью в одну ячейку). Полученный результат $s_i + s_{i-1}$ поступает на вход сумматора СУМ₂, на второй вход которого подается сумма $s_{i-2} + s_{i-3}$ с выхода регистра МР₂ емкостью две ячейки, в который она была записана на два такта ранее. Аналогично в третьем сумматоре вычисляется сумма восьми ближайших отсчетов и так далее. На выходе сумматора СУМ_n формируется величина (5).

Рассмотренный алгоритм обработки отсчетов сигнала позволяет вычислить сумму N с помощью $n = \log_2 N$ каскадов БНО, например, при $N = 2^{12} = 4096$ необходимо $n = 12$.

Примеры сигналов

При измерении действующего значения сигнала S_d прибором, реагирующим на средневыпрямленное значение $S_{св}$,

$$S_{св} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} |s(t)| dt, \quad (6)$$

полученную величину $S_{св}$ необходимо умножить на коэффициент формы K_Φ , по определению [2] равный

$$K_\Phi = \frac{S_d}{S_{св}}. \quad (7)$$

Примеры сигналов показаны на рис. 2.

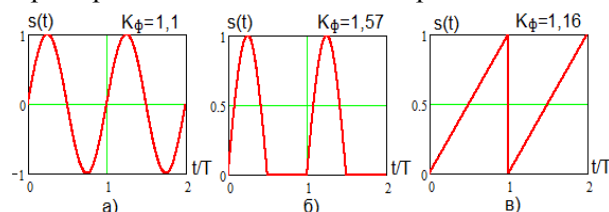


Рис. 2. Измеряемые сигналы

Для гауссовского шума $s_{ш}(t)$ с нулевым средним и дисперсией σ^2 средневыпрямленное значение $S_{св ш}$ равно

$$S_{св ш} = \int_{-\infty}^{\infty} |x| \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \exp \left\{ -\frac{x^2}{2\sigma^2} \right\} dx = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \sigma, \quad (8)$$

а действующее (среднеквадратическое) значение равно σ , то есть $K_\Phi = \sqrt{\pi/2} = 1,253$.

Как видно, сигналы имеют различные значения K_Φ и шкала традиционного измерителя действующего значения должна соответственно корректироваться. Цифровой измеритель, схема которого показана на рис. 1, формирует правильный результат независимо от его формы.

Влияние разрядности АЦП и объема выборки отсчетов на погрешность измерения

Число m двоичных разрядов АЦП определяет динамический диапазон входного сигнала $D = S_{max}/S_{min}$. В измерительных приборах его ограничивают введением пределов измерения (в стрелочных приборах с кратностью 1 или 3, а в цифровых – 10), что позволяет снизить требования к m . Согласно [5], погрешность измерения действующего значения сигнала при $m \geq 6$ снижается незначительно, поэтому целесообразно выбрать $m = 8$.

Проведенные в [5] исследования показывают, что при обработке периодического сигнала при $T_i/T > 20$ погрешность измерения действующего значения не выше 3% и падает с ростом $N \geq 2^{10}$. Например, при $N = 2^{10}$ погрешность измерения действующего значения шума равна 2,4%, а при $N = 2^{16}$ она падает до 0,44%. Таким образом, рассматриваемый измеритель должен обрабатывать в реальном времени большие объемы выборки отсчетов, что и обеспечивает схема на рис. 1.

Аппаратная реализация измерителя

Разработка рассматриваемого цифрового измерителя выполнена на ПЛИС Altera Cyclone III модели EP3C10E144C8 на отладочной плате «Marsohod2» [7], в которую входит микросхема восьмиразрядного АЦП ADC1175. Для отображения результата измерения к плате подключен цифровой индикатор. Исследуемые сигналы формируются модулем двенадцатиразрядного ЦАП MCP4725, связь между ведущим устройством (Master) и ведомым (Slave) осуществляется по последовательному интерфейсу передачи I2C (TWI).

Проектирование схемы выполнено на языке описания аппаратуры Verilog HDL. Для конфигурирования интегральной схемы использовано программное обеспечение Quartus II.

На плате установлены два источника опор-

ного напряжения (ИОН) LM1117 с выходными напряжениями 1,2 В и 3,3 В с погрешностью 1%, которые используются для оценки точности измерений.

Дополнительно в схему добавлен ИОН MCP1541T-I/T с напряжением 4,096 В с погрешностью 1%, задающий опорные напряжения микросхем ЦАП и АЦП. Для усиления его выходного тока добавлен повторитель напряжения на ОУ LM358P,

Анализ возможностей ПЛИС

Для реализации измерителя с числом ступеней БНО $n = 12$ (рассчитан на суммирование 4096 отсчетов) на базе ПЛИС Cyclone III использованы: 886 логических вентилей (9% от имеющейся базы логических элементов), 562 регистра (5%), 18 контактов (пинов) (19%) и 105 793 ячеек внутренней памяти (25%).

На базе рассматриваемой недорогой ПЛИС реализуется измеритель с $n = 13$ (суммирование 8192 отсчетов). При необходимости реализации большего числа каскадов БНО не хватает внутренней памяти ПЛИС и можно использовать интегрированную в плату «Marsohod2» микросхему SDRAM MT48LC4M16A2-75 с памятью 64 Мбит.

Зависимости числа логических вентилей $K1$ и регистров $K2$ от n показаны на рис. 3а. Как видно, они имеют монотонно растущий характер. На рис. 3б показана зависимость необходимого числа ячеек памяти R от n , имеющая практически экспоненциальный характер.

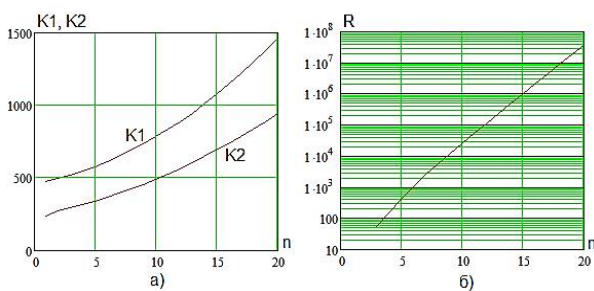


Рис. 3. Необходимые ресурсы

Рассматриваемая ПЛИС обеспечивает число каскадов БНО до $n = 20$, что вполне достаточно [5] для реализации точных измерений. С ростом $n > 15$ повышаются требования к скоростным характеристикам ПЛИС и экспоненциально увеличивается длительность переходного процесса формирования результата измерения.

Интервал Δt дискретизации АЦП измеряемого напряжения определяется его частотой тактового генератора – в простейшем варианте

накопления на периоде необходимо формировать несколько десятков отсчетов. Однако согласно [4, 5], при небольших хаотических изменениях Δt число отсчетов на периоде сигнала может быть значительно меньше при сохранении большого объема N выборки.

Измеряемое напряжение

Для оценки погрешности необходимо достаточно точное измеряемое постоянное напряжение, формируемое ИОН LM1117. Переменное напряжение различной формы поступает с выхода двенадцатиразрядного ЦАП с опорным напряжением от ИОН MCP1541T-I/T, что обеспечивает погрешность сформированного сигнала не более 1%.

Выбор частоты измеряемого переменного напряжения 50 Гц обусловлен его широким распространением и удобством его точного формирования с помощью ЦАП с интерфейсом I2C. В соответствии с этим частота дискретизации АЦП выбрана равной 6,7 кГц (134 отсчета на периоде сигнала).

Измерение постоянного напряжения

Исследуемый измеритель позволяет определять постоянное напряжение (оно совпадает с действующим значением этого сигнала), результаты могут использоваться для калибровки прибора.

Результаты измерения постоянного напряжения представлены в табл. 1. Относительная погрешность измерения равна

$$\delta = \frac{|\Delta U|}{U_{\text{вх}}} = \frac{|U_{\text{и}} - U_{\text{вх}}|}{U_{\text{вх}}}, \quad (9)$$

$U_{\text{вх}}$ – заданное входное напряжение, $U_{\text{и}}$ – измеренное напряжение.

Таблица 1

Измерение постоянного напряжения

	$U_{\text{вх}}, \text{В}$	$U_{\text{и}}, \text{В}$	$ \Delta U , \text{В}$	$\delta, \%$
ИОН 1,2 В	1,200	1,200	0	0
ИОН 3,3 В	3,300	3,280	0,020	0,61
ЦАП (код)	0xFA0	4,000	4,000	0
	0xC5F	3,167	3,136	0,031
	0x800	2,048	2,032	0,016

Как видно, обеспечивается погрешность измерения не более 1%.

Измерение переменного напряжения

Измеряемые переменные напряжения имеют гармоническую и пилообразную форму с частотой 50 Гц и дискретизируются восьмизрядным АЦП с частотой 6,7 кГц.

Выполнены измерения действующего значения гармонического сигнала при разном количестве каскадов БНО $n = 7, 8, \dots, 13$. Относи-

тельная погрешность измерения δ определяется (9), где $U_{\text{и}}$ – измеренное, а $U_{\text{вх}}$ – заданное на выходе ЦАП действующие значения сигнала.

Для обеспечения высокой точности измерителя необходим БНО, содержащий $n = 13$ каскадов. В этом случае измеренное действующее значение напряжения $U_{\text{и}}$ равно 2,432 В, при заданной на выходе ЦАП величине 2,449 В; относительная погрешность измерения составляет 0,69%. Для оценки меньших погрешностей необходим ИОН с погрешностью не более 0,1%, например, МСР1501-40.

График зависимости относительной погрешности δ от количества каскадов n при исследовании гармонического воздействия, показанный на рис. 4а, показывает, что фиксированные и достоверные значения на частоте дискретизации 6,7 кГц можно получить, если количество ступеней больше 11, иначе показания не устойчивы и погрешность велика.

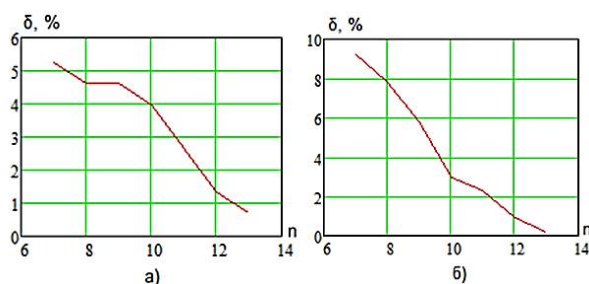


Рис. 4. Относительная погрешность

Проведены измерения действующего значения пилообразного сигнала (рис. 2в) при числе каскадов суммирования n от 7 до 13, относительная погрешность измерения определяется из (9).

Для обеспечения высокой точности измерителя нужен БНО, содержащий не менее 12 каскадов. При $n = 12$ индикатор показывает действующее значение напряжения 2,288 В при установленной величине 2,309 В, при этом относительная погрешность измерения составляет 0,91%. Если БНО содержит 13 каскадов, то действующее значение напряжения равно 2,304 В; относительная погрешность измерения – 0,22%.

График зависимости относительной погрешности показаний δ от количества каскадов n при исследовании пилообразного сигнала показан на рис. 4б, результаты аналогичны.

На частоте дискретизации 6,7 кГц и входном гармоническом напряжении $U_{\text{вх}} = 2,449$ В с частотой 50 Гц при $n = 12$ проведена оценка влияния на погрешность δ разрядности АЦП

m , результаты приведены в табл. 2. Эксперименты подтверждают результаты моделирования [3-5], значение $m = 8$ достаточно для реализации измерителя, а для снижения погрешности целесообразно увеличивать n .

Таблица 2

Влияние разрядности АЦП

m	8	7	6	5
$\delta, \%$	1,35	2,00	3,31	5,92

При тех же условиях проведена оценка влияния на погрешность δ частоты $f_{\text{д}}$ дискретизации АЦП. С повышением $f_{\text{д}}$ от 6,7 кГц до 28 кГц при $N = 2^{12}$ число обрабатываемых периодов уменьшилось с 30,6 до 7,3, при этом погрешность увеличилась в три раза. Согласно [4, 5], интервал обработки сигнала должен охватывать несколько десятков периодов, то есть необходимо увеличивать число каскадов БНО.

Заключение

Исследован цифровой измеритель действующего значения сигнала произвольной формы. Реализован действующий макет устройства на базе недорогой ПЛИС на отладочной плате «Marsohod2» с восьмиразрядным АЦП и внешним ИОН с напряжением 4,096 В и погрешностью не более 1%.

Проведены измерения действующего значения постоянного и переменного (гармонического и пилообразного) напряжений при различном числе n каскадов блока накопления отсчетов. Для обеспечения погрешности менее 1% необходимо $n > 12$ для сигналов различной формы. Показано, что снижение разрядности АЦП и повышение частоты дискретизации увеличивает погрешность измерения, для ее уменьшения необходимо больше каскадов БНО. В целом целесообразно обеспечивать $n = 13 \div 15$.

Литература

1. Данилин А.А., Лавренко Н.С. Измерения в радиоэлектронике: учеб. пособие/ под ред. А.А. Данилина. СПб.: Лань, 2017. 408 с.
2. Кунцевич В.А. Измерение параметров напряжения различной формы: учеб. пособие. М.: Изд-во МАИ, 1991. 48 с.
3. Пат. № 2685062 С1 Российская Федерация, МПК 51G01R 19/02. Цифровой измеритель действующего значения сигнала/ Черноярков О.В., Сальникова А.В., Литвиненко В.П., Литвиненко Ю.В., Матвеев Б.В., Пчелинцев Е.А.; заявитель и патентообладатель Национальный исследовательский Томский государственный университет. № 2018126371; заявл. 17.07.2018; опубл. 16.04.2019; бюл. № 11
4. Digital algorithm for determining the root-mean-square signal / O. Chernoyarov, V. Litvinenko, B. Mat-

veev, S. Dachian, K. Melnikov // 32nd European Modeling & Simulation Symposium 17th International Multidisciplinary Modeling & Simulation Multiconference, 2020. P. 22-27.

5. Digital Root-mean-square Signal Meter / O.V. Chernoyarov, V.P. Litvinenko, A.N. Glushkov, B.V. Matveev, A. Faulgaber // N.IE TRANSACTIONS B: Applications. 2020. Vol. 33. № 11. P.2201-2208.

6. Голиков А.М. Метрология и электрорадиоизмерения в телекоммуникационных системах: метод. указания по практическим и семинарским занятиям. Томск: Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2009. 82 с.

7. URL: <https://marsohod.org/howtostart/marsohod2>.

Поступила 01.08.2022; принята к публикации 17.10.2022

Информация об авторах

Литвиненко Владимир Петрович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: litvinvp@gmail.com.

Литвиненко Юлия Владимировна – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: j.v.litvinenko@yandex.ru

Шатилов Данила Владимирович – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: dan.dan.175@mail.ru.

