

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут"

ВІСНИК

НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
"ХПІ"

Серія: Інформатика та моделювання

№ 42 (1318) 2018

Збірник наукових праць

Видання засновано у 1961 році

Харків
НТУ "ХПІ", 2018

Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2018. – № 42 (1318). – 203 с.

Державне видання

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України

КВ № 5256 від 2 липня 2001 року

Збірник виходить українською, російською та англійською мовами.

Вісник Національного технічного університету "ХПІ" внесено до "Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук", затвердженого наказом Міністерства освіти і науки України № 1328 (додаток 8) від 21.12.2015 р.

Серія "Інформатика та моделювання" Вісника НТУ "ХПІ" включена у наукометричні бази Copernicus (Польща), Elibrary (РІНЦ), DOAJ (Швеція), Google Scholar і базу даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).

Головний редактор

Сокол Є. І., д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України, НТУ "ХПІ", Україна

Заст. головного редактора

Марченко А. П., д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПІ", Україна

Секретар

Горбунов К. О., доц., НТУ "ХПІ", Україна

Редакційна колегія серії:

Відповідальний редактор: Дмитрієнко В. Д., д-р техн. наук, проф.

Відповідальний секретар: Леонов С. Ю., д-р техн. наук, проф.

Члени редколегії:

О.П. Арсеньєва, д-р техн. наук, проф.;

Є.Г. Жиляков, д-р техн. наук, проф.;

О.Ю. Заковоротний, д-р техн. наук, проф.;

М.І. Корсунов, д-р техн. наук, проф.;

Г.А. Кучук, д-р техн. наук, проф.;

О.С. Логунова, д-р техн. наук, проф.;

Р.П. Мигущенко, д-р техн. наук, проф.;

А.І. Поворознюк, д-р техн. наук, проф.;

Г.А. Самігуліна, д-р техн. наук, проф. (Казахстан);

О.А. Серков, д-р техн. наук, проф.;

Г.М. Сучков, д-р техн. наук, проф.;

Г.Є. Філатова, д-р техн. наук, доц.;

А.Г. Трифонов, д-р техн. наук, проф. (Белорусь);

Х. Гамзасв, д-р техн. наук, проф. (Азербайджан);

Б.А. Худаяров, д-р техн. наук, проф. (Узбекистан);

I. Zanevsky, PhD, prof. (Polska);

D. Sakara, PhD, prof. (Switzerland);

Jiri Jaromir Klemes, Dr., Prof (Czech Republic);

Issa Shehabat, Dr., Assistant Professor (Jordan);

David J. Kukulka, PhD (USA).

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ "ХПІ"

Протокол № 10 від 22.12.2018 р.

ISSN 2079-0031 (Print)

ISSN 2411-0558 (Online)

© Національний технічний університет "ХПІ", 2018

Розміщення Вісника НТУ "ХПІ"
серія "Інформатика та моделювання"

в міжнародних наукометричних базах, репозитаріях та пошукових системах

1. Serial registries: ISSN, Ulrich's Periodical Directory (USA).

2. Abstracting systems: Copernicus (Poland), eLibrary (Russia), CiteFactor, SIS (Scientific Indexing Services), Open Academic Journals Index (Russia), UIF (Universal Impact Factor), Directory of Research Journals Indexing (India).

3. Web-based search systems: Google Scholar, Academic Index.

4. Electronic Libraries: Cyberleninka (Russia), Bielefeld Academic Search Engine (Germany), Open Journal Systems (Ukraine), Національна бібліотека ім. Вернадського (Ukraine), Науково-технічна бібліотека НТУ "ХПІ" (Ukraine), Text Archive (Russia).

5. Journal databases: Directory of open access journals (Sweden), OCLC WorldCat (USA), Research Bible (Japan), Genamics Journal Seek (USA), SHERPA/ReMeO, Academic Database Assessment Tool.

6. University Libraries: **USA:** Walden University, Beardsley Library Journals, University at Albany, University of Texas, WRLC Catalogs, University Oregon, Monterey Bay Library, University of Kentucky, University of Georgia, Indiana University, Harvard Library, New York University, Northwestern University, San Jose State University, Library & Technology Services, Mercyhurst College Library System, Poudre River Public Library District, Virtual Science Library, Journal index, Jean and Alexander Heard Library. **UK:** Birmingham Public Library, British Library, Social Services Knowledge Scotland, Linking Service, University of Strathclyde Glasgow, SUPrime Library, University of Glasgow, Royal Holloway University of London, University of Cambridge, University of Essex, University of Nottingham, One Search, UCL Library Services. **Canada:** University of New Brunswick, Trinity Western University, University of Saskatchewan, University of Ottawa, University of Regina, University of Windsor, Laurentian University. **Australia:** Latrobe University Library, The Grove Library, State Library, SL On Search, Griffith University, UniSA. **Sweden:** IBRS – Nationally bibliotheca system, Hogskolan Dalarna, Sodertorns hogskola, Stockholms University Library, Chalmers Bibliotheca. **Netherlands:** Quality Open Access Market, University of Leiden. **Mexico:** University Mexico, CCG-IBT Bibliotheca. **Other countries:** Universia (Spain), Babord+ (France), SLU (Sweden), Cerge EL (Czech Republic), BON (Portugal), AUT Library (New Zealand), Polska Bibliografia Naukowa (Poland), State National Technical Library (Ukraine), Scientific Library named by Govorov (Russia, St. Petersburg), Universiteits bibliotheek Gent (Belgium), E-Resources Subject Access (China).

Електронна адреса сайту Вісника НТУ "ХПІ" серії "Інформатика та моделювання" www.pim.net.ua

Математические методы и модели

УДК 517.956.6

DOI: 10.20998/2411-0558.2018.42.01

А. А. АБДУЛЛАЕВ, асс., ТИИМСХ, Ташкент,

Н. М. САФАРБАЕВА, ст. преп., ТИИМСХ, Ташкент

ОБ ОДНОЙ КРАЕВОЙ ЗАДАЧЕ ДЛЯ УРАВНЕНИЯ СМЕШАННОГО ТИПА ВТОРОГО РОДА

Стационарные процессы различной физической природы (колебания, теплопроводность, диффузия, электростатика и т.д.) описываются уравнениями эллиптического типа. В частности, в некоторых моделях, таких, как гидро и газовой динамики рассматриваются эллиптические уравнения. В данной работе изучается нелокальная краевая задача с условием Пуанкаре для уравнения эллиптического-гиперболического типа второго рода, т.е. для уравнения, где линия вырождения является характеристикой. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: нелокальная краевая задача; условия Пуанкаре; уравнения эллиптического-гиперболического типа второго рода.

Постановка проблемы. Уравнения смешанного типа благодаря приложениям при решении многих важных вопросов прикладного характера в газовой динамике, магнитной гидродинамике, в теории электронного рассеивания, теории бесконечно малых изгибов поверхностей, в прогнозировании уровня грунтовых вод являются одними из основных направлений развития теории дифференциальных уравнений в частных производных. Локальные и нелокальные краевые задачи для уравнения смешанного типа второго рода мало изучены. Доказать однозначную разрешимость таких краевых задач для уравнения второго рода не всегда удаётся. В данной работе впервые изучается нелокальная краевая задача с условием Пуанкаре для уравнения эллиптического-гиперболического типа второго рода, т.е. для уравнения, где линия вырождения является характеристикой.

Анализ литературы. В [1] доказано однозначная разрешимость нелокальной краевой задачи для уравнения эллиптического типа второго рода, в [2] доказано единственность локальной краевой задачи для уравнения эллиптического-гиперболического типа второго рода, в [3] изучены смешанные задачи для уравнения первого рода с двумя линиями вырождения, а в работе [4] получено обобщенное решение видоизменённой задачи Коши для уравнения гиперболического типа второго рода. В [5] доказана однозначная разрешимость нелокальной краевой задачи с конормальной производной для уравнения смешанного эллиптического-гиперболического типа с двумя внутренними линиями и различными порядками вырождения первого рода. В работах [6 – 8]

исследованы смешанные краевые задачи для параболо-гиперболического типов третьего порядка второго рода.

Цель статьи – доказать однозначную разрешимость нелокальной краевой задачи с условием Пуанкаре для уравнения эллипτικο-гиперболического типа второго рода.

Рассмотрим уравнение

$$\operatorname{sign} y |y|^m u_{xx} + u_{yy} = 0, \quad -1 < m < 0 \quad (1)$$

в области $D = D_1 \cup D_2$, где D_1 – ограничена кривой σ при $y > 0$ с концами в точках $A(0,0)$, $B(1,0)$ и отрезком AB ($y = 0$), а D_2 – при $y < 0$ ограничена тем же отрезком AB и характеристиками уравнения (1).

Задача. Требуется найти функцию $u(x, y)$, обладающую следующими свойствами:

1) $u(x, y) \in C(\bar{D})$ – является регулярным решением уравнения (1) в области D_1 , а в области D_2 – обобщенным решением из класса R_2 [1];

2) выполняется условие склеивания

$$-u_y(x, -0) = u_y(x, +0); \quad (2)$$

3) удовлетворяет следующим граничным условиям:

$$\{a(s)A_s[u] + b(s)u\}_{\sigma} = \varphi(s), \quad 0 < s < l, \quad (3)$$

$$D_{0x}^{1-\beta} u[\theta_0(x)] = c(x)u(x, 0) + f(x), \quad 0 < x < 1, \quad (4)$$

где s – длина дуги σ , отсчитываемой от точки $B(1,0)$, а $a(s)$, $b(s)$, $\varphi(s)$, $c(x)$, $f(x)$ – заданные функции, причём

$$a(s)b(s) \geq 0, \quad 0 \leq s \leq 1, \quad a(s), \quad b(s), \quad \varphi(s) \in C[0, l],$$

а $f(x)$ – может иметь особенность порядка меньше чем -2β , где

$$\beta = \frac{m}{2(m+2)}.$$

Единственность решения задачи доказывается методом интегралов энергии [1]. Переходим к исследованию существования решения поставленной задачи.