DIGITAL METER OF THE EFFECTIVE VALUE OF THE SIGNAL

V.P. Litvinenko, Y.V. Litvinenko, D.V. Shatilov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: a digital meter of the effective value of arbitrary waveform signals is considered. The computational algorithm implements a direct determination of the desired value without the need to recalculate readings depending on the signal shape, does not require synchronization with the processed signal, and provides the formation of the final result after the arrival of each next symbol with a minimum of simple arithmetic operations and high measurement accuracy. The analysis of the characteristics of the meter is carried out, the influence on the accuracy of the sample of signal samples with its periodicity is considered. The requirements for the bit capacity of the analog-to-digital converter and the sample size of the samples of the measured signal are formulated. Statistical simulation of a digital meter has been carried out, estimates of the error of the result have been obtained. Models of a high-precision AC voltage source based on a digital-to-analog converter (DAC) and an effective voltage value meter based on a field-programmable logic integrated circuit (FPGA) have been implemented, and an assessment of the necessary hardware resources has been carried out. The results of measurements of constant and variable (harmonic and sawtooth) voltages formed on the basis of precision reference voltage sources are obtained. The meter can be used in the design of digital AC voltmeters and ammeters, the readings of which do not depend on the waveform, allow for a simple hardware implementation and provide the ability to measure both low-frequency and high-frequency alternating signals

Key words: effective signal value, measurement, error, modeling, programmable logic integrated circuits

References

1. Danilin A.A., Lavrenko N.S. "Measurements in radio electronics" ("Izmereniya v radioelektronike"), St. Petersburg: Lan, 2017, 408 p.
2. Kuntsevich V.A. "Measurement of voltage parameters of various forms" ("Izmerenie parametrov napryazheniya razlichnoy formy"), Moscow, MAI, 1991, 48 p.
3. Chernoyarov O.V., Salnikova A.V., Litvinenko V.P., Litvinenko Yu.V., Matveev B.V., Pchelintsev E.A. "Digital measurement of the effective signal value" ("Tsifrovoy izmeritel' deystvuyushchego znacheniya signala"), RF patent no. 2685062 dated 16.04.2019.
4. Chernoyarov O., Litvinenko V., Matveev B., Da-chian S., Melnikov K. "Digital algorithm for determining the root-meansquare signal", *32nd European Modeling & Simulation Symposium 17th International Multidisciplinary Modeling & Simulation Multiconference 2020*, pp. 22-27.
5. Chernoyarov O.V., Litvinenko V.P., Glushkov A.N., Matveev B.V., Faulgaber A.N. "Digital root-mean-square signal meter", *IJE TRANSACTIONS B*, vol. 33, no. 11, pp. 2201-2208.
6. Golikov A.M. "Metrology and electrical and radio measurements in telecommunication systems" ("Metrologiya i elektroradioizmereniya v telekommunikatsionnykh sistemakh"), Tomsk: State University of Control Systems and Radioelectronics, 2009, 82 p.
7. <https://marsohod.org/howtostart/marsohod2>.

Submitted 01.08.2022; revised 17.10.2022

Information about the authors

Vladimir P. Litvinenko, Cand. Sci. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: litvinvp@gmail.com.

Yuliya V. Litvinenko, Cand. Sci. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: j.v.litvinenko@yandex.ru

Danila V. Shatilov, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: dan.dan.175@mail.ru.

ИССЛЕДОВАНИЕ СДВОЕННОГО СФЕРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ С СОСТАВНЫМИ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

С.В. Бирюков^{1,2}, А.В. Тюкин², Л.В. Тюкина³

¹Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

²Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, г. Омск, Россия

³Омский промышленно-экономический колледж, г. Омск, Россия

Аннотация: исследуется новый тип электроиндукционных сферических датчиков напряженности электрического поля, относящийся к сдвоенным датчикам. Сдвоенные датчики по конструктивному исполнению чувствительных элементов делятся на три группы. К ним относятся датчики с накладными, составными и отдельными чувствительными элементами. Ранее автором были исследованы датчики с накладными чувствительными элементами. Данная работа посвящена исследованию сдвоенных датчиков с составными чувствительными элементами. Исследование проводилось с целью улучшения метрологических характеристик известных электроиндукционных сферических датчиков при их использовании в сильно неоднородных электрических полях. Результаты исследования показали, что сдвоенные датчики обладают лучшими метрологическими характеристиками, чем известные. При проведении исследований установлена взаимосвязь погрешности сдвоенного датчика от неоднородности поля и его угловых размеров чувствительных элементов. С учетом этой взаимосвязи составлена математическая модель, с использованием которой проведена оптимизация угловых размеров чувствительных элементов датчика с точки зрения минимума погрешности и максимума пространственного диапазона измерения. В результате моделирования установлены оптимальные угловые размеры чувствительных элементов сдвоенного датчика с составными чувствительными элементами, равные $\theta_1=46,38^\circ$, $\theta_2=49,02^\circ$ и $\theta_3=90^\circ$. Этим угловым размерам составных чувствительных элементов соответствует минимально возможная погрешность $\delta = \pm 2,25\%$

Ключевые слова: напряженность электрического поля, измерение, двойные датчики, сдвоенные датчики, составные чувствительные элементы, погрешность от неоднородности поля

Введение

Данная работа относится к циклу статей, посвященных сдвоенным электроиндукционным сферическим датчикам напряженности электрического поля (ЭП). Электроиндукционные датчики широко используются в приборах для измерения напряженности ЭП промышленной частоты, позволяющих осуществлять контроль уровней напряженности ЭП на территориях линий электропередачи (ЛЭП) и подстанций (ПС) сверхвысокого напряжения. Такие датчики просты в изготовлении и хорошо зарекомендовали себя на практике. Их можно классифицировать по следующим классификационным признакам [1]: чувствительность к направлению, числу координат, форме чувствительных элементов, конструктивному исполнению.

Согласно представленной классификации анализ научно-технической литературы позволил выявить следующие датчики: по чувствительности к направлению [2] – датчики направленного [3-24,] и не направленного [1, 10, 11,

25-40] приема; по числу координат – датчики одно- [3-19], двух- [20-24] и трехкоординатные [27-40]; по форме чувствительных элементов – датчики планарные [3-8, 27-36], кубические [9-11], цилиндрические [12-14, 20, 21, 37] и сферические [11, 15-19, 22-24, 38-40]; по конструктивному исполнению – датчики одинарные [4, 5, 9, 10], двойные [3, 6-8, 11-16, 20-39] и сдвоенные [17-19, 40].

Особое внимание в статье будет уделено сдвоенным датчикам напряженности ЭП. Понятие «сдвоенные датчики» было введено автором совсем недавно [40] и оно позволило дополнить конструкционный классификационный признак еще одним видом датчиков – сдвоенные датчики.

Появлению понятия «сдвоенный датчик» предшествовало создание нового метода измерения напряженности ЭП по среднему значению [41, 42].

Сдвоенные датчики можно классифицировать по способу формирования чувствительных элементов. По этому признаку сдвоенные датчики делятся на датчики с накладными, составными и отдельными

чувствительными элементами.

Как отмечалось выше, сдвоенным датчикам посвящается серия статей. Первая статья была посвящена сдвоенным датчикам с накладными чувствительными элементами [43]. Данная статья будет направлена на изучение особенностей сдвоенных датчиков с составными чувствительными элементами с целью выявления их возможностей.

Постановка задачи

Изучение особенностей сдвоенных датчиков с составными чувствительными элементами требует решения следующих задач:

1) исследовать различные конструктивные особенности сдвоенных электроиндукционных сферических датчиков напряженности электрического поля и их составных чувствительных элементов;

2) выявить взаимосвязь между погрешностью сдвоенного датчика от неоднородности поля, пространственным диапазоном измерения и его угловых размеров составных чувствительных элементов;

3) оптимизировать конструктивные размеры чувствительных элементов сдвоенного датчика с точки зрения минимума погрешности от неоднородности поля и максимума пространственного диапазона измерения.

Теория

В основе теории построения сдвоенных сферических датчиков напряженности ЭП с составными чувствительными элементами лежит теория одинарных и двойных датчиков [1].

Пример сдвоенного датчика с составными чувствительными элементами, состоящего из двух двойных датчиков, представлен на рис. 1.

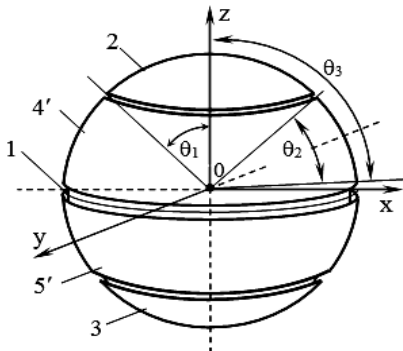


Рис. 1. Сдвоенный сферический датчик с чувствительными элементами в форме сферических сегментов 2, 3 и сферических слоёв 4', 5'

Сдвоенный датчик с составными чувствительными элементами состоит из проводящего сферического основания 1 и элементов 2–5' (рис. 1). Элементы 2, 3 выполнены в форме сферических сегментов с угловым размером θ_1 , а элементы 4', 5' выполнены в форме сферического слоя с угловыми размерами у вершины $\theta_2 \geq \theta_1$ и у основания $\theta_1 \leq 90^\circ$. Формы и угловые размеры элементов 2–5' представлены на рис. 2.

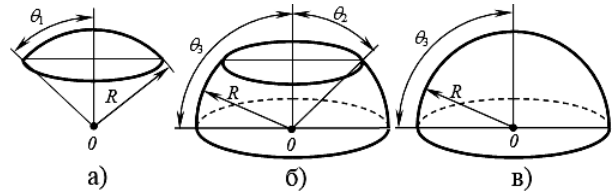


Рис. 2. Различные формы чувствительных элементов:
а) сферический сегмент;
б) сферический слой; в) полусфера

Элементы 2, 3 являются чувствительными элементами, входящими в состав первого двойного датчика, и частями чувствительных элементов второго двойного датчика. Элементы 2+4' и 3+5' являются чувствительными элементами второго двойного датчика.

Двойные сферические датчики имеют два диаметрально противоположных чувствительных элемента. Для первого датчика это элементы 2 и 3 (см. рис. 1), а для второго датчика – составные элементы 2+4' → 4 и 3+5' → 5 (см. рис. 1). При внесении датчиков в ЭП на их чувствительных элементах индуцируются электрические заряды. Тогда для первого двойного датчика, состоящего из двух чувствительных элементов в форме сферических сегментов, индуцированные заряды с учетом погрешностей можно записать [40]

$$q_2(t) = -3\pi\epsilon_0\epsilon R^2 \sin^2 \theta_1 \cdot [1 + \delta_{n2}] \cdot E(t); \quad (1)$$

$$q_3(t) = 3\pi\epsilon_0\epsilon R^2 \sin^2 \theta_1 \cdot [1 + \delta_{n3}] \cdot E(t), \quad (2)$$

где знак «-» минус показывает, что ЭП направлено на чувствительный элемент 2; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая постоянная; ϵ – диэлектрическая проницаемость среды; R – радиус сферического сегмента; θ_1 – угловой размер чувствительного элемента; δ_{n2} и δ_{n3} – погрешности от неоднородности ЭП в определении электрических зарядов вторым и третьим чувствительными элементами; R – радиус сферического основания датчика; $E(t)$ – измеряемая напряженность ЭП.

Алгоритм снятия сигналов с двойных дат-

чиков сводится к формированию дифференциального сигнала с помощью дифференциальных усилителей заряда [40].

Для первого двойного датчика дифференциальный электрический заряд определится через выражения (1) и (2)

$$\Delta q_{23}(t) = q_2(t) - q_3(t) = -6\pi\epsilon_0\epsilon R^2 \sin^2 \theta_1 \cdot E_1(t) \quad (3)$$

где

$$E_1(t) = E(t) \cdot \left(1 + \frac{\delta_{n2} + \delta_{n3}}{2}\right) = E(t) \cdot (1 + \delta_{23}) \quad (4)$$

$$\delta_{n2} = \left[\left(\frac{1+a}{2a^2 \sin^2 \frac{\theta_1}{2}} \right) \cdot \left(1 - \frac{1-a}{\sqrt{1-2a \cos \theta_1 + a^2}} \right) - \frac{1}{a} \right] - 1 \cdot 100; \quad (5)$$

$$\delta_{n3} = \left[\left(\frac{1-a}{2a^2 \sin^2 \frac{\theta_1}{2}} \right) \cdot \left(1 - \frac{1+a}{\sqrt{1+2a \cos \theta_1 + a^2}} \right) + \frac{1}{a} \right] - 1 \cdot 100; \quad (6)$$

$$\delta_{23} = \left[\frac{1}{3a^2 \sin^2 \theta_1} \cdot \left(2 - \frac{1-a^2}{\sqrt{1-2a \cos \theta_1 + a^2}} - \frac{1-a^2}{\sqrt{1+2a \cos \theta_1 + a^2}} \right) \right] - 1 \cdot 100, \quad (7)$$

где в формулах (5) - (7) $a = R/d$ – пространственный диапазон измерения; R – радиус сферического основания 1 датчика; d – расстояние от центра сферического основания датчика до

источника поля.

Для второго двойного датчика дифференциальный электрический заряд нужно сформировать, т. к. его чувствительные элементы являются составными, состоящими из элементов 2+4' и 3+5'. Поскольку индуцированные электрические заряды на чувствительных элементах 2 и 3 определены (см. выражения (1) и (2)), то определим электрические заряды на элементах 4' и 5'.

При внесении сдвоенного датчика в электрическое поле на элементах 4' и 5' будут индуцироваться заряды

$$q_4(t) = -3\pi\epsilon_0\epsilon R^2 \cdot \sin(\theta_3 - \theta_2) \cdot \sin(\theta_3 + \theta_2) \cdot (1 + \delta_{n4}) \cdot E(t) \quad (8)$$

$$q_5(t) = 3\pi\epsilon_0\epsilon R^2 \cdot \sin(\theta_3 - \theta_2) \cdot \sin(\theta_3 + \theta_2) \cdot (1 + \delta_{n5'}) \cdot E(t) \quad (9)$$

Тогда для составных чувствительных элементов, состоящих из пар 2+4'=4 и 3+5'=5, электрические заряды будут определяться суммой зарядов с элементов, входящих в каждую пару. С учетом этого

$$q_4(t) = q_2(t) + q_4'(t) = -3\pi\epsilon_0\epsilon R^2 \cdot \sin^2 \theta_3 \cdot (1 + \delta_{n4}) \cdot E(t) \quad (10)$$

где

$$\delta_{n4} = \frac{\sin^2 \theta_1 - \sin^2 \theta_2}{\sin^2 \theta_3} + \frac{\sin^2 \theta_1}{\sin^2 \theta_3} \cdot \delta_{n2} + \frac{\sin^2(\theta_3 - \theta_2) \cdot \sin^2(\theta_3 + \theta_2)}{\sin^2 \theta_3} \cdot \delta_{n4'} \quad (11)$$

$$q_5(t) = q_3(t) + q_5'(t) = 3\pi\epsilon_0\epsilon R^2 \cdot \sin^2 \theta_3 \cdot (1 + \delta_{n5'}) \cdot E(t) \quad (12)$$

где

$$\delta_{n5} = \frac{\sin^2 \theta_1 - \sin^2 \theta_2}{\sin^2 \theta_3} + \frac{\sin^2 \theta_1}{\sin^2 \theta_3} \cdot \delta_{n3} + \frac{\sin^2(\theta_3 - \theta_2) \cdot \sin^2(\theta_3 + \theta_2)}{\sin^2 \theta_3} \cdot \delta_{n5'} \quad (13)$$

В формулах (11) и (13) погрешности от неоднородности поля δ_{n2} и δ_{n3} определяются выражениями (5) и (6), соответственно. А погрешности $\delta_{n4'}$ и $\delta_{n5'}$ определяются по выражениям

$$\delta_{H4'} = \left[\frac{(1-a^2)}{2a^2 \sin \frac{\theta_3 - \theta_2}{2} \cdot \sin \frac{\theta_3 + \theta_2}{2}} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{1-2\cos\theta_2+a^2}} - \frac{1}{\sqrt{1-2\cos\theta_3+a^2}} \right) - \frac{1}{a} \right] \cdot (-1) \cdot 100; \quad (14)$$

$$\delta_{H5'} = \left[\frac{(1-a^2)}{2a^2 \sin \frac{\theta_3 - \theta_2}{2} \cdot \sin \frac{\theta_3 + \theta_2}{2}} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{1+2\cos\theta_2+a^2}} - \frac{1}{\sqrt{1+2\cos\theta_3+a^2}} \right) + \frac{1}{a} \right] \cdot (-1) \cdot 100. \quad (15)$$

При дифференциальном включении датчиков с чувствительными элементами 2, 3 и 2+4', 3+5' для первого двойного датчика разностный электрический заряд Δq_{23} будет определяться выражением (3), а для второго двойного датчика с составными чувствительными элементами разностный электрический заряд Δq_{45} будет

$$\Delta q_{45}(t) = q_4(t) + q_5(t) = -6\pi\epsilon_0\epsilon R^2 \cdot \sin^2\theta_3 \cdot E(t) \quad (16)$$

где

$$E_2(t) = E(t) \cdot \left(1 + \frac{\delta_{H4'} + \delta_{H5'}}{2} \right) = E(t) \cdot (1 + \delta_{45}) \quad (17)$$

$$\delta_{45} = \frac{\delta_{H4'} + \delta_{H5'}}{2} \quad (18)$$

Анализируя выражения (3), (4) и (16), (17), можно заключить, что двойные датчики при дифференциальном включении позволяют удвоить измерительный сигнал и уменьшить погрешность, вызванную неоднородностью поля, т. к. погрешности δ_{H2} и δ_{H3} , а также погрешности δ_{H4} и δ_{H5} противоположны по знаку.