Решение задачи в области D_1 удовлетворяющее условию (3) и $u|_{y=0} = \tau(x)$, $(0 \leq x \leq 1)$ имеет вид [2]:

$$u(x, y) = \int_0^1 \tau(\xi) \frac{\partial}{\partial \eta} G_2(\xi, 0; x, y) d\xi + \int_0^l \frac{\varphi(s)}{a(s)} G_2(\xi, \eta; x, y) ds, \quad (5)$$

где $G_2(\xi, \eta; x, y)$ – функция Грина данной задачи в области D_1 , а в области D_2 , решая видоизмененную задачу Коши для гиперболического уравнения, получим обобщенное решение из класса R_2 [3]:

$$u(\xi, \eta) = \int_0^\xi (\eta - \zeta)^{-\beta} (\xi - \zeta)^{-\beta} T(\zeta) d\zeta + \int_\xi^\eta (\eta - \zeta)^{-\beta} (\zeta - \xi)^{-\beta} N(\zeta) d\zeta, \quad (6)$$

где

$$N(\zeta) = \frac{1}{2\pi \cos \pi\beta} T(\zeta) - \gamma_2 v(\zeta), \quad (7)$$

$\gamma_2 = [2(1-2\beta)]^{2\beta-1} \frac{\Gamma(2-2\beta)}{\Gamma^2(1-\beta)}$, а $T(\zeta)$ определяется из следующего определения.

Определение. Функция $u(\xi, \eta)$, определённая формулой (6), называется обобщенным решением задачи Коши для уравнения (1) в области D_2 из класса R_2 [4], в котором $\tau(x)$ имеет вид:

$$\tau(x) = \int_0^x (x-t)^{-2\beta} T(t) dt,$$

где $v(x)$ и $T(x)$ – непрерывные и интегрируемые функции в интервале $(0;1)$.

Из равенств (5) и (6) получаем следующие функциональные соотношения между $\tau(x)$ и $v(x)$:

$$\begin{aligned}
v(x) = & \frac{k_2}{2\beta(2\beta-1)} \left[\frac{d}{dx} \int_0^x \frac{\tau'(t)}{(x-t)^{-2\beta}} dt + \frac{d}{dx} \int_x^1 \frac{\tau'(t)}{(t-x)^{-2\beta}} dt \right] - \\
& - k_2 \int_0^1 \frac{\tau(t) dt}{(t+x-2xt)^{2-2\beta}} + \int_0^1 \tau(t) \frac{\partial^2 H_2(t,0;x,0)}{\partial \eta \partial y} dt + \\
& + \int_0^l \chi(s) \frac{\partial q_2(\xi, \eta; x, 0)}{\partial y} ds + \frac{k_2}{\beta(2\beta-1)} x^{2\beta} \tau'(0)
\end{aligned} \quad (8)$$

и

$$\begin{aligned}
\tau'(x) = & -2\beta\gamma_3 \int_0^x (x-t)^{-2\beta-1} v(t) dt - \\
& - 2\beta\gamma_3 \int_0^x (x-t)^{-2\beta-1} dt \int_0^t R(t,z) v(z) dz + F'_0(x),
\end{aligned} \quad (9)$$

$$\text{где } F_0(x) = \frac{1}{\Gamma(1-\beta)} \int_0^x (x-t)^{-2\beta} t^\beta f(t) dt + \frac{\lambda}{\Gamma(1-\beta)} \int_0^x (x-t)^{-2\beta} dt \int_0^t R(t,z) t^\beta f(z) dz,$$

а $R(t, z)$ – есть резольвента следующего интегрального уравнения

$$T(x) = \lambda_1 \int_0^x K(x,t) T(t) dt + F(x),$$

$$\text{где } \lambda_1 = \frac{2 \cos \pi \beta}{\Gamma(1-\beta)}, \quad K(x,t) = (x-t)^{-2\beta} x^\beta c(x), \quad F(x) = \frac{x^\beta f(x)}{\Gamma(1-\beta)} + \gamma_3 v(x),$$

$$\gamma_3 = 2\pi\gamma_2 \cos \pi \beta.$$

Существование решения задачи для уравнения (1) в силу (5) и (6) эквивалентно разрешимости систем (8) и (9). Подставляя (8) в (9) после некоторых вычислений, с учётом условия склеивания (2) и $x^{2\beta} \tau'(x) = \rho(x)$, получим сингулярное интегральное уравнение с ядром типа Коши. Применяя известный метод регуляризации, получим интегральное уравнение Фредгольма второго рода, эквивалентное поставленной задаче, разрешимость которого следует из единственности решения сформулированной задачи.

Выводы: В статье представлены новые математические результаты, связанные с изучением нелокальной краевой задачи с условием Пуанкаре для уравнения эллиптико-гиперболического типа второго рода. Показано, что сформулированная в работе задача имеет единственное решение. Этот результат может использоваться при моделировании газо- и гидродинамических процессов.

Список литературы:

1. *Islomov B.I.* On a problem for an elliptic type equation of the second kind with a conormal and integral condition / *B.I. Islomov, A.A. Abdullayev* // *Journal Nanosystems: physics, chemistry, mathematics*. – 2018. – Vol 9 (3). – P. 307-318.
2. *Abdullayev A.A.* On uniqueness of a boundary value problem for an equation of elliptichyperbolic type of the second kind / *A.A. Abdullayev* // *Bulletin of the Institute of Mathematics*. – 2018. – Vol 5. – P. 30-35.
3. *Салахитдинов М.С.* Уравнения смешанного типа с двумя линиями вырождения / *М.С. Салахитдинов, Б.И. Исломов*. – Ташкент: "Мумтоз суз", 2010. – 264 с.
4. *Мамадалиев Н.К.* О представлении, решения видоизмененной задачи Коши / *Н.К. Мамадалиев* // *Сибирский математический журнал РАН*. – 2000. – Т. 41. – № 5. – С. 1087-1097.
5. *Салахитдинов М.С.* Нелокальная краевая задача с конормальной производной для уравнения смешанного типа с двумя внутренними линиями и различными порядками вырождения / *М.С. Салахитдинов, Б.И. Исломов* // *Изв. вузов. Математика*. – 2011. – № 1. – С. 49-58.
6. *Salakhitdinov M.S.* A nonlocal boundary-value problem with the Bitsadze-Samarskii condition for a parabolic-hyperbolic equation of the second kind / *M.S. Salakhitdinov, N.B. Islamov* // *Russian Mathematics*. – 2015. – Vol. 59. – №. 6. – P. 34-42.
7. *Baltaeva U.I.* Solvability of the analogs of the problem Tricomi for the mixed type loaded equations with parabolic-hyperbolic operators / *U.I. Baltaeva* // *Boundary Value Problems*. – 2014. – Vol 211. – P. 1-12.
8. *Islomov B.* Boundary Value Problems for the Classical and Mixed Integrodifferential Equations with Riemann-Liouville Operators / *B. Islomov, U.I. Baltaeva* // *International Journal of Partial Differential Equations*. – 2013, Article ID 157947, 7 pages <http://dx.doi.org/10.1155/2013/157947> (accepted 30 July 2013).

References:

1. *Islomov, B.I. and Abdullayev, A.A.* (2018), "On a problem for an elliptic type equation of the second kind with a conormal and integral condition", *Journal Nanosystems: physics, chemistry, mathematics*, Vol 9 (3), pp. 307-318.
2. *Abdullayev, A.A.* (2018), "On uniqueness of a boundary value problem for an equation of elliptichyperbolic type of the second kind", *Bulletin of the Institute of Mathematics*, Vol 5, pp. 30-35.
3. *Salakhitdinov, M.S., and Islomov, B.I.* (2010), *Equations of mixed type with two lines of degeneracy*, "Mumtoz suz", Tashkent, 264 p.
4. *Mamadaliev, N.K.* (2000), "On the representation, solving the modified Cauchy problem", *Siberian Mathematical Journal of the Russian Academy of Sciences*, Vol. 41, No. 5, pp. 1087-1097.
5. *Salakhitdinov, M.S. and Islomov, B.I.* (2011), "Nonlocal boundary value problem with a conormal derivative for a mixed type equation with two internal lines and different orders of degeneracy", *Izv. universities. Mathematics*, No. 1, pp. 49-58.

-
6. Salakhitdinov, M.S. and Islamov, N.B. (2015), "A nonlocal boundary-value problem with the Bitsadze-Samarskii condition for a parabolic-hyperbolic equation of the second kind", *Russian Mathematics*, Vol. 59, No. 6, pp. 34-42.
7. Baltaeva, U.I. (2014) , "Solvability of the analogs of the problem Tricomi for the mixed type loaded equations with parabolic-hyperbolic operators", *Boundary Value Problems*, Vol. 211, pp. 1-12.
8. Islomov, B. and Baltaeva, U.I. (2013), "Boundary Value Problems for the Classical and Mixed Integrodifferential Equations with Riemann-Liouville Operators", *International Journal of Partial Differential Equations*, Vol. 2013, Article ID 157947, 7 pages <http://dx.doi.org/10.1155/2013/157947> (accepted 30 July 2013).

Статью представил доктор техн. наук, проф. Б.А. Худаяров, зав. кафедры "Высшая математика", Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства.

Поступила (received) 20.10.2018

Abdullayev Akmaljon Abdujalilovich,
Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers
Higher mathematics,
Str. Kari Niyazi, 39, Tashkent, Uzbekistan, 100000,
Tel: +99893 397-12-39, e-mail: akmal09.07.85@mail.ru
ORCID ID: 0000-0002-4542-1226

Safarbayeva Nigora Mustafayevna
Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers
Higher mathematics,
Str. Kari Niyazi, 39, Tashkent, Uzbekistan, 100000,
Tel: +99893 584-12-59, e-mail: n.safarbayev@tiame.uz
ORCID ID: 0000-0002-4542-1227

УДК 517.956.6

Про одну крайову задачу для рівняння змішаного типу другого роду / Абдуллаєв А.А., Сафарбаєва Н.М. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2018. – № 42 (1318). – С. 5 – 11.

Стационарні процеси різної фізичної природи (коливання, теплопровідність, дифузія, електростатика і т.д.) описуються рівняннями еліптичного типу. Зокрема, у деяких моделях, таких, як гідро і газової динаміки розглядаються еліптичні рівняння. У даній роботі вивчається нелокальна крайова задача з умовою Пуанкаре для рівняння еліптико-гіперболічного типу другого роду, тобто для рівняння, де лінія виродження є характеристикою. Бібліогр.: 8 назв.

Ключові слова: нелокальна крайова задача; умови Пуанкаре; рівняння еліптико-гіперболічного типу другого роду.

УДК 517.956.6

Об одной краевой задаче для уравнения смешанного типа второго рода / Абдуллаев А.А., Сафарбаева Н.М. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2018. – № 42 (1318). – С. 5 – 11.

Стационарные процессы различной физической природы (колебания, теплопроводность, диффузия, электростатика и т.д.) описываются уравнениями эллиптического типа. В частности, некоторых моделях, таких, как гидро и газовой динамики рассматриваются эллиптические уравнения. В данной работе изучается нелокальная краевая задача с условием Пуанкаре для уравнения эллиптико-гиперболического типа второго рода, т.е. для уравнения, где линия вырождения является характеристикой. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: нелокальная краевая задача; условия Пуанкаре; уравнения эллиптико-гиперболического типа второго рода.

UDC 517.956.6

On a boundary value problem for a mixed type equation of the second kind / Abdullaev AA, Safarbaeva N.M. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2018. – №.42 (1318). – P. 5 – 11.

Stationary processes of different physical nature (oscillations, thermal conductivity, diffusion, electrostatics, etc.) are described by equations of elliptic type. In particular, some models, such as hydro and gas dynamics, consider elliptic equations. In this paper, we study a nonlocal boundary value problem with the Poincaré condition for an equation of the elliptic-hyperbolic type of the second kind, i.e. for an equation where the line of degeneration is a characteristic. Refs.: 8 titles.

Keywords: nonlocal boundary value problem; Poincaré conditions; equations of elliptic-hyperbolic type equations of the second kind.

УДК 004.93

DOI: 10.20998/2411-0558.2018.42.06

А. А. ДАШКЕВИЧ, канд. техн. наук, доц., докторант, НТУ "ХПИ"

СНИЖЕНИЕ РАЗМЕРНОСТИ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ РАЗБИЕНИЯ ПРОСТРАНСТВА НА РЕГУЛЯРНУЮ СЕТКУ

Предлагается подход к решению задачи классификации точечных множеств на основе снижения размерности данных и разбиения пространства на регулярную сетку. Вводится понятие гиперкуба как способ представления точечных множеств. Предложен подход к снижению размерности на основе сигнатуры точечного множества. Разработанный метод даёт возможность исключить из дальнейшей классификации множество координатных осей при повышении точности классификации и уменьшении количества необходимых вычислений. Проведённые эксперименты показали работоспособность подхода на данных больших размерностей. Преимуществом подхода является быстрое определение избыточных координатных осей для произвольного набора исходных классов. Ил.: 1. Библиогр.: 17 назв.

Ключевые слова: гиперкуб; регулярная сетка; сигнатура; точечное множество; данные больших размерностей; классификация.

Постановка проблемы. В настоящее время сбор и автоматизированная обработка информации являются одними из наиболее значимых практических задач. При этом обрабатываемая информация представляет собой большие массивы многомерных данных разных типов. Существует большое количество подходов к классификации многомерных данных, среди которых можно выделить метод k ближайших соседей [1], машины опорных векторов [2], деревья решающих правил [3], нейронные сети [4] и др. Одними из самых простых в реализации являются алгоритмы, основанные на поиске ближайших соседей. Однако рост размерности данных приводит к росту вычислительной сложности алгоритмов такого типа, так как увеличивается время на вычисления расстояний между объектами. Также в пространствах больших размерностей ($d > 20$) существует проблема, заключающаяся в том, что значения расстояний между точками множества оказываются сосредоточены в пределах узкого диапазона значений [5], что приводит к неэффективности классификаторов такого типа.

Анализ последних исследований. В работах по классификации методом поиска ближайших соседей можно выделить подходы, основанные на разбиении пространства параметров на регулярные и нерегулярные сетки [6]. Так, в работе [7] предлагается подход к классификации данных на основе адаптивных разреженных сеток и его преимущества перед регулярными сетками, а в работе [8] показана

© А.А. Дашкевич, 2018

взаимосвязь решающих правил классификатора и точек в многомерном пространстве. В работе [9] предлагаются методы классификации на основе разбиения на сетки для задач управления транспортными средствами. В работе [10] используются пространственные характеристики данных для прогнозирования преступлений. В работе [11] сеточное представление графов применяется для классификации изображений. В работе [12] предложен алгоритм пространственного хеширования на основе разбиения многомерных пространств на сетки для поиска ближайших соседей. Существующие работы, посвящённые классификации многомерных данных, в качестве решения проблемы компактного распределения точек предлагают снижение размерности исходных данных на основе сингулярного разложения матриц, метода главных компонент или факторного анализа [13-17]. К недостатку таких алгоритмов следует отнести дополнительные затраты времени вычислений на геометрические преобразования данных без учёта геометрических характеристик исходных множеств и нацеленность на дальнейшую визуализацию данных, а не точность классификации.

Цели работы. Разработка метода снижения размерности и алгоритма классификации точечных множеств на основе разбиения пространства на регулярную сетку.

Основная часть. Для решения проблемы близкого расположения точек в многомерных множествах предлагается вычисление меры заполненности пространства точками путём разбиения его на регулярную сетку на основе алгоритма пространственного хеширования [12]. При этом пространство вдоль каждой из координатных осей разбивается на T (разрешение сетки) участков.

Таким образом, точечное множество может быть представлено в виде гиперкуба C_d^T – d -мерный гиперкуб с размерностью $T_1 \times T_2 \times \dots \times T_d$ на основе пространственных хешей H_d^T , в заполненных ячейках которого находится количество точек множества в этой ячейке, а в пустых – 0.

Гиперкубы на основе пространственных хешей позволяют приводить различные точечные множества одной размерности к регулярному представлению константного размера, что дает возможность сформулировать следующую характеристику пространственного распределения точечных множеств:

Сигнатура точечного множества S – пространственный хеш, содержащий для каждой координатной оси i заданного точечного множества с n точками номер наиболее заполненной ячейки гиперкуба C_d^T вдоль этой оси:

$$S = \{\max(H_i^j) \mid i = 1, \dots, d, j = 1, \dots, n\}.$$

Так как сигнатура позволяет выявить наиболее характерные ячейки для точечных множеств, то это даёт возможность сформулировать следующую гипотезу:

гипотеза 1 для заданных точечных множеств P_1 и P_2 разрешения сетки T и множества координатных осей A , т.е. координатные оси гиперкуба $a_i \in A$, у которых совпадают значения в сигнатуре, могут быть исключены из дальнейшего рассмотрения при одновременном повышении точности классификации. Множество исключённых осей $A^{\setminus}$:

$$A^{\setminus} = \{a_i \mid S_i(P_1) = S_i(P_2), i = 1, \dots, d\}.$$

На основе данного условия может быть построен алгоритм снижения размерности:

- 1) обучающее множество точек разбивается на гиперкуб соответствующей размерности C_d^T ;
- 2) для каждого заданного j -го класса вычисляется сигнатура S_j ;
- 3) в соответствии с условием 1 определяется множество избыточных координатных осей $A^{\setminus}$ и дальнейшая классификация исходных точечных множеств проводится только с учётом редуцированного множества координатных осей:

$$A^R = A \setminus A^{\setminus}.$$

Алгоритм классификации:

- 1) для каждой новой точки p_j , не входящей в обучающую выборку, вычисляется пространственный хеш H_j и расстояние между полученным хешем и сигнатурой каждого из i -го классов:

$$dist_i = m(H_j, S_i),$$

где m — некоторая метрика, в качестве которой может выступать Евклидово расстояние, расстояние городских кварталов (Манхеттенская метрика) и др.;

- 2) минимальное расстояние определяет принадлежность точки к одному из классов.

Работа предложенного алгоритма тестировалась путём снижения размерности и дальнейшей бинарной классификации многомерных точечных множеств двух классов на основе набора данных MNIST – 784-мерный, изображения рукописных цифр размерности (28×28) в оттенках серого цвета 10 классов. Разрешение сетки $T=10$. В качестве метрики была использована метрика городских кварталов. Также проводилось исследование точности классификации с использованием Евклидова расстояния, однако полученная точность при этом сравнима с манхеттенской метрикой при более высокой вычислительной сложности.

Примеры полученных сигнатур множеств для MNIST представлены на рис. 1, для наглядности отображения сигнатуры приведены к размерностям исходных данных, также на рис. 1 показано редуцированное множество координатных осей.

В результате проведённых экспериментов были определены редуцированные множества координатных осей для указанных наборов, при этом размерность данных для набора MNIST была снижена с 784 до 90. При этом ошибка классификации по приведённому алгоритму снизилась с ~ 0.45 до ~ 0.01 .

Выводы и перспективы дальнейших исследований. В результате работы разработан метод определения избыточных координатных осей для снижения размерности данных и повышения точности классификации.

Предложенный метод позволяет быстро определять координатные оси, которые имеют ключевое значение для характеристики входных данных. К недостаткам подхода можно отнести небольшой коэффициент снижения размерности, что не позволяет применять его для визуализации данных больших размерностей.

Дальнейшие исследования будут направлены на повышение точности классификации и коэффициента снижения размерности.