Однако двойные датчики достигли метрологических пределов по дополнительным погрешностям, нижний предел которых в неоднородных полях составляет не менее $\pm 5\%$. В связи с этим возникла необходимость в новом подходе к процессу измерения напряженности

электрического поля в условиях сильной его неоднородности. И такой подход был реализован в новом методе измерения напряженности ЭП по среднему значению [41, 42]. Для этого понадобились новые типы датчиков - сдвоенные датчики [17-19, 40] (см. рис. 1). Среди сдвоенных датчиков можно выделить датчики с накладными, составными и раздельными чувствительными элементами. Исследование сдвоенных датчиков с накладными чувствительными элементами приведено в работе автора [43]. В данной работе будут исследованы сдвоенные датчики с составными чувствительными элементами.

Сдвоенный датчик с составными чувствительными элементами

Недостатком сдвоенного датчика с накладными чувствительными элементами является трехслойная структура построения датчика с наложением одних чувствительных элементов на другие. Первый слой - проводящее сферическое основание, второй слой - проводящие чувствительные элементы второго сдвоенного датчика и третий слой - проводящие чувствительные элементы первого сдвоенного датчика. Все проводящие элементы датчика изолированы между собой диэлектрической подложкой.

Сдвоенный датчик с составными чувствительными элементами имеет двухслойную структуру. Это достигается отсечением чувствительных элементов 2, 3 от чувствительных элементов 4, 5. Оставшиеся части 4' и 5' от чувствительных элементов 4, 5 в совокупности с чувствительными элементами 2, 3 будут составлять чувствительные элементы 4, 5 второго двойного датчика, входящего в состав сдвоенного датчика с составными чувствительными элементами. Таким образом, во втором слое находятся чувствительные элементы 2, 3 в форме сферических сегментов (см. рис. 2,а) с угловым размером θ_1 первого двойного датчика и составляющие чувствительных элементов 2, 4' и 3, 5', в указанной совокупности образующие в общем случае две полусферы (см. рис. 2, в). Чувствительные элементы 2, 4' и 3, 5' за счет схемотехнических решений объединяются в единые чувствительные элементы. Части чувствительных элементов 4' и 5' выполнены в форме сферических слоев (см. рис. 2,б) с угловыми размерами $\theta_2 \geq \theta_1$ и $\theta_3 \leq 90^\circ$. Датчик с составными чувствительными элементами пред-

ставлен на рис. 1.

Работа датчика с составными чувствительными элементами состоит в формировании выходного электрического заряда сдвоенного датчика как среднего значения из приведенных зарядов $k_2\Delta q_{23}$ (выражение (3)) и $k_4\Delta q_{45}$ (выражение (16))

$$\begin{aligned} q &= \frac{k_2\Delta q_{23}(t) + k_4\Delta q_{45}(t)}{2} = \\ &= -6\pi\epsilon_0\epsilon R^2 \cdot \frac{E_1(t) + E_2(t)}{2} = \\ &= -6\pi\epsilon_0\epsilon R^2 \cdot \left(1 + \frac{\delta_{23} + \delta_{45}}{2}\right) \cdot E(t) \end{aligned} \quad (19)$$

где k_2 и k_4 – коэффициенты, устанавливающиеся при настройке сдвоенного датчика в однородном поле, соответственно равные

$$k_2 = \frac{1}{\sin^2 \theta_1}; \quad (20)$$

$$k_4 = \frac{1}{\sin^2 \theta_3} \quad (21)$$

Учтем, что погрешности δ_{23} (выражение (7)) и δ_{45} (выражение (18)) противоположны по знаку, тогда выражение (19) можно привести к виду

$$\begin{aligned} q &= -6\pi\epsilon_0\epsilon R^2 \cdot \left(1 + \frac{\delta_{23} + \delta_{45}}{2}\right) \cdot E(t) = \\ &= -6\pi\epsilon_0\epsilon R^2 \cdot (1 + \delta) \cdot E(t) \end{aligned} \quad ; \quad (22)$$

где

$$\delta = \frac{\delta_{23} - \delta_{45}}{2} \quad (23)$$

– погрешность от неоднородности поля сдвоенного датчика с составными чувствительными элементами.

Исследования

Исследование погрешностей δ_{23} и δ_{45} от неоднородности поля позволило составить математическую модель для погрешности δ (формула (23)) сдвоенного датчика с составными чувствительными элементами и оптимизировать угловые размеры его чувствительных элементов в пространственном диапазоне измерения $0 \leq a \leq 1$. Несмотря на то, что математическая модель сдвоенного датчика с составными чувствительными элементами напоминает аналогичную модель сдвоенного датчика с накладными чувствительными элементами, она имеет ряд существенных отличий. Так, математиче-

ская модель сдвоенного датчика с накладными чувствительными элементами позволяет проводить оптимизацию размеров его чувствительных элементов только по двум угловым размерам θ_1 и θ_3 . А, математическая модель сдвоенного датчика с составными чувствительными элементами – по трем угловым размерам θ_1 , θ_2 и θ_3 . Это расширяет возможности выявления большего круга оптимизированных угловых размеров составных чувствительных элементов.

По составленной математической модели было проведено математическое моделирование. В результате были:

- получены оптимальные угловые размеры θ_1 , θ_2 и θ_3 составных чувствительных элементов сдвоенного датчика с точки зрения минимума погрешности от неоднородности поля в максимально возможном пространственном диапазоне измерения $0 \leq a \leq 1$;

- установлена взаимосвязь угловых размеров θ_1 , θ_2 и θ_3 составных чувствительных элементов с погрешностью δ сдвоенного датчика от неоднородности поля.

Результаты исследований представлены в виде графиков на рис. 3, а, б.

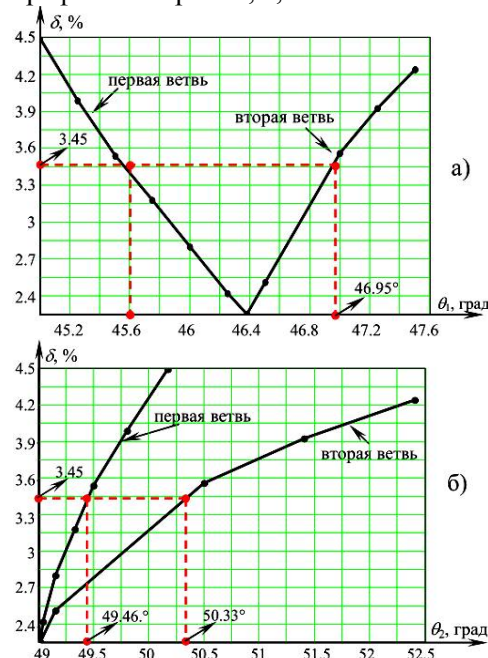


Рис. 3. Графики зависимости угловых размеров чувствительных элементов сдвоенного датчика от погрешности, вызванной неоднородностью поля: а) зависимость $\delta(\theta_1)$; б) зависимость $\delta(\theta_2)$

Графики рис. 3, а, б представляют собой «V-образные кривые», позволяющие по заданной погрешности δ от неоднородности поля

определить угловые размеры составных чувствительных элементов сдвоенного датчика. «V-образные кривые» (рис. 3, а, б) для одной заданной погрешности δ дают два возможных угловых размера чувствительных элементов θ_1 и θ_2 при $\theta_3 = \text{const}$.

Так, например, для погрешности от неоднородности ЭП $\delta = \pm 3,45\%$ по графикам рис. 3, а находим два значения θ_1 , соответственно равные $\theta_1 = 45,6^\circ$ и $\theta_1' = 46,95^\circ$ при $\theta_3 = 90^\circ$, а по графикам рис. 3, б два значения θ_2 , соответственно равные $\theta_2 = 49,46^\circ$ и $\theta_2' = 50,33^\circ$ при $\theta_3 = 90^\circ$. Тогда погрешности $\delta = \pm 3,45\%$ будут соответствовать двум техническим решениям построения сдвоенных датчиков. Первое – с угловыми размерами чувствительных элементов, равными $\theta_1 = 45,6^\circ$, $\theta_2 = 49,46^\circ$, а второе – с угловыми размерами чувствительных элементов, равными $\theta_1' = 46,95^\circ$, $\theta_2' = 50,33^\circ$ при $\theta_3 = 90^\circ$.

Таким образом, для сдвоенных датчиков с составными чувствительными элементами возникает три возможных технических решения построения сдвоенного датчика с различными оптимальными угловыми размерами составных чувствительных элементов. Первому техническому решению соответствует конструктивное исполнение сдвоенного датчика с накладными чувствительными элементами, для случая выполнения угловых размеров составных чувствительных элементов датчика соответственно равны θ_1 , $\theta_2 = \theta_1$ и θ_3 [43]. Второму техническому решению соответствует конструктивное исполнение датчика, определяемое по заданной погрешности из первых ветвей «V-образных» кривых, представленных на рис. 3, а, б. И, наконец, третьему техническому решению соответствует конструктивное исполнение датчика, определяемое по заданной погрешности из вторых ветвей «V-образных» кривых, представленных на рис. 3, а, б.

Однако из рис. 3 следует, что минимально возможная погрешность $\delta = \pm 2,25\%$ сдвоенного датчика соответствует угловым размерам его составных чувствительных элементов, соответственно равным $\theta_1 = 46,38^\circ$, $\theta_2 = 49,02^\circ$ и $\theta_3 = 90^\circ$. Это наиболее оптимальное техническое решение для сдвоенного датчика с составными чувствительными элементами. Данное техническое решение приведено в работе [43].

Для снятия сигналов со сдвоенного датчика с составными чувствительными элементами необходимо использовать измерительные цепи, рассмотренные в работе [44]. Одна из возможных вариантов измерительных цепей сдвоенных

датчиков составными чувствительными элементами представлена на рис. 4.

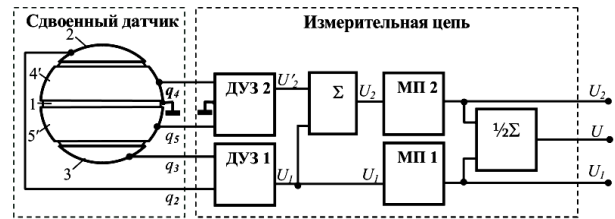


Рис. 4. Измерительная цепь сдвоенного датчика с составными чувствительными элементами

Измерительная цепь (рис. 4) содержит сдвоенный датчик, два дифференциальных усилителя заряда ДУЗ 1 и ДУЗ 2, двухвходовый сумматор Σ , два масштабных преобразователя МП 1 и МП 2 и полусумматор $\frac{1}{2}\Sigma$. Дифференциальные усилители заряда преобразуют разностные заряды $(q_2 - q_3)$ и $(q_4 - q_5)$ в напряжения U_1 и U_2' соответственно. Двухвходовый сумматор Σ объединяет сигналы с элементов 2+4' и 3+5', соответственно, и формирует полный дифференциальный сигнал с составных чувствительных элементов 4, 5. Поскольку чувствительности двойных датчиков 2, 3 и 4, 5 не равны, то с помощью масштабных преобразователей МП 1 и МП 2 в однородном поле добиваются равенства напряжений $U_1 = U_2$, а следовательно, и равенства чувствительностей по каждому двойному датчику. При этом масштабные преобразователи отвечают: МП 1 за коэффициент k_2 выражения (20), а МП 2 – за коэффициент k_4 выражения (21). Полусумматор $\frac{1}{2}\Sigma$ отвечает за формирование выходного сигнала U сдвоенного датчика как среднее значение из сигналов U_1 и U_2 двух одинарных датчиков, согласно выражению (19).

Результаты исследований

Исследованные в данной работе сдвоенные датчики с составными чувствительными элементами позволили выявить оптимальные угловые размеры составных чувствительных элементов, выполненных в форме сферических сегментов и слоёв. Полученные результаты могут быть использованы при создании серии сдвоенных датчиков, имеющих разные погрешности от неоднородности поля и пространственный диапазон измерения. В результате исследований были установлены три возможных варианта построения сдвоенных датчиков с составными чувствительными элементами. В первом варианте сдво-

енного датчика с составными чувствительными элементами угловые размеры чувствительных элементов соответствуют угловым размерам сдвоенного датчика с накладными чувствительными элементами, для случая их выполнения соответственно равны θ_1 , $\theta_2=\theta_1$ и θ_3 . Во втором варианте конструктивного исполнения сдвоенный датчик может иметь погрешности в указанных пределах $2,25\% < \delta < 4,49\%$. Для этого угловые размеры его чувствительных элементов должны быть выбраны из диапазона угловых значений $45^\circ \leq \theta_1 \leq 46,38^\circ$, $49,02^\circ \leq \theta_2 \leq 50,17^\circ$ для $\theta_3=90^\circ$. При этом меньшей погрешности соответствуют угловые размеры $\theta_1=46,38^\circ$ и $\theta_2=49,02^\circ$ а большей – $\theta_1=45^\circ$ и $\theta_2=50,17^\circ$ в полном пространственном диапазоне измерения $0 \leq a \leq 1$. В третьем варианте конструктивного исполнения сдвоенный датчик может иметь погрешность в указанных пределах $2,25\% < \delta < 4,24\%$. Для этого угловые размеры его чувствительных элементов должны быть выбраны из диапазона угловых значений $46,38^\circ \leq \theta_1 \leq 47,5^\circ$ и $49,02^\circ \leq \theta_2 \leq 52,4^\circ$ для $\theta_3=90^\circ$. При этом меньшей погрешности соответствуют угловые размеры $\theta_1=46,38^\circ$ и $\theta_2=49,02^\circ$, а большей – $\theta_1=47,5^\circ$ и $\theta_2=52,4^\circ$ в полном пространственном диапазоне измерения $0 \leq a \leq 1$.

Однако из табл. 1 и рис. 3, а, б следует, что минимально возможная погрешность $\delta = \pm 2,25\%$ соответствует угловым размерам чувствительных элементов сдвоенного датчика с составными чувствительными элементами, соответственно равными $\theta_1=46,38^\circ$, $\theta_2=49,02^\circ$ и $\theta_3=90^\circ$. Это наиболее оптимальное техническое решение.