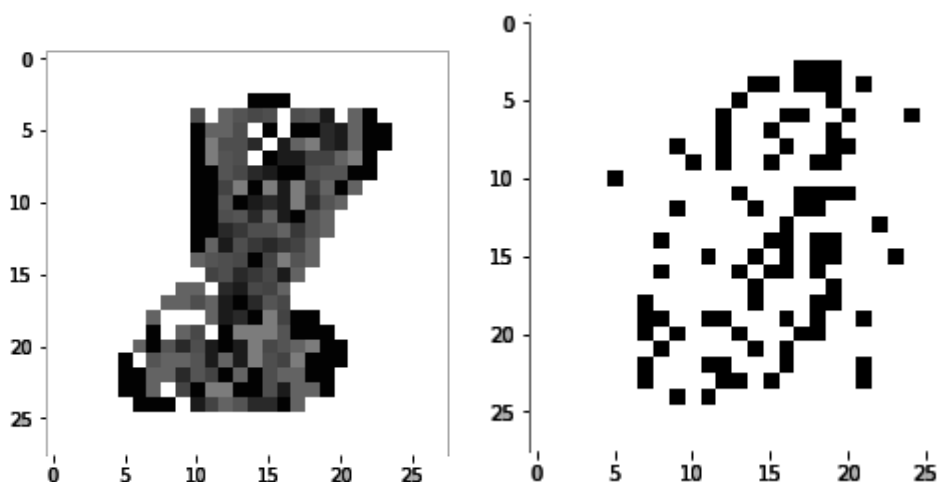


Рис. 1. Слева – пример сигнатуры для класса "Цифра 1", справа – редуцированное множество осей

Список литературы:

1. Wang L. An Effective Evidence Theory Based K-Nearest Neighbor (KNN) Classification / L. Wang, L. Khan, B. Thuraisingham // In: 2008 IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology. Presented at the 2008

-
- IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology, IEEE, Sydney, Australia, 2008. – P. 797-801.
2. *Wenzel F.* Bayesian Nonlinear Support Vector Machines for Big Data / *F. Wenzel, T. Galy-Fajou, M. Deutsch, M. Kloft* // In: Ceci M., Hollmén J., Todorovski L., Vens C., Džeroski S. (eds) Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases. ECML PKDD 2017. Lecture Notes in Computer Science, vol 10534. Springer, Cham, 2017. – P. 307-322.
3. *Painsky A.* Cross-Validated Variable Selection in Tree-Based Methods Improves Predictive Performance / *A. Painsky, S. Rosset* // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2017. – Vol. 39 (11). – P. 2142-2153.
4. *Najibi M.* G-CNN: An Iterative Grid Based Object Detector / *M. Najibi, M. Rastegari, L.S. Davis* // In: 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), IEEE, Las Vegas, NV, USA, 2016. – P. 2369-2377.
5. *Beyer K.* When Is "Nearest Neighbor" Meaningful? / *K. Beyer, J. Goldstein, R. Ramakrishnan, and U. Shaft* // International Conference on Database Theory: Springer, 1999. – P. 217-235.
6. *Garcke J.* Classification with sparse grids using simplicial basis functions / *J. Garcke, M. Griebel* // Intelligent Data Analysis, 2002. – Vol. 6. – № 6. – P. 483-502.
7. *Pflüger D.* Adaptive Sparse Grid Classification Using Grid Environments / *D. Pflüger, I.L. Muntean, H.-J. Bungartz* // In: Shi, Y., van Albada, G.D., Dongarra, J., Sloot, P.M.A. (Eds.), Computational Science – ICCS 2007. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2007. – P. 708-715.
8. *Gupta P.* Algorithms for packet classification / *P. Gupta, N. McKeown* // IEEE Network, 2001. – Vol. 15. – P. 24-32.
9. *Rieken J.* Benefits of Using Explicit Ground-Plane Information for Grid-based Urban Environment Modeling / *J. Rieken, R. Matthaei, M. Maurer* // 18th International Conference on Information Fusion (Fusion), Washington, DC, 2015. – P. 2049-2056.
10. *Lin Y.-L.* Grid-Based Crime Prediction Using Geographical Features / *Y.-L. Lin, M.-F. Yen, L.-C. Yu* // ISPRS International Journal of Geo-Information. – 2018. – № 7 (8). – P. 298.
11. *Deville R.* GriMa: A Grid Mining Algorithm for Bag-of-Grid-Based Classification / *R. Deville, E. Fromont, B. Jeudy, C. Solnon* // In: Robles-Kelly, A., Loog, M., Biggio, B., Escolano, F., Wilson, R. (Eds.), Structural, Syntactic, and Statistical Pattern Recognition. Springer International Publishing, Cham., 2016. – P. 132-142.
12. *Дашкевич А.А.* Алгоритм пространственного хеширования для решения задач приблизительного поиска ближайших соседей / *А.А. Дашкевич* // Науковий вісник ТДАТУ. – Вип. 8. – Т. 1. – Мелітополь, 2018. – С. 79-86.
13. *Cunningham J.P.* Linear Dimensionality Reduction: Survey, Insights, and Generalizations / *J.P. Cunningham, Z. Ghahramani* // Journal of Machine Learning Research, 2015. – Vol. 16. – P. 2859-2900.
14. *Herr D.* Visual Clutter Reduction Through Hierarchy-based Projection of High-dimensional Labeled Data / *D. Herr, Q. Han, S. Lohmann, T. Ertl* // Proceedings of the 42Nd Graphics Interface Conference, 2016. – P. 109-116.
15. *Feldman D.* Dimensionality Reduction of Massive Sparse Datasets Using Coresets / *D. Feldman, M. Volkov, D. Rus* // Advances in Neural Information Processing Systems, 2016. – Vol. 29. – P. 2766-2774.
16. *Carreira-Perpiñán M.Á.* The elastic embedding algorithm for dimensionality reduction / *M.Á. Carreira-Perpiñán* // In Proceedings of the 27th International Conference on International Conference on Machine Learning, Johannes Fürnkranz and Thorsten Joachims (Eds.). Omnipress, USA, 2010. – P. 167-174.

17. Niu D. Dimensionality Reduction for Spectral Clustering / D. Niu, J.G. Dy, M.I. Jordan // Proceedings of the Fourteenth International Conference on Artificial Intelligence and Statistics, PMLR, 2011. – Vol. 15. – P. 552-560.

References:

1. Wang, L., Khan, L. and Thuraisingham, B. (2008), "An Effective Evidence Theory Based K-Nearest Neighbor (KNN) Classification". In: *2008 IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology*. Presented at the 2008 IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology, IEEE, Sydney, Australia, pp. 797-801.
2. Wenzel, F., Galy-Fajou, T., Deutsch, M. and Kloft, M. (2017), "Bayesian Nonlinear Support Vector Machines for Big Data". In: *Ceci M., Hollmén J., Todorovski L., Vens C., Džeroski S. (eds) Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases. ECML PKDD 2017. Lecture Notes in Computer Science*, Vol 10534. Springer, Cham. – pp. 307-322.
3. Painsky, A., and Rosset, S. (2017), "Cross-Validated Variable Selection in Tree-Based Methods Improves Predictive Performance", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 39 (11). – pp. 2142–2153.
4. Najibi, M., Rastegari, M., and Davis, L.S. (2016), "G-CNN: An Iterative Grid Based Object Detector". In: *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, IEEE, Las Vegas, NV, USA. – pp. 2369-2377.
5. Beyer K., Goldstein, J., Ramakrishnan, R. and Shaft, U. (1999), "When Is "Nearest Neighbor" Meaningful?", In *International Conference on Database Theory*: Springer. – pp. 217-235.
6. Garcke, J. and Griebel, M. (2002), "Classification with sparse grids using simplicial basis functions". *Intelligent Data Analysis*, Vol. 6, No. 6, pp. 483-502.
7. Pflüger, D., Muntean, I.L. and Bungartz, H.-J. (2007), "Adaptive Sparse Grid Classification Using Grid Environments". In: Shi, Y., van Albada, G.D., Dongarra, J., Sloot, P.M.A. (Eds.), *Computational Science – ICCS 2007*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. – pp. 708-715.
8. Gupta, P. and McKeown, N. (2001), "Algorithms for packet classification". *IEEE Network*, Vol. 15, pp. 24-32.
9. Rieken, J., Matthaui, R., and Maurer, M. (2015), "Benefits of Using Explicit Ground-Plane Information for Grid-based Urban Environment Modeling". *18th International Conference on Information Fusion (Fusion)*, Washington, DC, pp. 2049-2056.
10. Lin, Y.-L., Yen, M.-F. and Yu, L.-C. (2018), "Grid-Based Crime Prediction Using Geographical Features". *ISPRS International Journal of Geo-Information*, No. 7 (8), p. 298.
11. Deville, R., Fromont, E., Jeudy, B., and Solnon, C. (2016), "GriMa: A Grid Mining Algorithm for Bag-of-Grid-Based Classification". In: Robles-Kelly, A., Loog, M., Biggio, B., Escolano, F., Wilson, R. (Eds.), *Structural, Syntactic, and Statistical Pattern Recognition. Springer International Publishing*, Cham, pp. 132-142.
12. Dashkevich, A. (2018), "Spatial hashing algorithm for approximate nearest neighbors search". *Scientific bulletin of the Tavria agrotechnological state university*, Is. 8, Vol. 1, pp. 79-86.
13. Cunningham, J. P. and Ghahramani, Z. (2015), "Linear Dimensionality Reduction: Survey, Insights, and Generalizations". *Journal of Machine Learning Research*, Vol. 16, pp. 2859-2900.
14. Herr, D., Han, Q., Lohmann, S., and Ertl, T. (2016), "Visual Clutter Reduction Through Hierarchy-based Projection of High-dimensional Labeled Data". *Proceedings of the 42Nd Graphics Interface Conference*, pp. 109-116.
15. Feldman, D., Volkov, M., and Rus, D. (2016), "Dimensionality Reduction of Massive Sparse Datasets Using Coresets". *Advances in Neural Information Processing Systems*, Vol. 29, pp. 2766-2774.
16. Carreira-Perpiñán, M.Á. (2010), "The elastic embedding algorithm for dimensionality reduction". In *Proceedings of the 27th International Conference on International Conference on Machine Learning*, Johannes Fürnkranz and Thorsten Joachims (Eds.). Omnipress, USA, pp. 167-174.
17. Niu, D., Dy, J.G. and Jordan, M.I. (2011), "Dimensionality Reduction for Spectral Clustering". *Proceedings of the Fourteenth International Conference on Artificial Intelligence and Statistics*, PMLR, Vol. 15, pp. 552-560.