Следует отметить, что в любом варианте конструктивного исполнения сдвоенных датчиков его погрешность значительно меньше погрешности двойного датчика с оптимальными размерами чувствительных элементов.

Выводы и заключения

Результаты проведенных исследований показывают перспективность использования сдвоенных датчиков с составными чувствительными элементами. Использование датчиков сдвоенного типа позволяет значительно снизить погрешность от неоднородности ЭП в широком пространственном диапазоне измерения.

Здесь и ранее были исследованы сдвоенные датчики с накладными и составными чув-

ствительными элементами. Поэтому в заключение отметим целесообразность проведения исследований сдвоенных датчиков с отдельными чувствительными элементами.

Литература

1. Бирюков С.В. Измерение напряженности электрических полей в диэлектрических средах электроиндукционными датчиками. Методы и средства измерений: монография. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. 196 с.
2. ГОСТ Р 51070-97. Государственный стандарт Российской Федерации. Измерители напряженности электрического и магнитного полей. Общие технические требования и методы испытаний. М.: Издательство стандартов, 1997. 16 с.
3. Biryukov S.V., Korolyova M.A. Electroinduction disk sensor of electric field strength // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 2017. №944. P. 012017-1- P. 012017-8.
4. Бирюков С.В., Королёва М.А. Электроиндукционный дисковый датчик напряженности электрического поля // Омский научный вестник. 2017. Т. 5. № 4. С. 177-182.
5. Бирюков С.В., Щапова Л.В. Датчик напряженности электрического поля в виде плоской проводящей пластины в форме квадрата // Динамика систем механизмов и машин. 2017. № 5(155). С. 126-130
6. Пат. 177779. Российская Федерация. МПК G 01 R 29/12. Датчик напряженности электрического поля / С.В. Бирюков, В.В. Даньшина, Н.Г. Эйсмонт; № 2017131988; заявл. 12.09.2017; опубл. 12.03.2018, бюл. № 8.
7. Пат. 175646. Российская Федерация. МПК G 01 R 29/12. Датчик напряженности электрического поля / С.В. Бирюков, А.И. Блесман, С.С. Колмогорова; № 2017131994; заявл. 12.09.2017; опубл. 13.12.2017, бюл. № 35.
8. Берент Г.Н., Плейс И.Р. Датчик электрического поля // Приборы для научных исследований. 1971. № 6. С. 141–142.
9. Гатман С. Двойной измеритель электрического поля с защитой // Приборы для научных исследований. 1968. №1. С. 45-49.
10. Research on the Three-Dimensional Power Frequency Electric Field Measurement System / Suo Chunguang, Wei Ran, Zhang Wenbin, Li Yincheng // Journal of Sensor. 2021. Article ID 8859022. 15 p.
11. Design of high voltage electric field measurement based on parallel plate sensor / R. Qin, Z. Yang, L. An, J. Lei, Y. Yang // Electrical Application. 2016. Vol. 19. P. 72-78.
12. Датчик напряженности электрического поля цилиндрической формы / С.В. Бирюков, Д.С. Баранов, С.С. Колмогорова, А.В. Тюкин // Динамика систем механизмов и машин. 2018. Т. 6. № 4. С. 17-25.
13. Пат. 181781. Российская Федерация. МПК G 01 R 29/12. Датчик напряженности электрического поля / С.В. Бирюков, А.С. Колмогоров, С.С. Колмогорова; № 2018115125; заявл. 23.04.2018; опубл. 26.07.2018, бюл. № 21.
14. Бирюков С.В., Тюкин А.В. Устройство выявления зон уверенного приема служебных радиостанций вблизи высоковольтных линий электропередач // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16. №1. С. 108-116.

15. Misakian M., Kotter F.R., Kahler R.L. Miniature ELF Electric Field Probe // Instruments for scientific research. 1978. Vol. 7. P. 933-935.
16. Application of spherical electric field measurement system in the field of high voltage measurement / T. Zhang, Z. Fang, T. Chen and L. Zhao // Electrical Measurement and Instrumentation. 2007. Vol. 44. № 11. P. 11-16.
17. Пат. 207464. Российская Федерация. МПК G 01 R 29/12. Устройство для измерения напряженности электрического поля со сдвоенным датчиком / С.В. Бирюков, Л.В. Тюкина, Н.Г. Эйсмонт; № 2021111582; заявл. 23.04.2021; опубл. 28.10.2021, бюл. № 31.
18. Пат. № 207465. Российская Федерация. МПК G 01 R 29/12. Устройство для измерения напряженности электрического поля со сдвоенным датчиком / С.В. Бирюков, Л.В. Тюкина, В.В. Даньшина; № 202111599; заявл. 23.04.2021; опубл. 28.10.2021, бюл. № 31.
19. Пат. 211166 U1 Российская Федерация, МПК G01R 29/12. Сдвоенный датчик для измерения напряженности электрического поля / С.В. Бирюков, Л.В. Тюкина; № 2022101440; заявл. 24.01.2022, опубл. 24.05.2022; бюл. № 15; заявитель Ом. гос. техн. ун-т.
20. Пат. 188242. Российская Федерация. МПК G 01 R 29/12. Датчик напряженности электрического поля / С.В. Бирюков, А.И. Блесман; № 2018144845; заявл. 18.12.2018; опубл. 04.04.2019, бюл. № 10.
21. Пат. 183095. Российская Федерация. МПК G 01 R 29/12. Датчик напряженности электрического поля / С.В. Бирюков, А.И. Блесман. № 2018120984; заявл. 06.06.2018; опубл. 11.09.2018, бюл. № 26.
22. Feser K.A., Pfaff W. Potential free spherical sensor for the measurement of transient electric fields // IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems. 1984. Vol. Pas-103. №10. P. 2904–2911.
23. Gockenbach E. A new measuring device for transient over voltages // CIGRE Symposium New and Improved Materials for Electrotechnology. 1987. P.1010-1015.
24. Ramirez J. A device for the X-Y measurement of electric fields // Measurement Science Technique. 1994. Vol. 5. № 5. P. 1436-1442.
25. Газоразрядный измеритель электрического поля / Д.Е. Фридман, Ф.Л. Курзон, М. Фили, Янг, Ошинлек // Приборы для научных исследований. 1982. № 8. С. 167-172.
26. A Power-Frequency Electric Field Sensor for Portable Measurement / Dongping Xia, Qichao Ma, Yutong Xie, Qi Zheng, Zhanlong Zhang // Sensor (Basel). 2018. № 18(4). P. 1053.
27. Тюкин А.В., Бирюков С.В., Тюкин В.А. Теоретические исследования многоэлектродного датчика составляющих вектора напряженности электрического поля в форме квадратной пластины из проводящего материала // Омский научный вестник. 2019. № 3 (165). С. 46-53.
28. Пат. 174615. Российская Федерация. МПК G 01 R 29/12. Датчик напряженности электрического поля / С.В. Бирюков; № 2017118612; заявл. 29.05.2017; опубл. 16.11.2017, бюл. № 32.
29. Пат. 175038. Российская Федерация. МПК G 01 R 29/12. Датчик напряженности электрического поля / С.В. Бирюков; № 2017118612; заявл. 29.05.2017; опубл. 16.11.2017, бюл. № 32.
30. Пат. 190509. Российская Федерация. МПК G 01 R 29/12. Датчик напряженности электрического поля / С.В. Бирюков, А.И. Блесман; № 2019112607; заявл. 25.04.2019; опубл. 03.07.2019, бюл. № 19.
31. Пат. 190511. Российская Федерация. МПК G 01 R 29/12. Датчик напряженности электрического поля / С.В. Бирюков, А.И. Блесман. № 2019112747; заявл. 25.04.2019; опубл. 03.07.2019, бюл. № 19.
32. Многоэлектродный датчик составляющих напряженности электрического поля в форме диска из проводящего материала / С.В. Бирюков, С.С. Колмогорова, А.С. Колмогоров, Д.С. Баранов // Динамика систем механизмов и машин. 2019. Т. 7. № 2. С. 180-190.
33. Пат. 190511. Российская Федерация. МПК G 01 R 29/12. Датчик напряженности электрического поля / С.В. Бирюков, А.И. Блесман. № 2019112747; заявл. 25.04.2019; опубл. 03.07.2019, бюл. № 19.
34. Бирюков С.В., Глуховеря Е.Г., Тюкин А.В. Сравнительный анализ плоских многоэлементных датчиков напряженности электрического поля с круглым основанием и различными конструктивными особенностями // Омский научный вестник. 2020. № 3(171). С. 57–64.
35. Бирюков С.В. Трехкоординатный электроиндукционный датчик напряженности электрического поля в виде трех взаимно перпендикулярных дисков // Омский научный вестник. 2020. № 5 (173). С. 67-73.
36. Бирюков С.В., Колмогорова С.С., Колмогоров А.С. Датчик составляющих вектора напряженности электрического поля в виде трех взаимно перпендикулярных квадратных пластин // Динамика систем механизмов и машин. 2020. Т. 8. № 4. С. 83-92.
37. Пат. 175577. Российская Федерация. МПК G 01 R 29/12. Датчик напряженности электрического поля / А.А. Кузнецов, А.Ю. Кузменко, С.В. Бирюков, А.И. Блесман; № 2017125826; заявл. 17.07.2017; опубл. 11.12.2017, бюл. № 35.
38. Praft W.R. Accuracy of spherical sensor for the measurement of three-dimensional electric fields // Fifth International Symposium on High Voltage Engineering. 1987. Vol. 32. № 5. P. 83-92.
39. Пат. 2768200. Российская Федерация. МПК G 01 R 29/12. Сдвоенный датчик составляющих вектора напряженности электрического поля / С.В. Бирюков, Л.В. Тюкина, Н.Г. Эйсмонт; № 2021111582; заявл. 23.04.2021; опубл. 28.10.2021, бюл. № 31.
40. Бирюков С.В., Тюкина Л.В., Тюкин А.В. Сдвоенные сферические датчики напряженности низкочастотных электрических полей нового поколения // Омский научный вестник. 2021. № 5(179). С. 62–67.
41. Пат. 2773868. Российская Федерация. МПК G 01 R 29/12. Способ измерения напряженности электрического поля сдвоенным датчиком / С.В. Бирюков, Л.В. Тюкина, А.В. Тюкин; № 2021120230; заявл. 09.07.2021; опубл. 16.06.2022, бюл. № 17.
42. Бирюков С.В., Тюкина Л.В. Модернизированный метод измерения напряженности электрического поля по среднему значению сдвоенными датчиками и устройства его реализации // Динамика систем, механизмов и машин. 2021. Т. 9. № 3. С. 64–72.
43. Пат. 210806. Российская Федерация. МПК G 01 R 29/12. Сдвоенный датчик для измерения напряженности электрического поля с составными чувствительными элементами / С.В. Бирюков, Л.В. Тюкина; № 202210437; заявл. 24.01.2022; опубл. 05.05.2022, бюл. № 13.
44. Бирюков С.В., Тюкина Л.В., Тюкин А.В. Измерительные цепи сдвоенных электроиндукционных сферических датчиков напряженности электрического поля замкнутой конфигурации // Омский научный вестник. 2022. №2(182). С. 102–109.

Поступила 28.07.2022; принята к публикации 17.10.2022

Информация об авторах

Бирюков Сергей Владимирович - д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Физика», Омский государственный технический университет (644050, Россия, г. Омск, проспект Мира, д. 11), профессор кафедры «Физика и математика», Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (644080, Россия, г. Омск, проспект Мира, 5), тел.: +7(3812) 65-02-18, +7(908)1066078, e-mail: sbiryukov154@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1362-9911>

Тюкин Александр Владимирович - канд. техн. наук, доцент кафедры «Физика и математика», Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (644080, Россия, г. Омск, проспект Мира, 5), тел.: +7(983)1101529, +7(3812) 65-02-18, e-mail: tyukin_av@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7316-3797>

Тюкина Людмила Владимировна - преподаватель, Омский промышленно-экономический колледж (644029, Россия, г. Омск, ул. Нефтезаводская, 6), тел. +7(3812) 67-04-92, +7(909)5361782, e-mail: lyudmila.omsk@mail.ru

INVESTIGATION OF A DUAL SPHERICAL ELECTRIC FIELD STRENGTH SENSOR WITH COMPOSITE SENSITIVE ELEMENTS

S.V. Biryukov^{1,2}, A.V. Tyukin², L. V. Tyukina³

¹ Omsk State Technical University, Omsk, Russia

² Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia

³ Omsk Industrial and Economic College, Omsk, Russia

Abstract: the paper investigates a new type of electroinduction spherical electric field strength sensors, related to dual sensors. Sensors dual in design are divided into three groups. These include sensors with overhead, composite and separate sensitive elements. Previously, the author studied sensors with attached sensitive elements. This work is devoted to the study of dual sensors with composite sensitive elements. The study was carried out in order to improve the metrological characteristics of known electroinduction spherical sensors, when used in highly inhomogeneous electric fields. The results of the study showed that dual sensors have better metrological characteristics than the known ones. When conducting research, the relationship between the error of a dual sensor from the inhomogeneity of the field and its angular dimensions of the sensitive elements was established. Taking into account this relationship, a mathematical model was compiled, using which the angular dimensions of the sensor's sensitive elements were optimized from the point of view of the minimum error and the maximum spatial measurement range. As a result of modeling, the optimal angular dimensions of the sensing elements of a dual sensor with composite sensing elements were established equal to $\theta_1=46,38^\circ$, $\theta_2=49,02^\circ$ and $\theta_3=90^\circ$. These angular dimensions of composite sensitive elements correspond to the minimum possible error $\delta=\pm 2,25\%$

Key words: electric field strength, measurement, double sensors, double sensors, composite sensing elements, error due to field inhomogeneity

References

1. Biryukov S.V. "Measuring the intensity of electric fields in dielectric media by electroinduction sensors. Methods and means of measurements" ("Измерение напряженности электрических полей в диэлектрических средах электроиндукционными датчиками. Методы и средства измерений"), monograf, Omsk: OmGTU, 2011, 196 p.
2. GOST R 51070-97 "Electric and magnetic field strength meters. General technical requirements and test methods", Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1997, 16 p.
3. Korolyeva M.A., Biryukov S.V. "Electroinduction disk sensor of electric field strength", *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series.*, 2017, no. 944, pp. 012017-1-012017-8.
4. Korolyeva M.A., Biryukov S.V. "Electric induction disk sensor of electric field strength", *Omsk Scientific Bulletin (Omskiy nauchnyy vestnik)*, 2017, vol. 5, no. 4, pp. 177-182.
5. Shchapova L.V., Biryukov S.V. "An electric field intensity sensor in the form of a flat conducting plate in the form of a square", *Dynamics of Systems of Mechanisms and Machines (Dinamika sistem mekhanizmov i mashin)*, 2017, no. 5(155), pp. 126-130.
6. Biryukov S.V., Dan'shina V.V., Eysmont N.G. "Electric field intensity sensor" ("Datchik napryazhennosti elektricheskogo polya"), patent 177779 Of Russia, MPK G 01 R 29/12, no. 2017131988, 12.09.2017; publ. 12.03.2018, bull 8.
7. Biryukov S.V., Blesman A.I., Kolmogorova S.S. "Electric field intensity sensor" ("Datchik napryazhennosti elektricheskogo polya"), patent 175646 of Russia, MPK G 01 R 29/12, no. 2017131994, 12.09.2017, publ. 13.12.2017, bull 35.
8. Berent G.N., Pleys I.R. "Electric field sensor", *Instruments for Scientific Research (Pribory dlya nauchnykh issledovaniy)*, 1971, no. 6 pp. 141-142.
9. Gatman S. "Double electric field meter with protection", *Instruments for Scientific Research (Pribory dlya nauchnykh issledovaniy)*, 1968, no. 1, pp. 45-49.
10. Chunguang Suo, Wei Ran, Zhang Wenbin, Li Yincheng "Research on the three-dimensional power frequency electric field measurement system", *Journal of Sensor*, vol. 2021, article ID 8859022, 15 pp.
11. Qin R., Yang Z., An L., Lei J., Yang Y. "Design of high voltage electric field measurement based on parallel plate sensor", *Electrical Application*, 2016, vol. 19, pp. 72-78.