*Статью представил д-р. техн. наук, проф. Национального
технического университета "Харьковский политехнический институт"
А.Ю. Ницын,*

Поступила (received) 07.12.2018

Dashkevich Andrey, Cand. Tech, Sci.
National Technical University "KhPI",
Str. Kyrpychova, 2, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel.: +38 (095) 388-04-56, e-mail: dashkewich.a@gmail.com
ORCIDID:0000-0002-9963-0998

УДК 004.93

Зниження розмірності даних на основі розбиття простору на регулярну сітку / Дашкевич А.О. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2018. – № 42 (1318). – С. 12 – 19.

Запропоновано підхід до розв'язання задачі класифікації точкових множин на основі зниження розмірності даних і розбиття простору на регулярну сітку. Вводиться поняття гіперкубу як способу представлення точкових множин. Запропоновано підхід до зниження розмірності на основі сигнатурі точкової множини. Метод, що розроблено дозволяє виключити з подальшої класифікації множину координатних осей при підвищенні точності класифікації і зменшенні кількості необхідних обчислень. Проведені експерименти показали придатність підходу на даних великих розмірностей. Перевагою підходу є швидке визначення надлишкових координатних осей для довільного набору вихідних класів. Ил.: 1. Бібліогр.: 17 назв.

Ключові слова: гіперкуб; регулярна сітка; сигнатура; точкова множина; дані великих розмірностей; класифікація.

УДК 004.93

Снижение размерности данных на основе разбиения пространства на регулярную сетку / Дашкевич А.А. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2018. – № 42 (1318). – С. 12 – 19.

Предлагается подход к решению задачи классификации точечных множеств на основе снижения размерности данных и разбиения пространства на регулярную сетку. Вводится понятие гиперкуба как способ представления точечных множеств. Предложен подход к снижению размерности на основе сигнатуры точечного множества. Разработанный метод даёт возможность исключить из дальнейшей классификации множество координатных осей при повышении точности классификации и уменьшении количества необходимых вычислений. Проведённые эксперименты показали работоспособность подхода на данных больших размерностей. Преимуществом подхода является быстрое определение избыточных координатных осей для произвольного набора исходных классов. Ил.: 1. Библиогр.: 17 назв.

Ключевые слова: гиперкуб; регулярная сетка; сигнатура; точечное множество; данные больших размерностей; классификация.

UDC 004.93

Dimensionality reduction of data based on splitting space into regular grid / Dashkevich A. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2018. – № 42 (1318). – P. 12 – 19.

The approach to classification of point sets based on dimensionality reduction and splitting space into regular grid is proposed. In paper we introduce concept of hypercube as the representation of point sets. The approach to reduce dimensionality based on point set signature as characteristic of spatial distribution of the set is proposed. The method described provides to exclude set of coordinate axis from classification with the increasing of classification precision and decreasing of computational cost. The experiments done show efficiency of our approach for multi-dimensional data. The advantage of proposed approach is fast determination of redundant coordinate axis for arbitrary set of input classes. Figs.: 1. Refs.: 17 titles.

Keywords: hypercube; regular grid; signature; point set; multi-dimensional data; classification.

В. Д. ДМИТРИЕНКО, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ",
А. Ю. ЗАКОВОРOTНЫЙ, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ",
Н. В. МЕЗЕНЦЕВ, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ",
Д. М. ГЛАВЧЕВ, асп., НТУ "ХПИ"

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ПОИСКА ФУНКЦИЙ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ К ЭКВИВАЛЕНТНЫМ ЛИНЕЙНЫМ В ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ УПРАВЛЕНИЯ

Один из факторов, мешающих расширению области применения геометрической теории управления, это необходимость для определения функций преобразования, связывающих переменные линейных и нелинейных моделей, решать систему дифференциальных уравнений в частных производных при ограничениях в виде дифференциальных неравенств. Решение этой системы уравнений в общем случае не является тривиальной задачей. В статье исследуется влияние вида правых частей системы обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих нелинейный объект, на сложность определения функций преобразования. Библиогр.: 11 назв.

Ключевые слова: геометрическая теория управления; функции преобразования; система дифференциальных уравнений в частных производных.

Постановка проблемы и анализ литературы. Геометрическая теория управления (ГТУ) [1 – 8], являясь перспективным методом теории автоматического управления (ТАУ), имеет всё же узкую область применения. Более широкому применению ГТУ мешают сложные аналитические вычисления при определении производных и скобок Ли, инволютивности распределений, функций преобразования, устанавливающих связи между переменными линейных моделей в форме Бруновского с переменными в исходных нелинейных моделях объектов управления. Практически все эти преобразования удалось автоматизировать с помощью разработанного программного обеспечения [7, 9, 10], что расширило область применения ГТУ с объектов, описываемых несколькими нелинейными обыкновенными дифференциальными уравнениями, на объекты, которые описываются системами, содержащими десятки уравнений [7]. Второй фактор, мешающий расширить области применения ГТУ – это необходимость для определения функций преобразования, связывающих переменные линейных и нелинейных моделей, решать систему дифференциальных уравнений в частных производных при ограничении в виде дифференциальных неравенств [7]. Решение этой системы уравнений в

общем случае не является тривиальной задачей. При этом, сложность её решения существенно зависит от сложности правых частей обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих исходный нелинейный объект управления. В связи с этим авторы, использующие ГТУ, стремятся описать исходный объект таким образом, чтобы правые части дифференциальных уравнений содержали минимальное число одночленов. Например, в монографии [3] описывается линеаризация электропривода, где исходная модель объекта управления, описываемая пятью нелинейными обыкновенными дифференциальными уравнениями, содержащими в своих правых частях 15 одночленов, преобразуется к эквивалентной модели, содержащей в правых частях дифференциальных уравнений 8 одночленов (в каждом уравнении в правой части – один или два одночлена), и только затем модель преобразуется к линейной форме Бруновского. Отсюда можно сделать вывод о том, что уменьшение числа одночленов в правых частях дифференциальных уравнений весьма существенно для дальнейшего поиска функций преобразований.

В связи с этим актуально исследование метода получения решений системы дифференциальных уравнений в частных производных при ограничениях в виде дифференциальных неравенств при различной сложности правых частей системы обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих нелинейные объекты.

Целью статьи является исследование применяемого метода решения системы дифференциальных уравнений в частных производных при ограничениях в виде дифференциальных неравенств с целью установления области его эффективного применения и поиска новых методов решения указанной системы уравнений при возрастании сложности моделей исходных нелинейных объектов.

В работе [10] рассматривается метод поиска функций преобразования для объекта, описываемого следующей системой обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}\frac{dx_1}{dt} &= a_{11}x_2 = g_1; \\ \frac{dx_2}{dt} &= a_{21}x_3x_5 + a_{22} + a_{23}x_2 + a_{24}x_2^2 + a_{25}x_1 + a_{26}x_1^2 + a_{27}x_1^3 = g_2; \\ \frac{dx_3}{dt} &= a_{31}x_3 + a_{32}x_4 = g_3;\end{aligned}\tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{dx_4}{dt} &= a_{41}x_4 + a_{42}x_3 + v_1 = g_4 + v_1; \\
 \frac{dx_5}{dt} &= a_{51}x_2 + a_{52} \frac{x_6}{x_3} = g_5; \\
 \frac{dx_6}{dt} &= a_{61}x_6 + a_{62}x_2x_3 + x_7 = g_6; \\
 \frac{dx_7}{dt} &= g_7 + v_2.
 \end{aligned} \tag{1}$$

С системой уравнений (1) связаны следующие векторные поля:

$$X(x) = \begin{pmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \\ g_4 \\ g_5 \\ g_6 \\ g_7 = 0 \end{pmatrix}, \quad Y_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad Y_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \tag{2}$$

где $x = (x_1, x_2, \dots, x_7)$.

Проверка инволютивности распределений $M^0 = \text{span}(Y_1, Y_2)$, $M^1 = \text{span}\{Y_1, Y_2, L_X Y_1, L_X Y_2\}$, $M_{Y_1}^2 = \text{span}\{Y_1, L_X Y_1, L_X^2 Y_1\}$, $M_{Y_2}^2 = \text{span}\{Y_2, L_X Y_2, L_X^2 Y_2\}$, $M_{Y_1}^3$, $M_{Y_2}^3$ показала, что система уравнений (1) может быть преобразована к форме Бруновского:

$$\begin{aligned}
 \frac{dz_i}{dt} &= z_{i+1}, \quad i = 1, 2, 3, 5, 6; \\
 \frac{dz_4}{dt} &= u_1, \quad \frac{dz_7}{dt} = u_2.
 \end{aligned} \tag{3}$$

где $\text{span}(Y_1, Y_2)$ – линейная оболочка векторов Y_1 и Y_2 ; $L_X Y_1$, $L_X Y_2$ – производные Ли соответствующих векторов вдоль векторного поля X ; $L_X^2 Y_1$, $L_X^2 Y_2$ – производные Ли второго порядка соответственно векторов Y_1, Y_2 вдоль векторного поля X .

Усложним правые части четвертого и шестого дифференциальных уравнений объекта (1). В результате получим следующую систему нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}
 \frac{dx_1}{dt} &= g_1; \\
 \frac{dx_2}{dt} &= g_2; \\
 \frac{dx_3}{dt} &= g_3; \\
 \frac{dx_4}{dt} &= g_4 + a_{43}x_2x_6 + u_1; \\
 \frac{dx_5}{dt} &= g_5; \\
 \frac{dx_6}{dt} &= g_6 + a_{63}x_2x_4; \\
 \frac{dx_7}{dt} &= g_7 + u_2.
 \end{aligned} \tag{4}$$

С системой уравнений (4) связаны следующие векторные поля:

$$X^* = \begin{pmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \\ g_4 + a_{43}x_2x_6 \\ g_5 \\ g_6 + a_{63}x_2x_4 \\ g_7 = 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \\ g_4^* \\ g_5 \\ g_6^* \\ g_7 \end{pmatrix}, \quad Y_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad Y_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix},$$

где $g_4^* = g_4 + a_{43}x_2x_6$; $g_6^* = g_6 + a_{63}x_2x_4$.