12. Biryukov S.V., Baranov D.S., Tyukin A.V., Kolmogorova S.S. "Cylindrical electric field intensity sensor", *Dynamics of Systems of Mechanisms and Machines (Dinamika sistem mekhanizmov i mashin)*, 2018, vol. 6, no. 4, pp. 17-25.
13. Biryukov S.V., Kolmogorov A.S., Kolmogorova S.S. "Electric field intensity sensor" ("Datchik napryazhennosti elektricheskogo polya"), patent 181781 of Russia, MPK G 01 R 29/12, no. 2018115125, 23.04.2018, publ. 26.07.2018, bull. 21.
14. Tyukin A.V., Biryukov S.V. "Device for detecting zones of reliable reception of service radio stations near high-voltage power lines", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2020, vol. 16, no. 1, pp. 108-116.
15. Misakian M., Kotter F.R., Kahler R.L. "Miniature ELF electric field probe", *Instruments for Scientific Research*, 1978, vol. 7, pp. 933-935.
16. Zhang T., Fang Z., Chen T., Zhao L. "Application of spherical electric field measurement system in the field of high voltage measurement", *Electrical Measurement and Instrumentation*, 2007, vol. 44, no. 11, pp. 11-16.
17. Biryukov S.V., Tyukina L.V., Eysmont N.G. "Device for measuring the strength of the electric field with a dual sensor" ("Ustroystvo dlya izmereniya napryazhennosti elektricheskogo polya so sdvoennym datchikom"), patent 207464 of Russia, MPK G 01 R 29/12, no. 2021111582, 23.04.2021, publ. 28.10.2021, bull. 31.
18. Biryukov S.V., Tyukina L.V., Dan'shina V.V. "Device for measuring the electric field strength with a dual sensor" ("Ustroystvo dlya izmereniya napryazhennosti elektricheskogo polya so sdvoennym datchikom"), patent 207465 of Russia, MPK G 01 R 29/12, no. 2021111599, 23.04.2021, publ. 28.10.2021, bull. 31.
19. Biryukov S.V., Tyukina L.V. "Dual sensor for measuring the electric field strength" ("Sdvoenniy datchik dlya izmereniya napryazhennosti elektricheskogo polya"), patent 211166 U1 of Russia, MPK G01R 29/12, no. 2022101440, 24.01.2022, publ. 24.05.2022, bull. 15.
20. Biryukov S.V., Blesman A.I. "Electric field intensity sensor" ("Datchik napryazhennosti elektricheskogo polya"), patent 188242 of Russia, MPK G 01 R 29/12, no. 2018144845, 18.12.2018, publ. 04.04.2019, bull. 10.
21. Biryukov S.V., Blesman A.I. "Electric field intensity sensor" ("Datchik napryazhennosti elektricheskogo polya"), patent 183095 of Russia, MPK G 01 R 29/12, no. 2018120984, 06.06.2018, publ. 11.09.2018, bull. 26.
22. Feser K., Pfaff W. "A potential free spherical sensor for the measurement of transient electric fields", *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, 1984, vol. 103, no. 10, pp. 2904-2911.
23. Gockenbach E. "A new measuring device for transient over voltages", *CIGRE Symposium New and Improved Materials for Electrotechnology*, 1987, pp. 1010-1015.
24. Ramirez J. "A device for the X-Y measurement of electric fields", *Measurement Science Technique*, 1994, vol. 5, no. 5, pp. 1436-1442.
25. Fridman D.E., Kurzon F.L., Fili M., Ang Y. "Gas-discharge electric field meter", *Instruments for Scientific Research (Pribory dlya nauchnykh issledovaniy)*, 1982, no. 8, pp. 167-172.
26. Dongping Xia, Qichao Ma, Yutong Xie, Qi Zheng, Zhanlong Zhang "A power-frequency electric field sensor for portable measurement", *Sensor (Basel)*, 2018, no. 18(4), pp. 1053.
27. Tyukin A.V., Biryukov S.V. "Theoretical studies of a multi-electrode sensor of the components of the electric field strength vector in the form of a square plate of conductive material", *Omsk Scientific Bulletin (Omskij nauchnyy vestnik)*, 2019, no. 3 (165), pp. 46-53.
28. Biryukov S.V. "Electric field intensity sensor" ("Datchik napryazhennosti elektricheskogo polya"), patent 174615 of Russia, MPK G 01 R 29/12, no. 2017118612, 29.05.2017, publ. 16.11.2017, bull. 32.
29. Biryukov S.V. "Electric field intensity sensor" ("Datchik napryazhennosti elektricheskogo polya"), patent 175038 of Russia, MPK G 01 R 29/12, no. 2017118612, 29.05.2017, publ. 16.11.2017, bull. 32.
30. Biryukov S.V., Blesman A.I. "Electric field intensity sensor" ("Datchik napryazhennosti elektricheskogo polya"), patent 190509 of Russia, MPK G 01 R 29/12, no. 2019112607, 25.04.2019, publ. 03.07.2019, bull. 19.
31. Biryukov S.V., Blesman A.I. "Electric field intensity sensor" ("Datchik napryazhennosti elektricheskogo polya"), patent 190511 of Russia, MPK G 01 R 29/12, no. 2019112747, 25.04.2019, publ. 03.07.2019, bull. 19.
32. Kolmogorova S.S., Biryukov S.V., Kolmogorov A.S., Baranov D.S. "Multi-electrode sensor of the components of the electric field in the form of a disk of conductive material", *Dynamics of Systems of Mechanisms and Machines (Dinamika sistem mekhanizmov i mashin)*, 2019, vol. 7, no. 2, pp. 180-190.
33. Biryukov S.V., Blesman A.I. "Electric field intensity sensor" ("Datchik napryazhennosti elektricheskogo polya"), patent 190511 of Russia, MPK G 01 R 29/12, no. 2019112747, 25.04.2019 publ. 03.07.2019, bull. 19.
34. Biryukov S.V., Gluhovera E.G., Tyukin A.V. "Comparative analysis of flat multi-element electric field strength sensors with a round base and various design features", *Omsk Scientific Bulletin (Omskij nauchnyy vestnik)*, 2020, no. 3(171), pp. 57-64.
35. Biryukov S.V. "Three-coordinate electric induction sensor of electric field strength in the form of three mutually perpendicular disks", *Omsk Scientific Bulletin (Omskij nauchnyy vestnik)*, 2020, no. 5 (173), pp. 67-73.
36. Kolmogorova S.S., Biryukov S.V., Kolmogorov A.S. "The sensor of the components of the electric field strength vector in the form of three mutually perpendicular square plates", *Dynamics of Systems of Mechanisms and Machines (Dinamika sistem mekhanizmov i mashin)*, 2020, vol. 8, no. 4, pp. 83-92.
37. Kuznetsov A.A., Kuz'menko A.Yu., Biryukov S.V., Blesman A.I. "Electric field strength sensor" ("Datchik napryazhennosti elektricheskogo polya"), patent 175577 of Russia, MPK G 01 R 29/12, no. 2017125826, 17.07.2017, publ. 11.12.2017, bull. 35.
38. Praft W.R. "Accuracy of spherical sensor for the measurement of three-dimensional electric fields", *Fifth International Symposium on High Voltage Engenering*, 1987, vol. 32, no. 5, pp. 83-92.
39. Biryukov S.V., Tyukina L.V., Eysmont N.G. "Dual sensor of the components of the electric field strength vector" ("Sdvoenniy datchik sostavlyayushchih vektora napryazhennosti elektricheskogo polya"), patent 2768200 of Russia, MPK G 01 R 29/12, no. 2021111582, 23.04.2021, publ. 28.10.2021, bull. 31.
40. Biryukov S.V., Tyukina L.V., Tyukin A.V. "Dual spherical intensity sensors for low-frequency electric fields of a new generation", *Omsk Scientific Bulletin (Omskij nauchnyy vestnik)*, 2021, no. 5(179), pp. 62-67.
41. Biryukov S.V., Tyukina L.V., Tyukin A.V. "A method for measuring the electric field strength with a dual sensor"

(“Sposob izmereniya napryazhennosti elektricheskogo polya sdvoennym datchikom”), patent 2773868 of Russia, MPK G 01 R 29/12, no. 2021120230, 09.07.202, publ. 16.06.2022, bull. 17.

42. Tyukina L.V., Biryukov S.V. “A modernized method for measuring the electric field strength by the average value with dual sensors and devices for its implementation”, *Dynamics of Systems of Mechanisms and Machines (Dinamika sistem mekhanizmov i mashin)*, 2021, vol. 9, no. 3, pp. 64–72.

43. Biryukov S.V., Tyukina L.V. “” (“Sdvoennyy datchik dlya izmereniya napryazhennosti elektricheskogo polya s sostavny-mi chuvstvitel'nyimi elementami”), patent 210806 of Russia, MPK G 01 R 29/12, no. 202210437, 24.01.2022, publ. 05.05.2022, bull. 13.

44. Biryukov S.V., Tyukina L.V., Tyukin A.V. “Measuring circuits of dual electroinduction spherical sensors of the electric field strength of a closed configuration”, *Omsk Scientific Bulletin (Omskij nauchnyj vestnik)*, 2022, no. 2(182), pp. 102–109.

Submitted 28.07.2022; revised 17.10.2022

Information about the authors

Sergey V. Biryukov, Dr. Sci. (Technical), Professor, Omsk State Technical University (11 Prospect Mira, Omsk 644050, Russia); Professor, Siberian State Automobile and Highway University (5 Prospect Mira, Omsk 644080, Russia), tel.: +7(3812)65-02-18, +79081066078, e-mail: sbiryukov154@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1362-9911>

Aleksandr V. Tyukin, Cand. Sci. (Technical), Associate Professor, Siberian Automobile and Highway University (5 Prospect Mira, Omsk 644080, Russia), tel.: +79831101529, +7(3812) 65-02-18, e-mail: tyukin_av@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7316-3797>

Lyudmila V. Tyukina, Assistant Professor, Omsk Industrial and Economic College (6 Neftezhavodskaya str., Omsk 644029, Russia), tel.: +7(3812) 67-04-92, +79095361782, e-mail: lyudmila.omsk@mail.ru

МЕТОДИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КАНАЛОВ ПОЕЗДНОЙ РАДИОСВЯЗИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

М.В. Хорошайлова, А.В. Турецкий, Р.Н. Хорошайлов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматриваются принципы передачи данных по каналу радиосвязи с целью обеспечения информационной безопасности, а также предотвращения потери информации при передаче по радиоканалу. Способ передачи данных включает этапы, на которых сервер станции получает информацию, компилирует данные управления и отправляет первое беспроводное сообщение на наземную систему приема информации, затем система наземного радиовещания получает первое беспроводное сообщение, отправленное станционным сервером данных, и перекодирует это сообщение во второе сообщение, затем наземная система вещания для обеспечения безопасности отправляет второе беспроводное сообщение в систему связи для обеспечения безопасного радиоканала в одностороннем режиме вещания. Проведенные эксперименты показывают, что при любом размере пакета в стандартной цифровой системе радиосвязи при увеличении нагрузки на систему время прохождения пакетов увеличивается. С помощью эксперимента было доказано, что система удовлетворяет требования ко времени прохождения пакетов со скоростью передачи до 1,4 Кбит/с. В ходе эксперимента были рассмотрены вопросы связи между радиоблочным центром и коммутационным центром TETRA, соединения радиоблочного центра с системами электрической централизации, модернизации бортового оборудования локомотива и проверки алгоритмов работы стационарного оборудования. Установлено, что эксплуатационные характеристики цифровой системы радиосвязи TETRA приводят к регулярным отказам системы SIRDP-E (система интервального регулирования движения поездов на основе радиоканала)

Ключевые слова: пакеты передачи данных, информационная безопасность, пропускная способность, цифровой канал связи

Введение

Внедрение системы комплексной диагностики и удаленного мониторинга инфраструктуры, систем железнодорожной автоматики и телемеханики на микропроцессорной элементной базе с расширенным функционалом, модульных цифровых систем радиосвязи стандарта GSM-R, DMR, проведение мероприятий по повышению энергоэффективности, оптимизации технологических стандартов и т. д. являются основной стратегией холдинга РЖД на период до 2030 года.

Использование микропроцессорной элементной базы с расширенным функционалом в системе железнодорожной автоматики и телемеханики дает возможность хакерам использовать кибератаки на технологический процесс транспортировки. В связи с этим необходимо обеспечить передачу данных по радиоканалу на высоком уровне безопасности этих систем.

Логистическая информация о расписании движения и местонахождении поездов представляет ценную коммерческую ценность. Основой обеспечения безопасности движения поездов являются системы железнодорожной автоматики и телемеханики (RATs).

В радиосистемах управления поездами, особенно на высокоскоростных железных дорогах (ВСМ), используются современные технологии беспроводной связи, вычислительные и сенсорные возможности для удовлетворения растущих требований к железнодорожному транспорту с точки зрения большей надежности, большей пропускной способности и низкого риска для безопасности передачи данных. Системы объединяют киберсети (например, беспроводная связь между поездами, компьютерная блокировка) с физическими элементами (например, движение в пространстве и взаимодействие в реальном времени с физической средой, включая позиционирование поезда и определение скорости), таким образом формируя киберфизические системы (CPS) [1]. Беспроводные соединения занимают центральное место в разработке передовых CPS, в которых каналы связи должны отвечать строгим требованиям по пропускной

способности, задержке, дальности действия и обеспечивать высокий уровень надежности [2].

Цели обеспечения информационной безопасности для системы управления движения поездов и группы угроз информационной безопасности показаны на

рис. 1. В современной системе РАТ для обеспечения безопасности движения поездов необходимо передавать важную информацию по нескольким независимым каналам.

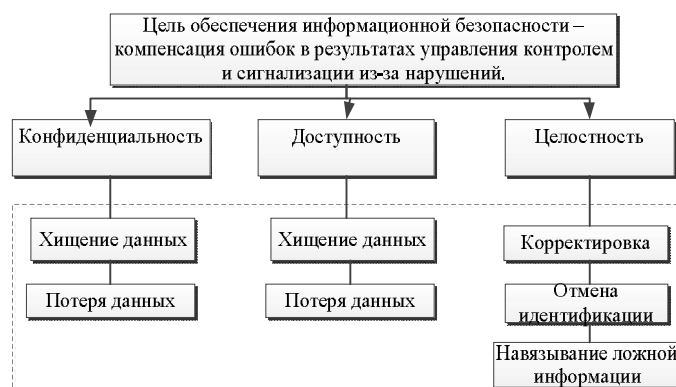


Рис. 1. Угрозы информационной безопасности

Передаваемая информация должна быть надежно защищена как от помех, так и от различных воздействий, которые способны её удалить или изменить.