Проверка инволютивности распределений M^0 , M^1 , M^2 , M^3 для объекта (4) усложняется в связи с получением более сложных производных Ли второго и третьего порядка.

Форма Бруновского для объекта (4) имеет вид (3), то есть, совпадает с формой Бруновского для объекта (1).

Для системы уравнений (3) существуют преобразования $z_1 = T_1(x) = T_1(x_1, x_2, \dots, x_7)$ и $z_5 = T_2(x) = T_2(x_1, x_2, \dots, x_7)$, с помощью которых, выполняя дифференцирование функций $T_k(x)$, $k=1,2$ вдоль векторного поля $X_1 = X^* + u_1Y_1 + u_2Y_2$, можно определить z_p , $p = \overline{2, 7}$:

$$\frac{dz_1}{dt} = z_2 = L_{X_1} T_1(x) = L_{X^*} T_1(x) + u_1 L_{Y_1} T_1(x) + u_2 L_{Y_2} T_1(x); \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{dz_2}{dt} = z_3 = L_{X_1} (L_{X^*} T_1(x)) &= L_{X^*}^2 (T_1(x)) + u_1 L_{Y_1} (L_{X^*} T_1(x)) + \\ &+ u_2 L_{Y_2} (L_{X^*} T_1(x)); \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{dz_3}{dt} = z_4 = L_{X_1} (L_{X^*}^2 T_1(x)) &= L_{X^*}^3 (T_1(x)) + u_1 L_{Y_1} (L_{X^*}^2 T_1(x)) + \\ &+ u_2 L_{Y_2} (L_{X^*}^2 T_1(x)); \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{dz_4}{dt} = u_1 = L_{X_1} (L_{X^*}^3 T_1(x)) &= L_{X^*}^4 (T_1(x)) + u_1 L_{Y_1} (L_{X^*}^3 T_1(x)) + \\ &+ u_2 L_{Y_2} (L_{X^*}^3 T_1(x)); \end{aligned} \quad (8)$$

$$\frac{dz_5}{dt} = z_6 = L_{X_1} T_2(x) = L_{X^*} T_2(x) + u_1 L_{Y_1} T_2(x) + u_2 L_{Y_2} T_2(x); \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{dz_6}{dt} = z_7 = L_{X_1} (L_{X^*} T_2(x)) &= L_{X^*}^2 (T_2(x)) + u_1 L_{Y_1} (L_{X^*} T_2(x)) + \\ &+ u_2 L_{Y_2} (L_{X^*} T_2(x)); \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{dz_7}{dt} = u_2 = L_{X_1} (L_{X^*}^2 T_2(x)) &= L_{X^*}^3 (T_2(x)) + u_1 L_{Y_1} (L_{X^*}^2 T_2(x)) + \\ &+ u_2 L_{Y_2} (L_{X^*}^2 T_2(x)), \end{aligned} \quad (11)$$

где $L_{X_1} T_k(x)$, $L_{X^*} T_k(x)$, $L_{Y_1} T_k(x)$, $L_{Y_2} T_k(x)$, $k = 1, 2$ – производные Ли функций $T_k(x)$ вдоль векторных полей X_1 , X^* , Y_1 , Y_2 ; L_G^m – кратные производные Ли вдоль векторного поля G ($G = X, Y_1, Y_2$), $m = 2, 3$.

Из системы уравнений в форме Бруновского (3) следует, что переменные z_1 , z_2 , z_3 , z_5 и z_6 не зависят от управлений u_1 и u_2 . Исходя из этого, следует что в выражениях (5) – (7), (9), (10) коэффициенты при управлениях u_1 и u_2 равны нулю:

$$\begin{aligned} L_{Y_1} T_1(x) = L_{Y_2} T_1(x) = L_{Y_1} (L_{X^*} T_1(x)) &= L_{Y_2} (L_{X^*} T_1(x)) = \\ &= L_{Y_1} (L_{X^*}^2 T_1(x)) = L_{Y_2} (L_{X^*}^2 T_1(x)) = 0; \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} L_{Y_1} T_2(x) &= L_{Y_2} T_2(x) = L_{Y_1} (L_X T_2(x)) = \\ &= L_{Y_2} (L_X T_2(x)) = 0. \end{aligned} \quad (13)$$

При этом, коэффициенты при управлениях u_1^* и u_2^* в уравнениях (8) и (11) не равны нулю:

$$L_{Y_1} (L_X^3 T_1(x)) = \left\langle \frac{\partial T_1}{\partial x}, L_X^3 Y_1 \right\rangle \neq 0; \quad (14)$$

$$L_{Y_2} (L_X^3 T_1(x)) = \left\langle \frac{\partial T_1}{\partial x}, L_X^3 Y_2 \right\rangle \neq 0;$$

$$L_{Y_1} (L_X^2 T_2(x)) = \left\langle \frac{\partial T_2}{\partial x}, L_X^2 Y_1 \right\rangle \neq 0; \quad (15)$$

$$L_{Y_2} (L_X^2 T_2(x)) = \left\langle \frac{\partial T_2}{\partial x}, L_X^2 Y_2 \right\rangle \neq 0.$$

Соотношения (12) – (15) в компактной форме описывают 10 дифференциальных уравнений в частных производных и четыре дифференциальных неравенства, с помощью которых можно определить функции преобразования $T_1(x)$ и $T_2(x)$. Эти функции в общем случае могут зависеть от семи компонент вектора $x = (x_1, x_2, \dots, x_7)$. Понятно, что эти функции для объектов (1) и (4) различны. Обозначим их соответственно для первого и второго объекта соответственно $T_1^1(x)$, $T_2^1(x)$, $T_1^2(x)$, $T_2^2(x)$. Определим вначале функцию $T_1^1(x)$ для объекта (1). Из первых двух дифференциальных уравнений имеем:

$$\begin{aligned} L_{Y_1} T_1^1(x) &= \left\langle \frac{\partial T_1^1(x)}{\partial x}, Y_1 \right\rangle = \sum_{i=1}^7 \frac{\partial T_1^1(x)}{\partial x_i} y_{1i} = \frac{\partial T_1^1(x)}{\partial x_1} \cdot 0 + \frac{\partial T_1^1(x)}{\partial x_2} \cdot 0 + \\ &+ \frac{\partial T_1^1(x)}{\partial x_3} \cdot 0 + \frac{\partial T_1^1(x)}{\partial x_4} \cdot 1 + \frac{\partial T_1^1(x)}{\partial x_5} \cdot 0 + \frac{\partial T_1^1(x)}{\partial x_6} \cdot 0 + \frac{\partial T_1^1(x)}{\partial x_7} \cdot 0 = 0; \end{aligned} \quad (16)$$

$$L_{Y_2} T_1^1(x) = \left\langle \frac{\partial T_1^1(x)}{\partial x}, Y_2 \right\rangle = \sum_{i=1}^6 \frac{\partial T_1^1(x)}{\partial x_i} \cdot 0 + \frac{\partial T_1^1(x)}{\partial x_7} \cdot 1 = 0. \quad (17)$$

Отсюда следует, что функция $T_1^1(x)$ не зависит от аргументов x_4 и x_7 . Для дальнейшего анализа функции $T_1^1(x)$ используем из соотношений (12) следующие четыре дифференциальных уравнения в

частных производных, в которых используются производные Ли первого и второго порядка:

$$L_{Y_1}(L_X T_1^1(x)) = \left\langle \frac{\partial T_1^1}{\partial x}, L_X Y_1 \right\rangle = 0; \quad (18)$$

$$L_{Y_2}(L_X T_1^1(x)) = \left\langle \frac{\partial T_1^1}{\partial x}, L_X Y_2 \right\rangle = 0; \quad (19)$$

$$L_{Y_1}(L_X^2 T_1^1(x)) = \left\langle \frac{\partial T_1^1}{\partial x}, L_X^2 Y_1 \right\rangle = 0; \quad (20)$$

$$L_{Y_2}(L_X^2 T_1^1(x)) = \left\langle \frac{\partial T_1^1}{\partial x}, L_X^2 Y_2 \right\rangle = 0, \quad (21)$$

где

$$L_X Y_1 = [X, Y_1] = \frac{\partial Y_1}{\partial x} X - \frac{\partial X}{\partial x} Y_1 = -\frac{\partial X}{\partial x} Y_1 =$$

$$= - \begin{vmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \frac{\partial g_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_7} \\ \frac{\partial g_2}{\partial x_1} & \frac{\partial g_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial g_2}{\partial x_7} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial g_7}{\partial x_1} & \frac{\partial g_7}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial g_7}{\partial x_7} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} =$$

$$= - \begin{vmatrix} 0 & a_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{25} + 2a_{26}x_1 + 3a_{27}x_1^2 & a_{23} + 2a_{24}x_2 & a_{21}x_5 & 0 & a_{21}x_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{31} & a_{32} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{42} & a_{41} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{51} & -a_{52} \frac{x_6}{x_3^2} & 0 & 0 & \frac{a_{52}}{x_3} & 0 \\ 0 & a_{62}x_3 & a_{62}x_2 & 0 & 0 & a_{61} & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} =$$

$$= |0 \quad 0 \quad -a_{32} \quad -a_{41} \quad 0 \quad 0 \quad 0|^T; \quad (22)$$

$$L_X Y_2 = [X, Y_2] = -\frac{\partial X}{\partial x} Y_2 = |0, 0, 0, 0, 0, -1, 0|^T; \quad (23)$$

$$L_X^2 Y_1 = [X, L_X Y_1] = -\frac{\partial X}{\partial x} L_X Y_1 = \\ = -\left|0, a_{21}x_5a_{32}, -(a_{31}a_{32} + a_{32}a_{41}), -(a_{32}a_{42} + a_{41}^2), (a_{32}a_{52}\frac{x_6}{x_3^2}), -(a_{32}a_{62}x_2), 0\right|^T; \quad (24)$$

$$L_X^2 Y_2 = [X, L_X Y_2] = \frac{\partial L_X Y_2}{\partial x} X - \frac{\partial X}{\partial x} L_X Y_2 = \\ = \left|0, 0, 0, 0, \frac{a_{52}}{x_3}, a_{61}, 0\right|^T. \quad (25)$$

Из соотношения (12) $L_{Y_1}(L_X T_1^1(x)) = 0$ имеем:

$$L_{Y_1}(L_X T_1^1(x)) = \left\langle \frac{\partial T_1^1}{\partial x}, L_X Y_1 \right\rangle = \left\langle \frac{\partial T_1^1}{\partial x}, |0 \ 0 \ -a_{32} \ -a_{42} \ 0 \ 0 \ 0|^T \right\rangle = \\ = \frac{\partial T_1^1(x)}{\partial x_3}(-a_{32}) + \frac{\partial T_1^1(x)}{\partial x_4}(-a_{41}) = 0.$$

Поскольку функция $T_1^1(x)$ не зависит от x_4 , то она не зависит и от x_3 .