На безопасную передачу данных в информационно-телекоммуникационных системах влияют внешние и внутренние угрозы, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Виды угроз информационной безопасности

Внешние угрозы							Внутренняя угроза			
Естественные		Искусственные								
		Преднамеренные					Непреднамеренные			
Авария	Электромагнитное излучение	Предполагаемые помехи	Вирусы и встроенные дефекты	Программно-аппаратные средства			Потеря или утрата	Непреднамеренное действие	Операционная ошибка	Нарушение доступа
				Несанкционированный доступ	Прослушивание	Потеря данных				
		Разрушение	Повреждение	Обнаружение	Утечка данных	Нарушение доступа				
		Потеря информации и нарушение устойчивости функционирования транспортной системы								

Анализируя информационную безопасность и помехоустойчивость технологических радиоканалов железнодорожного транспорта, учитываются три основных типа предполагаемых угроз, которые могут привести к нарушению устойчивой работы между железнодорожной станцией и локомотивом: несанкционированный доступ, прослушивание информации и ее потеря.

Система ERTMS/ETCS (ERTMS – Европейская Система управления железнодорожным движением, ETCS – Европейская система управления поездами)

основана на непрерывной и точечной передаче данных между придорожными устройствами и поездом, модульной архитектуре бортового компьютера и интеллектуальных датчиках, которые позволяют поезду определять собственное местоположение на линии с высокой точностью.

ETCS является частью ERTMS, которая также содержит компоненты управления эксплуатацией поездов, информационную систему для пассажиров, сбор вагонов, энергетически оптимизированный ход поездов и т.д. Целью разработки ETC является стандартизация систем обмена информацией

между железнодорожными и путевыми объектами. Система состоит из ответчика Eurobalise, приводного ремня Euroloop, средств радиосвязи Еврорадио, локомотивного оборудования Eurocab.

Предлагаемое решение

В настоящее время для повышения производительности процесса передачи информации по радиоканалу здесь разработан и широко используется метод маскировки помех кодовых радиоканалов, реализуемый посредством комбинированного случайного кодирования передаваемых сообщений.

Наряду с созданием цифровых систем был разработан комбинированный алгоритм выбора параметров кода для передачи информации по радиоканалу с маскировкой помех, позволяющий получать результаты независимо от определенных схем кодирования и корректирующих кодов, одновременно обеспечивая повышение помехозащищенности и безопасную передачу данных по радиоканалу, а также управление передачей информации.

Рассмотрим принцип передачи данных по радиоканалу [3]. Существуют следующие отличия от альтернативных средств передачи цифровых данных, характерных для других закрытых систем:

1. Иерархические сети с кольцевой структурой. Компьютер централизации, как элемент управления, был отделен от кольцевой структуры, хотя все исполнительные блоки объединены по принципу замкнутого контура с помощью медного (SHDSL) или волоконно-оптического кабеля. Отступление от классической схемы звездообразных соединений по принципу «точка-точка» позволяет:

- уменьшить потребность в кабеле;
- с помощью кольца обеспечивают два независимых канала передачи данных.

2. Магистраль с волоконно-оптическим кабелем стандарта Ethernet, состоящим из двух независимых каналов и соединяющим компьютер кольцами, которые обеспечивают контроль над группой расположенных почти на обочине устройств через их контроллеры объектов. Данный тип резервирования гарантирует жизнеспособность системы при повреждении любых физических соединений. Длина магистрали может достигать десятков и даже сотен километров.

3. Планировка в контроллерах объектов диагностических задач. Благодаря размещению исполнительных цифровых элементов непосредственно на придорожных устройствах или даже внутри них, информационная вышка получает исчерпывающую информацию о состоянии объектов управления и контроля «из первых рук». При этом необходимо отличать проблемы управления/контроля от диагностики, предусматривая приоритетные принципы в рассматриваемой сети передачи данных.

4. Сетевые модули перед каждым управляющим или исполнительным элементом. Задачи модулей заключаются в определении высшего приоритета в отношении пути передачи потока данных в режиме реального времени и использовании канала с наименьшим приоритетом для передачи диагностических сообщений от придорожных устройств. Кроме того, сетевые модули поддерживают двойное соединение с магистралью, преобразуют протоколы (Ethernet поверх SHDSL), фильтруют трафик, имеют ограничения по объему передачи данных на линейную кольцевую шину и являются усилителями цифровых сигналов, которые обеспечивают связь на высоком диапазоне.

5. После передачи команд по обоим каналам сетевой модуль исполнительного элемента, получив первое сообщение, записывает его номер и запускает команду. Поступившее впоследствии по резервному каналу второе сообщение с таким же номером удаляется в сетевом модуле.

6. В перспективе магистраль волоконно-оптической линии связи может быть заменена радиоканалом (например, GSM-R), а сетевые модули будут подключены к соответствующим передатчикам радиосвязи.

7. С учетом разработки передовых энергосберегающих технологий, а также альтернативных источников местного электроснабжения, питающая сеть постепенно утратит свое значение, и местных источников питания будет достаточно для автономной работы устройств, удаленных от вышки устройств.

Следует учитывать, что при передаче данных внутри цифровой централизации любое неверное сообщение или ошибочная команда могут привести систему в опасное состояние. Чтобы исключить это, в стеке

протоколов TCP/IP выделена зона, отвечающая за передачу сигналов, и это не критично по отношению к безопасности. Таким образом, ответственные функции безопасности находятся на уровне приложений, а

транспортный уровень вместе с магистральной, линейной кольцевой шиной и сетевыми модулями (рис. 2) выполняет задачи высоконадежного пути передачи данных.

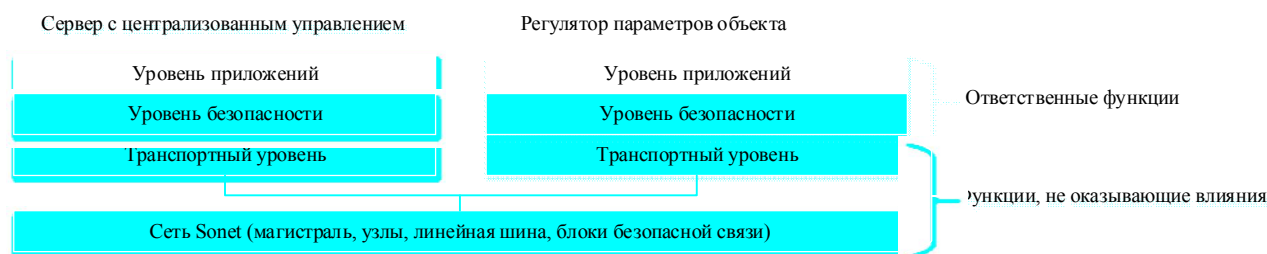


Рис. 2. Многоуровневая модель безопасной передачи данных

Реализация различных комбинаций передаваемых сообщений позволяет на практике осуществить способ маскировки кодовых помех радиоканалов, представляющий собой комбинацию помехоустойчивого и стохастического кодирования.

На рис. 3 показаны особенности повышения уровня защиты передачи информации с использованием метода маскировки кодовых помех, и, как видно, качество передачи цифровой информации

оценивается вероятностью ошибочного приема сообщений $P_{\text{ош}}$, не превышающей предельно допустимой величины $P_{\text{ош.треб.}}$. Значение $P_{\text{ош}}$ в свою очередь, определяется вероятностью ошибочного принятия информационного символа p_0 , связанного с характеристиками канала связи и параметрами используемого помехоустойчивого кода. В течение интервала времени от t_1 до t_2 в канале связи осуществляется передача информации.

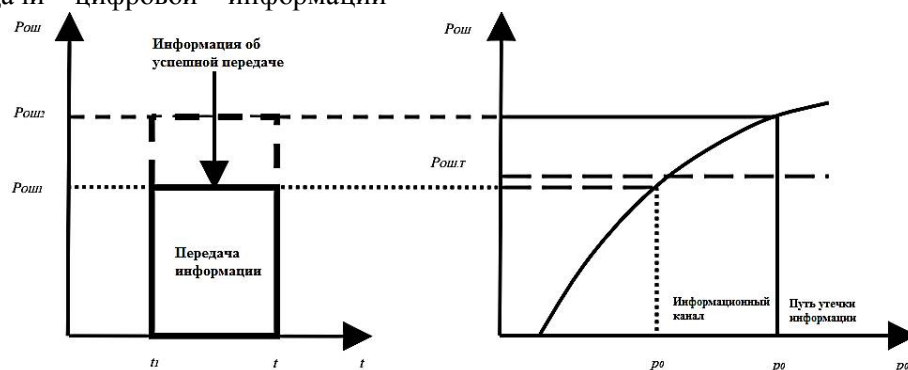


Рис. 3. Особенности повышения уровня защиты передачи информации с использованием метода маскировки кодовых помех

Моделирование и результаты

На первом этапе получения экспериментальных результатов измерения проводились по следующему плану. Компьютер 1 подключен к радиомодему потокового протокола реального времени (RTPS) на локомотиве, компьютер 2 подключен к магистральной TETRA через коммутатор на вышке.

На обоих компьютерах установлено программное обеспечение («приемник» на компьютере 2 и «передатчик» на компьютере 1), осуществляющее передачу протокола

пользовательских датаграмм UDP разной длины на различных скоростях. Увеличение или уменьшение количества пакетов приводит к изменению нагрузки на радиоканал.

Во время экспериментов на компьютерах 1 и 2 запускается специализированное программное обеспечение, обеспечивающее передачу и прием пакетов протокола пользовательских датаграмм (UDP). В ходе экспериментов были использованы настройки, представленные в табл. 2.

Таблица 2
Результаты, полученные на первом этапе
моделирования

Размер пакета, байт	Нагрузка на канал передачи данных, Кбит/с	Продолжительность испытания, мин.
46	1.2-2.0	105
64	1.2-2.4	30
76	1.2-2.4	30
86	1.2-2.8	105
106	1.2-2.8	30

Результаты измерений, включая данные о пропускной способности канала, времени прохождения пакетов, данные о потерях пакетов в радиосети TETRA, приведены на рис. 4-6.

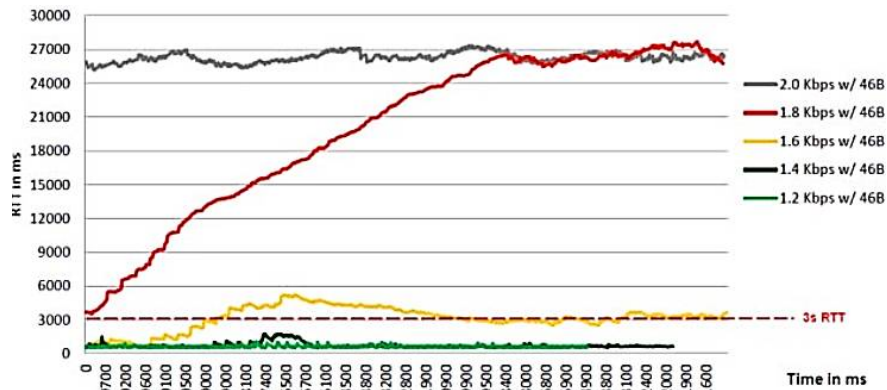


Рис. 4. Время прохождения пакета размером 46 байт

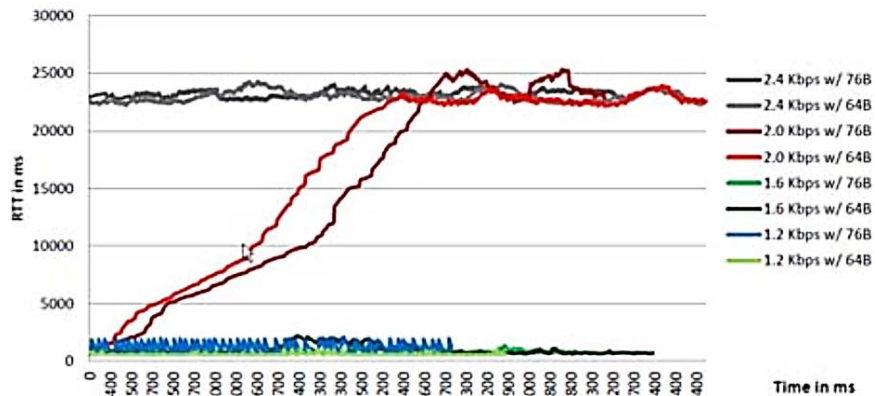


Рис. 5. Время прохождения пакета размером 64 байта и 76 байт

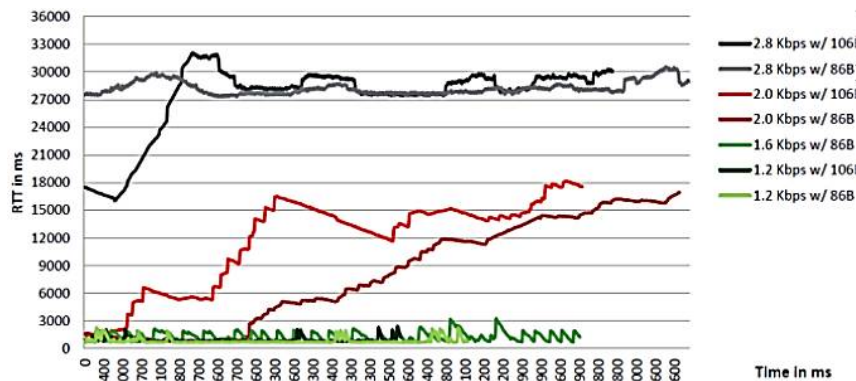


Рис. 6. Время прохождения пакета размером 86 и 106 байт

Как видно из графиков на рис. 4, для пакетов размером 46 байт эксперименты показали следующее [4]:

- при скоростях 1,2-1,4 килобит/с время прохождения пакетов туда и обратно (RTT) в обе стороны составляет около 1-2 секунд, при этом

время прохождения стабильно и практически не меняется в течение общей продолжительности теста;

- при скорости 1,6 килобит/с время передачи сигнала в обе стороны составляет 6 секунд;

- при скорости 1,8 килобит/с время прохождения начинается с 3 секунд и в течение тестового времени увеличивается до 27 секунд;

- при скорости 2,0 килобит/с RTT составляет около 26 секунд в пределах общей продолжительности экспериментального времени.

Как видно из графиков на рис. 5, для пакетов размером 64 и 76 байт эксперименты показали следующее:

- при скоростях 1,2-1,6 Кбит/с RTT изменяется от 1 до 3 секунд в течение всего теста;

- при скорости 2,0 Кбит/с RTT достигает 25 секунд, при этом по времени с момента начала эксперимента время прохождения увеличивается;

- при скорости 2,4 Кбит/с время RTT составляет около 25 секунд в течение всего теста.

Как видно из графиков на рис. 6, для пакетов размером 86 и 106 байт эксперименты показали следующее:

- при скоростях 1,2-1,6 Кбит/с RTT изменяется от 1 до 3 секунд в течение общей продолжительности теста;

- при скорости 2,0 Кбит/с RTT достигает 18 секунд, при этом с момента начала эксперимента время прохождения увеличивается;

- при скорости пакетов 2,8 Кбит/с RTT составляет около 30, при этом для пакетов размером 106 байт время прохождения в начале теста составляло около 18 секунд, а затем резко увеличилось до 32 секунд.

На втором этапе эксперимента компьютеры подключены к радиомодемным RTPS на локомотивах, а другие компьютеры подключены к магистрали TETRA.

Обмен пакетами происходит парами, между компьютерами. В ходе экспериментов на всех 4-х компьютерах запущено специализированное программное обеспечение, обеспечивающее передачу и прием UDP-пакетов. Локомотивы, участвующие в экспериментах, неподвижны.

Результаты измерений, в том числе данные о пропускной способности канала, времени прохождения пакетов, данные о потерях пакетов в радиосети TETRA приведены на рис. 7.

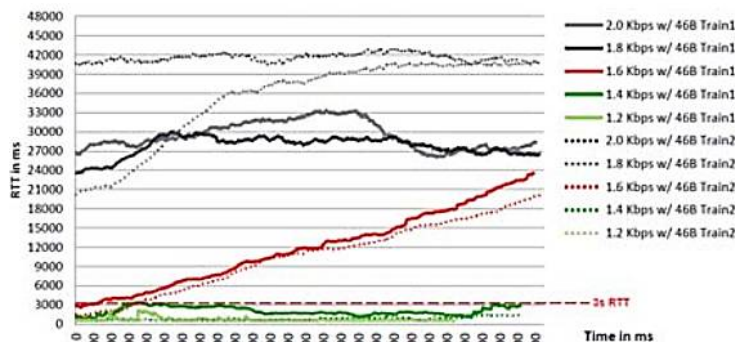


Рис. 7. Время прохождения пакета размером 46 байт

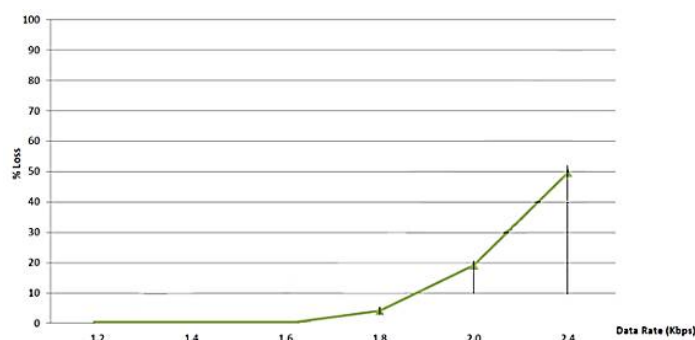


Рис. 8. Процент потери пакетов в радиосети

Как видно из графиков на рис. 7, для пакетов размером 46 байт эксперименты показали следующее:

- при скоростях 1,2-1,4 Кбит/с RTT для модемов, установленных на обоих локомотивах, варьируется от 1 до 3 секунд в пределах продолжительности теста;

- при скорости 1,6 Кбит/с время достигает 21 секунды, следовательно, по истечении времени с момента начала эксперимента время прохождения увеличивается [5]. Эта закономерность характерна для обоих модемов, установленных на локомотивах;

- при скорости 1,8 Кбит/с время RTT у первого локомотива достигло 30 секунд, у второго локомотива – 40 секунд;

- при скорости 2,0 Кбит/с время RTT пакетов у первого локомотива достигло 33 секунд, у второго локомотива – 42 секунд.

Процент потерь пакетов в радиосети представлен на рис. 8.

Как видно из графика, одновременно с увеличением скорости передачи и времени отправки корректировок растет и процент их потерь (до 50% при скорости 2,4 Кбит/с). Таким образом, в соответствии с требованиями к системе цифровой радиосвязи, требуемая пропускная способность должна быть не менее 4,8 Кбит/с, время прохождения пакетов в одну сторону не должно превышать 0,5 секунды, в обе стороны 1 секунду соответственно.

Заключение

Проведенные эксперименты показывают, что при любом размере пакета в системе стандартной цифровой радиосвязи TETRA при увеличении нагрузки на систему время прохождения пакетов соответственно увеличивается. При скорости передачи до 1,4 Кбит/с система отвечает требованиям ко времени прохождения пакетов. Начиная с загрузки 1,6-2,0 Кбит/с время прохождения

пакетов становится неприемлемо большим и достигает 30-40 секунд, что не соответствует предъявляемым требованиям.

Одновременно с этим растет процент потерянных данных (до 50%), при этом наблюдается потеря нескольких пакетов данных подряд. В будущем планируется провести другие эксперименты по уточнению эксплуатационных характеристик стандартной цифровой системы радиосвязи TETRA при работе с разрабатываемой национальной системой безопасности движения поездов.

Результаты, полученные экспериментальным путем, позволят в дальнейшем определить эксплуатационные характеристики цифровой системы радиосвязи при разработке национальной системы для обеспечения информационной безопасности железнодорожной сети.

Литература

1. Experimental determination of the characteristics of transmission spectrum of tiled fiber Bragg gratings / A. Tolegenova, P. Kisla, A. Zhetpisbayeva, O. Mamyrbayev, B. Medetov// Metrology and measurement systems. 2019. Vol. 26. P. 581-589.
2. Teyega G., Vlasenko S.V. Automation and telemechanics systems at the world railways. M.: Intext, 2010. P. 261 – 274.
3. Хорошайлова М.В. Архитектура канального кодирования на основе ПЛИС для 5G беспроводной сети с использованием высокоуровневого синтеза // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 2. С. 99-105.
4. Башкиров А.В., Хорошайлова М.В., Белецкая С.Ю. Использование стохастического вычисления для реализации не двоичного LDPC-декодера на ПЛИС // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2016. Т. 12. № 5. С. 70-73.
5. Khoroshaylova M.V. LDPC code and decoding algorithms // Антропоцентрические науки: инновационный взгляд на образование и развитие личности: материалы II-й междунар. науч.-практ. конф. В 2-х ч./ под ред. Э.П. Комаровой. Воронеж, 2015. С. 227-228.

Поступила 08.09.2022; принята к публикации 14.10.2022

Информация об авторах

Хорошайлова Марина Владимировна – канд. техн. наук, старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: pmv2205@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0001-9167-9538

Турецкий Андрей Владимирович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: tav7@mail.ru, AuthorID: 455597

Хорошайлов Роман Николаевич – магистрант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: hrm3001@mail.ru

METHOD OF INTERACTION OF TRAIN RADIO COMMUNICATION CHANNELS, ENSURING THE SECURITY OF DATA TRANSMISSION

M.V. Khoroshaylova, A.V. Turetskiy, R.N. Khoroshaylov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the paper discusses the principles of data transmission over a radio channel, in order to ensure information security, as well as to prevent threats when transmitting information over a radio channel. To experimentally determine data on the channel capacity, packet transit time, data on packet losses in the radio network, experiments were carried out on interaction with the train via a digital communication channel, taking into account the requirements for information security. The experiments performed show that for any packet size in a standard digital radio communication system, with an increase in the load on the system, the packet transit time increases. The experiment proved that the system satisfies the requirements for packet transit time with a transmission rate of up to 1.4 Kbps. During the experiment, the issues of communication between the radio unit center and the TETRA switching center, the connection of the radio unit center with electrical interlocking systems, the modernization of the on-board equipment of the locomotive and the verification of the operation algorithms of the on-board and stationary equipment were considered. It has been found that the performance of the TETRA digital radio system results in regular failures of the SIRDP-E (Radio Channel Based Train Interval Control System)

Key words: data transmission packets, information security, bandwidth, digital communication channel

References

1. Tolegenova A., Kisla P., Zhetpisbayeva A., Mamyrbayev O., Medetov B. "Experimental determination of the characteristics of transmission spectrum of tiled fiber Bragg gratings", *Metrology and Measurement Systems*, Poland, 2019, vol. 26 issue 3, pp.581-589.
2. Teyega G., Vlasenko S.V. "Automation and telemechanics systems at the world railways", Moscow: Intext, 2010, pp. 261–274.
3. Khoroshaylova M.V. "Architecture of FPGA based channel coding for 5G wireless network using high-level synthesis", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 2, pp. 99-105
4. Bashkirov A.V., Khoroshaylova M.V., Beletskaya S.Yu. "Use of stochastic computation for realization of non-binary LDPC-decoder on FPGA", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2016, vol. 12, no 5, p. 70-73.
5. Khoroshaylova M.V. "LDPC code and decoding algorithms", *Proc. of the 2nd Int. Sci.-Practical Conf.: Anthropocentric Sciences: an Innovative Look at Education and Personal Development (Antropotsentricheskie nauki: innovatsionnyy vzglyad na obrazovanie i razvitie lichnosti)*, 2015, pp. 227-228.

Submitted 08.09.2022; revised 14.10.2022

Information about the authors

Marina V. Khoroshaylova, Cand. Sci. (Technical), Assistant Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: pmv2205@mail.ru, tel.: +7-910-732-66-13, ORCID: orcid.org/0000-0001-9167-9538

Andrey V. Turetskiy, Cand. Sci. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: tav7@mail.ru.

Rovan N. Khoroshaylov, MA, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: hnm3001@mail.ru

НЕПРОФИЛИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОД-ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ КОМБИНИРОВАННОГО УДАЛЕНИЯ ЗАУСЕНЦЕВ В МЕСТАХ СОЕДИНЕНИЯ СОПРЯЖЕННЫХ ГРЕБЕНЧАТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

О.Н. Кириллов, В.П. Смоленцев, Г.А. Сухочев, С.С. Юхневич, Е.В. Котуков

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассмотрены возможности комбинированной обработки непрофилированным электродом-щеткой заусенцев в пазах со сложной геометрической формой. Предложена конструкция электрода щетки-кисточки для удаления заусенцев. Щетка-кисточка состоит из державки и рабочей части, изготавливаемой из металлической проволоки. Рабочая часть помещается в диэлектрическое кольцо из пластичного материала, расположенного по наружной поверхности кольца, и твердого, расположенного по его внешней поверхности. Диэлектрическое кольцо имеет отверстие в виде конуса. Отверстие своим меньшим диаметром размещено со стороны металлической проволоочной рабочей части. Кольцо при этом имеет высоту, не превышающую глубину обрабатываемого паза детали без учета максимальных геометрических размеров удаляемого заусенца. Диэлектрическое кольцо имеет два внутренних диаметра, больший - определяется по минимальной ширине паза без учета двойной толщины обрабатываемого заусенца, и меньший - выполненный не меньше диаметра рабочей проволоочной части при максимально рекомендованной для данного вида обработки плотности набивки проволоки в пучке. Рабочая часть электрода щетки-кисточки выбирается с длиной, которая не менее глубины зачищаемого паза, и диаметром в месте соединения рабочей части и державки щетки-кисточки, равным самой большой ширине обрабатываемого паза в изделии. Рассмотрен способ удаления заусенцев непрофилированным электродом щеткой-кисточкой в пазах оребрения охлаждения жидкостных ракетных двигателей. Приведены практические результаты проведенного эксперимента по удалению заусенцев в пазах, полученных фрезерованием

Ключевые слова: заусенцы, комбинированная обработка, электрод, щетка-кисточка, рабочая среда, ракетный двигатель

Введение

В машиностроении и, в частности, в космической отрасли, при изготовлении жидкостных ракетных двигателей существует проблема обработки используемого для охлаждения камер сгорания, сопел и других теплонапряженных изделий наружного оребрения, выполненного в форме каналов из пазов, получаемых фрезерованием.

Применение лезвийного инструмента и других методов обработки, в частности, комбинированного гидроабразивного метода [1, 2] для доработки таких поверхностей проблематично из-за особенностей геометрии пазов, их размеров и предъявляемых требований. Перспективно использовать для удаления заусенцев электрофизические и электрохимические, комбинированные методы обработки, в которых в качестве инструментов используются непрофилированные электроды-инструменты [3]. Однако использование в

качестве инструментов тонких, дисковых электродов-щеток не позволило обеспечить отсутствие скругления кромок на границе паза.

На рис. 1 представлено наружное оребрение охлаждения жидкостного ракетного двигателя.

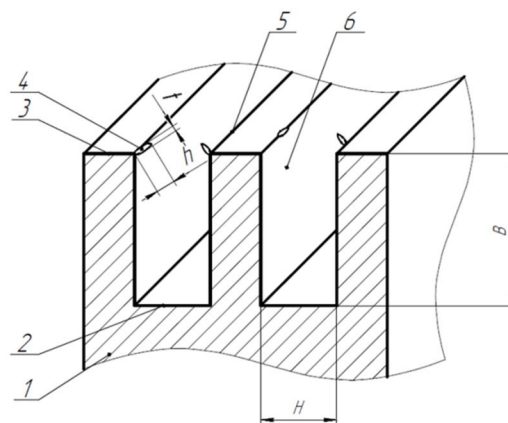


Рис. 1. Наружное оребрение охлаждения ЖРД: 1-деталь; 2-паз; 3-периферийная поверхность для нанесения припоя; 4-образующиеся после фрезерования каналов заусенцы; 5-острые кромки; 6-донная часть паза; В-глубина паза; Н-ширина паза; h-высота заусенца; t-толщина заусенца

Для формирования каналов, по которым подается охлаждающая среда, на

периферийную поверхность паза одеваются обечайка. Детали крепятся высокотемпературной пайкой, для которой на периферию паза помещают слой припоя. При этом на поверхностях категорически не допускается присутствие заусенцев.

Трудность обработки заключается в том, что поверхность периферии на границе с пазом имеет острые кромки, скругление которых не допускается. Паз имеет заданную ширину H , которая по техническому заданию должна быть выдержана. Причем донная часть паза имеет плоскую форму поверхности.

После обработки лезвийным инструментом, на поверхности паза остаются заусенцы разной геометрической формы и размеров, с разным расположением по отношению к поверхности паза: на гранях, внутри паза. В результате этого меняется ширина паза.

Непрофилированные электроды-инструменты для обработки узких пазов

Наиболее перспективными по конструкции для удаления заусенцев в узких пазах являются электроды-инструменты в виде щеток-кисточек (рис. 2). Электроды-щеточки изготовлены в форме щетки-кисточки. Их конструкция включает державку (корпус) для крепления рабочей части и непосредственно рабочую часть инструмента. Рабочая часть щетки-кисточки изготавливается из токопроводящей металлической проволоки [3] и помещается внутри трубочки из диэлектрического материала [3]. Во время удаления заусенцев электроду щетке-кисточке помимо прямолинейного поступательного движения придается вращательное. Удаление заусенцев включает их эрозионное, механическое разрушение и анодное растворение в жидкой, токопроводящей рабочей среде.



Рис. 2. Непрофилированные электроды инструменты в форме щеток-кисточек с разной степенью набивки и геометрией рабочей части

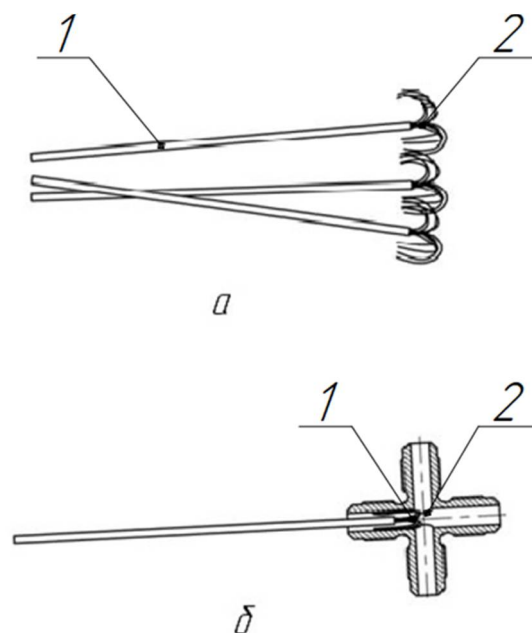


Рис. 3. Удаление заусенцев в пересекающихся каналах трубопроводов непрофилированным электродом-щеткой в форме кисточки: а - электрод-инструмент щетка-кисточка: 1 - державка, 2 - рабочая часть; б - удаление заусенцев: 1 - рабочая часть щетки-кисточки в канале трубопровода, 2 - удаляемые заусенцы

К недостаткам применения инструмента электрода-щеточки в виде кисточки относится снятие металла в донной части паза детали и неконтролируемое скругление острых кромок на периферии обрабатываемого паза, в результате чего уменьшается площадь поверхности наружного участка детали, что не допускается, в частности, при дальнейшем соединении высокотемпературной пайкой сопрягаемых деталей.