Теперь используем из соотношений (12) и (19) равенство $L_{Y_2}(L_X T_1^1(x)) = 0$:

$$L_{Y_2}(L_X T_1^1(x)) = \left\langle \frac{\partial T_1^1}{\partial x}, L_X Y_2 \right\rangle = \left\langle \frac{\partial T_1^1}{\partial x}, |0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -1 \ 0|^T \right\rangle = \\ = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq 6}}^7 \frac{\partial T_1^1(x)}{\partial x_i} \cdot 0 + \frac{\partial T_1^1(x)}{\partial x_6}(-1) = 0.$$

Отсюда следует, что $T_1^1(x)$ не зависит и от x_6 (а также и от x_3, x_4, x_7). Далее, используем последние два соотношения (12). В первую очередь берём более простое:

$$\begin{aligned}
L_{Y_2}(L_X^2 T_1^1(x)) &= \left\langle \frac{\partial T_1^1(x)}{\partial x}, L_X^2 Y_2 \right\rangle = \\
&= \left\langle \frac{\partial T_1^1(x)}{\partial x}, \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{a_{52}}{x_3} & a_{61} & 0 \end{vmatrix} \right\rangle = \\
&= \frac{\partial T_1^1(x)}{\partial x_1} \cdot 0 + \frac{\partial T_1^1(x)}{\partial x_2} \cdot 0 + \frac{\partial T_1^1(x)}{\partial x_5} \cdot \frac{a_{52}}{x_3} = 0.
\end{aligned}$$

Отсюда следует, что $T_1^1(x)$ не зависит от x_5 . Рассмотрим следующее соотношение из (12):

$$L_{Y_1}(L_X^2 T_1^1(x)) = 0 = \left\langle \frac{\partial T_1^1(x)}{\partial x}, L_X^2 Y_1 \right\rangle.$$

Поскольку $T_1^1(x)$ может зависеть только от x_1 и x_2 , а первая компонента производной $L_X^2 Y_1$ нулевая, то $T_1^1(x)$ не зависит от x_2 , то есть $T_1^1(x^*) \equiv T_1^1(x_1)$. В качестве решения возьмём $T_1^1(x_1) = x_1$. Из этой функции, путём последовательного дифференцирования вдоль векторного поля X получим:

$$z_1 = T_1^1(x_1) = x_1;$$

$$z_2 = L_X T_1^1(x_1) = a_{11}x_2;$$

$$z_3 = L_X(L_X T_1^1(x_1)) = a_{11}(a_{27}x_1^3 + a_{26}x_1^2 + a_{25}x_1 + a_{24}x_2^2 + a_{23}x_2 + a_{22} + a_{21}x_3x_6);$$

$$\begin{aligned}
z_4 = L_X(L_X^2 T_1^1(x_1)) &= a_{11}^2 x_2 (3a_{27}x_1^2 + 2a_{26}x_1 + a_{25}) + a_{11}(a_{23} + 2a_{24}x_2)(a_{27}x_1^3 + \\
&+ a_{26}x_1^2 + a_{25}x_1 + a_{24}x_2^2 + a_{23}x_2 + a_{22} + a_{21}x_3x_6) + a_{11}a_{21}x_3(x_7 + a_{61}x_6 + \\
&+ a_{62}x_2x_3) + a_{11}a_{21}x_6(a_{31}x_3 + a_{32}x_4).
\end{aligned}$$

Непосредственная проверка неравенств (14) с помощью производных Ли $L_X^3 Y_1$ и $L_X^3 Y_2$ показывает, что неравенства выполняются. Таким образом, функция преобразования $T_1^1(x)$ определена. Аналогичным образом определяется и функция $T_2^1(x)$, а с её помощью – соотношения, связывающие переменные линейной модели в форме Бруновского z_5, z_6, z_7 с переменными исходного нелинейного объекта (1). Для проверки адекватности линейной модели было проведено моделирование различных процессов функционирования

объекта управления с помощью линейной и нелинейной моделей. Сопоставление результатов моделирования с помощью этих моделей показало их полное совпадение.

Теперь определим функцию преобразования $T_1^2(x)$ для объекта (4). Для второго объекта также можно записать уравнения вида (5) – (11), для определения функций преобразования $T_1^2(x)$, $T_2^2(x)$ связывающих переменные линейной и нелинейной моделей. Для второго объекта из уравнений вида (5) – (11) аналогично тому, как получены соотношения (12) и (13), (14) и (15) для определения функций преобразования $T_1^2(x)$, $T_2^2(x)$, несложно получить соотношения для определения функций преобразования $T_1^2(x)$ и $T_2^2(x)$:

$$\begin{aligned} L_{Y_1} T_1^2(x) &= L_{Y_2} T_1^2(x) = L_{Y_1} (L_{X^*} T_1^2(x)) = L_{Y_2} (L_{X^*} T_1^2(x)) = \\ &= L_{Y_1} (L_{X^*}^2 T_1^2(x)) = L_{Y_2} (L_{X^*}^2 T_1^2(x)) = 0; \end{aligned} \quad (26)$$

$$L_{Y_1} T_2^2(x) = L_{Y_2} T_2^2(x) = L_{Y_1} (L_{X^*} T_2^2(x)) = L_{Y_2} (L_{X^*} T_2^2(x)) = 0; \quad (27)$$

$$L_{Y_1} (L_{X^*}^3 T_1^2(x)) = \left\langle \frac{\partial T_1^2}{\partial x}, L_{X^*}^3 Y_1 \right\rangle \neq 0; \quad (28)$$

$$L_{Y_2} (L_{X^*}^3 T_1^2(x)) = \left\langle \frac{\partial T_1^2}{\partial x}, L_{X^*}^3 Y_2 \right\rangle \neq 0;$$

$$L_{Y_1} (L_{X^*}^2 T_2^2(x)) = \left\langle \frac{\partial T_2^2}{\partial x}, L_{X^*}^2 Y_1 \right\rangle \neq 0; \quad (29)$$

$$L_{Y_2} (L_{X^*}^2 T_2^2(x)) = \left\langle \frac{\partial T_2^2}{\partial x}, L_{X^*}^2 Y_2 \right\rangle \neq 0.$$

Соотношения (26) – (29) по аналогии с соотношения (12) – (15) содержат необходимые дифференциальные уравнения в частных производных для определения функций $T_1^2(x)$ и $T_2^2(x)$, которые, как и функции $T_1^1(x)$, $T_2^1(x)$, могут зависеть от семи аргументов $(x_1, x_2, \dots, x_7)$. Используя первые два уравнения из выражения (26)

$$L_{Y_1} T_1^2(x) = \left\langle \frac{\partial T_1^2}{\partial x}, Y_1 \right\rangle = 0;$$

$$L_{Y_2} T_1^2(x) = \left\langle \frac{\partial T_1^2}{\partial x}, Y_2 \right\rangle = 0,$$

по аналогии с соотношениями (16), (17) нетрудно установить, что функция $T_1^2(x)$ не зависит от аргументов x_4 и x_7 . Для дальнейшего уточнения функции $T_1^2(x)$ необходимо, как и при определении функции $T_1^1(x)$, знать производные Ли первого и второго порядка. Однако эти производные имеют в общем случае большее число ненулевых компонент. Например:

$$L_{X^*} Y_1 = [X^*, Y_1] = \frac{\partial Y_1}{\partial x} X^* - \frac{\partial X^*}{\partial x} Y_1 = \frac{\partial X^*}{\partial x} Y_1 =$$

$$= - \begin{vmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_2} & \frac{\partial g_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_7} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial g_4^*}{\partial x_1} & \frac{\partial g_4^*}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial g_4^*}{\partial x_7} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial g_6^*}{\partial x_1} & \frac{\partial g_6^*}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial g_6^*}{\partial x_2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial g_7}{\partial x_1} & \frac{\partial g_7}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial g_7}{\partial x_7} \\ \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \frac{\partial g_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_7} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} =$$

$$= - \begin{vmatrix} 0 & a_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{25} + 2a_{26}x_1 + 3a_{27}x_1^2 & a_{23} + 2a_{24}x_2 & a_{21}x_5 & 0 & a_{21}x_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{31} & a_{32} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{42} & a_{41} & 0 & a_{43}x_2 & 0 \\ 0 & a_{51} & -a_{52}\frac{x_6}{x_3^2} & 0 & 0 & \frac{a_{52}}{x_3} & 0 \\ 0 & a_{62}x_3 + a_{63}x_4 & a_{62}x_2 & a_{62}x_2 & 0 & a_{61} & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} =$$

$$= \begin{vmatrix} 0 & 0 & -a_{32} & -a_{41} & 0 & -a_{63}x_2 & 0 \end{vmatrix}^T; \quad (30)$$

Поэтому, если по аналогии с определением $T_1^1(x)$ использовать соотношение:

$$\begin{aligned}
L_{Y_1^*}(L_{X^*} T_1(x^*)) &= \left\langle \frac{\partial T_1}{\partial x}, L_{X^*} Y_1^* \right\rangle = \left\langle \frac{\partial T_1}{\partial x}, \begin{vmatrix} 0 & 0 & -a_{32} & -a_{42} & 0 & -a_{63}x_2 & 0 \end{vmatrix} \right\rangle = \\
&= \frac{\partial T_1(x)}{\partial x_3}(-a_{32}) + \frac{\partial T_1(x)}{\partial x_4}(-a_{41}) + \frac{\partial T_1(x)}{\partial x_6}(-a_{63}x_2) = 0,
\end{aligned}$$

то уже нельзя, как при определении $T_1^1(x)$, констатировать, что функция $T_1^2(x)$ не зависит от x_3 или x_6 .