Разработка непрофилированного электрода-кисточки для обработки сопряженных гребенчатых поверхностей

Поставленная задача зачистки заусенцев с периферии паза с сохранением на переходных участках острых кромок достигается с помощью непрофилированного электрода-инструмента, выполненного в форме кисточки. Причем конструкция электрода щетки-кисточки содержит державку для крепления рабочей части и помещенную в диэлектрическую трубочку рабочую часть, изготовленную из металлической проволоки. Трубочка имеет форму кольца, рис. 4, изготовленного из диэлектрического жесткого

и пластичного материалов. Пластичный диэлектрик расположен по наружной поверхности кольца, твердый по внутренней. Диэлектрическое кольцо имеет отверстие в виде конуса. Кольцо выполнено с высотой, не превышающей глубину обрабатываемого паза, без учета максимальных геометрических размеров удаляемого заусенца. В кольце выполнены два внутренних диаметра в виде конуса. Большой внутренний диаметр соответствует минимальной ширине обрабатываемого паза, меньший внутренний диаметр имеет размер не менее диаметра рабочей части щетки-кисточки, с плотностью набивки проволоки, максимально возможной для данного вида обработки [3]. Рабочая часть щетки-кисточки изготавливается с длиной проволок, соответствующей глубине паза, и диаметром щетки-кисточки в месте крепления рабочей части в державке, соответствующим ширине обрабатываемого паза [4].

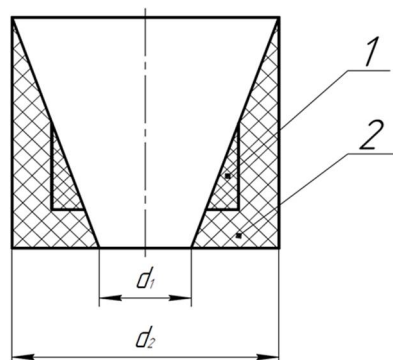


Рис. 4. Диэлектрическое кольцо: 1- внутренняя часть кольца, изготовленная из жесткого диэлектрического материала; 2- внешняя часть кольца, изготовленная из эластичного диэлектрического материала; d_1 - диаметр внутренней части кольца; d_2 - наружный диаметр кольца

До начала удаления заусенцев в диэлектрическое кольцо помещают рабочую часть непрофилированного электрода щетки-кисточки до выступания проволоки пучка из кольца. В дальнейшем электрод щетку-кисточку опускают в паз детали до упора в его донную часть и фиксируют такое положение кольца.

Обработка паза поясняется рисунками. На рис. 5 показан непрофилированный электрод щетка-кисточка после установления на его рабочую часть диэлектрического кольца.

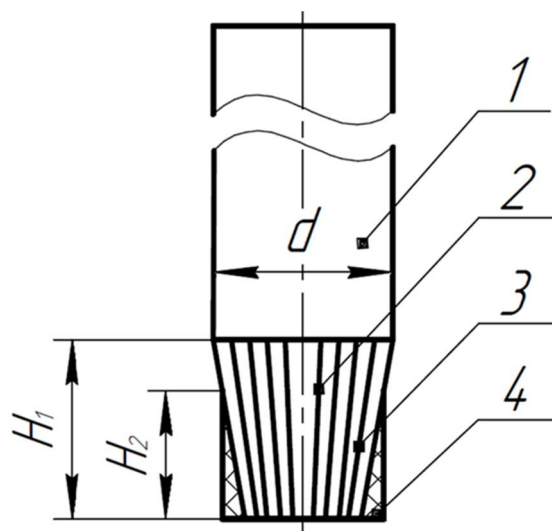


Рис. 5. Конструкция непрофилированного электрода щетки-кисточки для обработки пазов: 1 - державка; 2 - рабочая часть электрода-щеточки; 3 - пучки металлической проволоки рабочей части электрода-щеточки; 4 - кольцо из диэлектрических материалов; d - диаметр рабочей части непрофилированного электрода в месте соединения с державкой; H_1 - длина рабочей части непрофилированного электрода; H_2 - высота диэлектрического кольца

С целью зачистки заусенцев необходимо, чтобы:

$$H_2 \leq B - h,$$

где B - минимальная глубина паза, мм; h - заусенцы с наибольшими геометрическими размерами (длиной), мм.

Размеры наружного диаметра кольца d_2 не должны превышать ширину паза H без учета толщины заусенцев:

$$d_2 \leq H - 2t,$$

где H - наименьшая ширина паза, мм;

t - максимальная толщина заусенца, мм.

Существование наружного диэлектрического слоя 2 на кольце дает возможность перемещения между заусенцами. При этом внутренний диаметр кольца d_1 изготавливается диаметром не менее рабочей части пучков проволоки по предельной плотности заполнения пучков.

По данным [3] показатель заполнения рабочей части щетки-кисточки проволочками (коэффициент набивки) Π изменяется от 0,2 до 0,7.

В этом случае $d_1 \geq \Pi \times d_2$.

Диаметр рабочей части электрода щетки-кисточки меняют, перемещая его вдоль оси и задавая вращение вокруг оси по сигналам измерителя от генератора постоянного тока. Комбинированное эрозионно-химико-механическое удаление заусенцев

осуществляют в токопроводящей рабочей жидкости [3].

На рис. 6 изображено положение непрофилированного электрода щетки-кисточки на периферийной поверхности паза детали в процессе его зачистки.

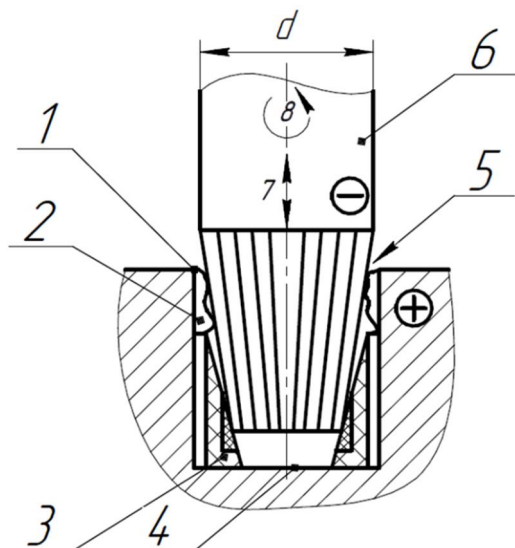


Рис. 6. Положение элементов непрофилированного электрода щетки-кисточки в зоне обработки: 1 - острые кромки; 2 - заусенец; 3 - диэлектрическая втулка; 4 - донная часть паза; 5 - подача жидкой рабочей среды; 6 - электрод щетки-кисточка; 7 - перемещение непрофилированного инструмента вдоль оси; 8 - вращение непрофилированного инструмента; d - диаметр рабочей части электрода в месте соединения с державкой

После установления диэлектрического кольца электрод щетки-кисточку подают до касания в донную часть обрабатываемого паза. Выступающие заусенцы таким образом сминаются и придвигаются к его боковым плоскостям. Рабочая часть электрода щетки-кисточка, сжимая эластичную часть кольца, продвигается между заусенцами в паз.

От привода непрофилированному электроду щетки-кисточке сообщают движение вокруг оси. В зону обработки под давлением подают жидкую рабочую среду. Накладывают электрическое поле. Диэлектрическое кольцо фиксируют в донной части паза. Величину и форму тока постоянно измеряют. После начала эрозионно-химического удаления заусенцев его поддерживают подачей инструмента до полного удаления заусенца и прекращения искрового процесса обработки, осуществляя контроль по величине тока. Затем в электроискровом режиме электрод щетки-

кисточку перемещают по длине паза до полной зачистки заусенцев.

Результаты эксперимента

Для обработки паза после фрезерования необходимо удалить заусенцы. Ширина пазов $1,2 \pm 0,1$ мм, глубина $2,2 \pm 0,2$ мм в изделии из материала 9ХС [4]. Наибольшие геометрические размеры удаляемых заусенцев: высота - 0,2 мм, толщина - 0,05 мм. Непрофилированный электрод-инструмент щетка-кисточка изготовлен со следующими характеристиками: длина рабочей части - 5 мм, диаметр $d=1,3$ мм, диаметр рабочей части при плотности набивки в пучке 0,45-0,5 составляет 0,6 мм. Материал изготовления рабочей части электрода-щетки - медь М1, диаметр проволочек рабочей части пучка - 0,08 мм. Размеры диэлектрического кольца: $H_2=1,5$ мм, $d_1=0,6$ мм, $d_2=1,0$ мм.

Рабочую часть электрода щетки-кисточка помещаем в диэлектрическое кольцо и вставляем в обрабатываемый паз. Затем перемещаем электрод-инструмент до упора в донную часть паза. Задаем режимы комбинированной обработки по [3]: напряжение - 8 В, в качестве рабочей среды используем Укринол с подачей рабочей среды под давлением - 0,12 МПа. Частота вращения непрофилированного электрода щетки-кисточка - 1 Гц. Перемещение электрода щетки-кисточка вдоль обрабатываемого паза для удаления заусенцев производим со скоростью - 10 м/мин.

В результате обработки заусенцы полностью удалены, дефектов и повреждений на боковой и донной поверхностях паза не обнаружено. Радиус скругления острой кромки на периферийной поверхности паза находится в пределах заданного допуска [4].

Выводы

Предложенная конструкция непрофилированного электрода щетки-кисточка для комбинированной обработки представляет интерес для удаления заусенцев и формирования острых кромок требуемого профиля на поверхности пазов со сложной геометрической формой в изделиях ракетно-космической техники и расширяет возможности обработки в машиностроении наукоемких изделий, в том числе

изготовленных из биметаллов и новых материалов с анизотропными свойствами [5].

Литература

1. Кириллов О.Н., Гончаров Е.В., Котуков В.И. Повышение качества поверхностного слоя деталей гидроабразивной обработкой с локальным анодным растворением // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2013. Т.9. № 6.1. С. 64-66.

2. Кириллов О.Н., Гончаров Е.В., Котуков В.И. Комбинированное гидроабразивное с локальным электрохимическим растворением удаление заусенцев // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2014. Т.10. №1. С. 24-26.

3. Кириллов О.Н. Технология комбинированной обработки непрофилированным электродом: монография. Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2010. 254 с.

4. Пат. № 2724215 С1 Российская Федерация. Электрод-щетка и способ ее применения для удаления заусенцев в пазах деталей/ Кириллов О.Н., Смоленцев В.П., Котуков Е.В., Смоленцева Я.С. 2020. Бюл. №18

5. Оборудование и средства технологического оснащения для прессования и комбинированной обработки изделий из порошковых материалов / С.С. Юхневич, О.Н. Кириллов, В.П. Смоленцев, Е.В. Котуков // Инновационные технологии в транспортном и химическом машиностроении: материалы XII Междунар. науч.-техн. конф. Тамбов: ТГТУ, 2020. С. 75-80.

Поступила 01.08.2022; принята к публикации 17.10.2022

Информация об авторах

Кириллов Олег Николаевич - д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006 г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. 89081472413, e-mail: kirillov.oli@yandex.ru

Смоленцев Владислав Павлович - д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006 г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. 89036559970, e-mail: vsmolen@inbox.ru

Сухочев Геннадий Алексеевич - д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006 г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. 89081417180, e-mail: suhotchev@mail.ru

Юхневич Сергей Степанович - канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006 г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. 89038513731, e-mail: sergee1975@yandex.ru

Котуков Евгений Васильевич - аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006 г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. 89100403607, e-mail: evgeniy_kotukov@icloud.com

UNPROFIED TOOL ELECTRODE FOR COMBINED REMOVAL OF BURR IN POINTS OF JOINING MATCHING COMB SURFACES

O.N. Kirillov, V.P. Smolentsev, G.A. Sukhochev, S.S. Yuxhnevich, E.V. Kotukov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article considers the possibilities of combined processing of burrs in grooves with a complex geometric shape with a non-profiled brush electrode. We proposed the design of the brush electrode for removing burrs. The brush-brush consists of a holder and a working part made of metal wire. The working part is placed in a dielectric ring made of a plastic material located on the outer surface of the ring, and a solid one located on its outer surface. The dielectric ring has a hole in the form of a cone. The hole with its smaller diameter is located on the side of the metal wire working part. In this case, the ring has a height not exceeding the depth of the machined groove of the part, without taking into account the maximum geometric dimensions of the burr to be removed. The dielectric ring has two inner diameters, the larger one is determined by the minimum width of the groove without taking into account the double thickness of the processed burr, and the smaller one is made not less than the diameter of the working wire part at the maximum recommended for this type of processing, the packing density of the wire in the bundle. The working part of the brush-brush electrode is selected with a length that is not less than the depth of the groove being cleaned, and a diameter at the junction of the working part and the holder of the brush-brush equal to the largest width of the processed groove in the product. We considered a method for removing burrs with a non-profiled electrode with a brush-brush in the grooves of the cooling fins of liquid-propellant rocket engines. Here we give the practical results of the experiment on the removal of burrs in the grooves obtained by milling

Key words: burrs, combined treatment, electrode, brush-brush, working medium, rocket engine

References

1. Kirillov O.N., Goncharov E.V., Kotukov V.I. "Improving the quality of the surface layer of parts by waterjet treatment with local anodic dissolution", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2013, vol. 9, no. 6.1, pp. 64-66.

2. Kirillov O.N., Goncharov E.V., Kotukov V.I. "Combined hydroabrasive with local electro-chemical dissolution removal of burrs", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2014, vol.10, no. 1, pp. 24-26.

3. Kirillov O.N. "Technology of combined treatment with an unprofiled electrode" ("Tekhnologiya kombinirovannoy obrabotki neprofilirovannym elektrodom"), monograph, Voronezh State Technical University, 2010, 254 p.

4. Kirillov O.N., Smolentsev V.P., Kotukov E.V., Smolentseva Ya.S. "Electrode brush and the method of its application for removing burrs in the grooves of parts" ("Elektrod-shchetka i sposob ee primeneniya dlya udaleniya zausentsev v pazakh detaley"), patent no. 2724215 C1 Russian Federation, 2020, bull. no. 18

5. Yikhnevich S.S., Kirillov O.N., Smolentsev V.P., Kotukov E.V. "Equipment and means of technological equipment for pressing and combined processing of products made of powder materials", *Proc. of XII International Scientific and Technical Conf.: Innovative Technologies in Transport and Chemical Engineering (Innovatsionnye tekhnologii v transportnom i khimicheskoy mashinostroyenii)*, October 6-9, 2020, Tambov, TSTU, 2020, pp. 75-80.

Submitted 01.08.2022; revised 17.10.2022

Information about the authors

Oleg N. Kirillov, Dr. Sci. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +79081472413, e-mail: kirillov.oli@yandex.ru

Vladislav P. Smolentsev, Dr. Sci. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +79036559970, e-mail: ysmolen@inbox.ru

Gennadiy A. Sukhochev, Dr. Sci. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +79081417180, e-mail: suhotchev@mail.ru

Sergey S. Yikhnevich, Cand. Sci. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +79038513731, e-mail: sergee1975@yandex.ru

Evgeniy V. Kotukov, graduate student, Voronezh State Technical University 84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +79100403607, e-mail: evgeniy_kotukov@icloud.com