Таким образом, функция $T_1^2(x)$ в общем случае является функцией нескольких переменных и её определение существенно усложняется, поскольку возникает перспектива численного решения системы уравнений в частных производных. Однако, опыт применения геометрической теории показывает, что функции преобразования обычно имеют простой вид, например:

$$T_1^2(x) = x_g \text{ или } T_1^2(x) = x_g + x_{g1} \text{ или } T_1^2(x) = \sum_{j=1}^k x_{gj},$$

где $x_g, x_{g1}, \dots, x_{gk} \in \{x_{q1}, x_{q2}, \dots, x_{ql}\}$, x_{qp} ($p = \overline{1, l}$) – переменные объекта управления, не исключенные на первом этапе определения функции преобразования.

Поэтому возможен автоматический перебор функций преобразования с помощью специальной нейронной сети [11].

Выводы: Сопоставление систем дифференциальных уравнений (1) и (4) показывает, что объект управления (4) отличается от объекта управления (1) только наличием двух дополнительных одночленов в четвертом и шестом дифференциальных уравнениях. Однако это существенно усложняет поиск функций преобразования, связывающих переменные системы линейных дифференциальных уравнений в форме Бруновского с переменными системы дифференциальных уравнений, описывающих исходный нелинейный объект с дополнительными одночленами.

Анализ рассматриваемых примеров показывает, что наиболее критично увеличение числа одночленов в уравнениях, в которые входят управления, поскольку даже один одночлен может увеличивать число ненулевых компонент в производных Ли первого и второго порядка и может приводить к численным методам решения системы уравнений в частных производных. Увеличение числа одночленов в уравнениях, в

которые управления не входят, в большинстве случаев, не усложняют поиск функций преобразования.

Если функцию преобразования не удастся получить как функцию одной переменной, тогда перспективным выглядит автоматический перебор функций преобразования с помощью специализированной нейронной сети.

Список литературы:

1. Bloch A.M. An Introduction to Aspects of Geometric Control Theory / A.M. Bloch // In: Krishnaprasad P., Murray R. (eds) Nonholonomic Mechanics and Control. Interdisciplinary Applied Mathematics, Vol 24. Springer, New York, NY. – P. 199-233.
2. Freitas, C.B.N. A Symbolic–Numerical Method for Integration of DAEs Based on Geometric Control Theory / C.B.N. Freitas, P.S.P. da Silva // Journal of Control, Automation and Electrical Systems. – 2014. – Vol. 25. – № 400. – São Paulo – SP – Brasil. <https://doi.org/10.1007/s40313-014-0115-9>.
3. Краснощёченко В.Н. Нелинейные системы: геометрический метод анализа и синтеза / В.И. Краснощёченко, А.П. Крищенко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2005. – 520 с.
4. Kim D.P. Automatic Control Nonlinear and Multivariable System / D.P. Kim. – Seal: Harnol, 2000. – 558 p.
5. Сачков Ю. Геометрическая теория управления / Ю. Сачков. – М.: СИНТЕГ, 2013. – 394 с.
6. Аграчев, А.А. Геометрическая теория управления / А.А. Аграчев. – М.: Физматлит, 2005. – 392 с.
7. Заковоротный А. Ю. Синтез автоматизированной системы управления подвижным составом на основе геометрической теории управления и нейронных сетей: дис. ... д-ра техн. наук: спец. 05.13.07 / А. Ю. Заковоротный; Нац. техн. ун-т "Харьков. политехн. ин-т". – Харьков, 2017. – 433 с.
8. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т. 2 Многомерные нелинейные, оптимальные и адаптивные системы: учебное пособие / Д.П. Ким. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 464 с.
9. Дмитриенко В.Д. Моделирование и оптимизация процессов управления движением дизель-поездов / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный. – Харьков: НТМТ, 2013. – 248 с.
10. Дмитриенко В.Д. Исследование возможностей программных компонент бортовой вычислительной системы при преобразовании нелинейных систем к эквивалентным линейным / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный, Н.В. Мезенцев, Д.М. Главчев // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 2018. – Вип. 24 (1300). – С.80-98.
11. Дмитриенко В.Д. Метод поиска функций преобразования, связывающих переменные нелинейных и линейных моделей в ГТУ / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный, Д.М. Главчев // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 2016. – Вип. 44 (1216). – С.14-30.

References:

1. Bloch, A.M. (2015), *An Introduction to Aspects of Geometric Control Theory*. In: Krishnaprasad P., Murray R. (eds) Nonholonomic Mechanics and Control. Interdisciplinary Applied Mathematics, vol 24. Springer, New York, NY, pp. 199-233.

2. Freitas, C.B.N. & da Silva, P.S.P. (2014), "A Symbolic–Numerical Method for Integration of DAEs Based on Geometric Control Theory". *Journal of Control, Automation and Electrical Systems* (2014) 25: 400, São Paulo - SP – Brasil. <https://doi.org/10.1007/s40313-014-0115-9>
3. Krasnoshechenko, V.N., and Krishenko, A.P. (2005), *Nonlinear systems: geometrical method of analysis and synthesis*, Bauman Moscow State Technical University (BMSTU), Moscow, 520 p.
4. Kim, D.P. (2000), *Automatic Control Nonlinear and Multivariable System*. – Seal: Harnol, 2000, 558 p.
5. Sachkov, Y. (2013), *Geometric control theory*. – SYNTEG, Moscow, 394 p.
6. Agrachev, A.A. (2005), *Geometric control theory*. – Fizmatlit, Moscow, 392 p.
7. Zakovorotny, A.Y. (2017), *Synthesis of an automated control system for rolling stock on the basis of geometric control theory and neural networks*: dis. ... Dr. techn. Sciences: spec. 05.13.07 / Alexander Yuryevich Zakovorotny; NTU "Kharkov Polytechnic Institute". – Kharkov. – 433 p.
8. Kim, D.P. (2004), *Theory of automatic control. T. 2 Multidimensional nonlinear, optimal and adaptive systems*, FYSMATLIT, Moscow, 464 p.
9. Dmitrienko, V.D., and Zakovorotny, A.Y. (2013), *Modelling and optimization of management processes of diesel trains*, HTMT, Kharkiv, 248 p.
10. Dmitrienko V.D., Zakovorotny, A.Y., Mezentsev N.V., Hlavchev D.M. (2018) "The investigation of the capabilities of the the onboard computing system software component when converting nonlinear systems to equivalent linear". *Bulletin of NTU "KPI"*. – Kharkiv: NTU "KhPI", Vol. 24 (1300), pp.80-98.
11. Dmitrienko V.D., Zakovorotny, A.Y., Hlavchev D.M. (2018) "The method of searching for transformation functions that connect the variables of nonlinear and linear models in GCT". *Bulletin of NTU "KPI"*. – Kharkiv: NTU "KhPI", Vol. 44 (1216), pp.14-30.

Статтю представив д.т.н., проф. Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" О.А. Серков

Надійшла (received) 11.10.2018

Dmitrienko Valerii, Dr. Tech. Sci., Professor
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Kirpicheva, 2, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel.: +38 (057) 707-61-98, e-mail: valdmitrienko@gmail.com
ORCID ID: 0000-0003-2523-595X

Zakovorotny Alexandr, Dr. Tech. Sci., Docent
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Kirpicheva, 2, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel.: +38 (097) 967-32-71, e-mail: arcade@i.ua
ORCID ID: 0000-0003-4415-838X

Mezentsev Nickolay, Cand. Tech. Sci., Docent
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Kirpicheva, 2, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel.: +38 (098) 859-88-98, e-mail: besitzer@i.ua
ORCID ID: 0000-0001-7834-2797

Dmytro Hlavchev, master

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

Str. Kirpicheva, 2, Kharkiv, Ukraine, 61002

Tel: +380993049807, e-mail: dmitriyglavchev@gmail.com

ORCID ID: 0000-0003-4248-4819

УДК 861.5.015.2

Дослідження методу пошуку функцій перетворення нелінійних систем до еквівалентних лінійних в геометричній теорії управління / Дмитрієнко В.Д., Заковоротний О.Ю., Мезенцев Н.В., Главчев Д.М. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2018. – № 42 (1318). – С. 20 – 35.

Один з факторів, що заважають розширенню сфери застосування геометричної теорії управління (ГТУ) – це необхідність, для визначення функцій перетворення, що зв'язують змінні лінійних і нелінійних моделей, вирішувати систему диференціальних рівнянь в часткових похідних при обмеженнях у вигляді диференціальних нерівностей. Вирішення цієї системи рівнянь в загальному випадку не є тривіальним завданням. У статті досліджується вплив виду правих частин системи звичайних диференціальних рівнянь, що описують нелінійний об'єкт, на складність визначення функцій перетворення. Бібліогр.: 11 назв.

Ключові слова: геометрична теорія управління; функції перетворення; система диференціальних рівнянь в часткових похідних.

УДК 861.5.015.2

Исследование метода поиска функций преобразования нелинейных систем к эквивалентным линейным в геометрической теории управления / Дмитриенко В.Д., Заковоротный А.Ю., Мезенцев Н.В., Главчев Д.М. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2018. – № 42 (1318). – С. 20 – 35.

Один из факторов, мешающих расширению области применения геометрической теории управления, это необходимость для определения функций преобразования, связывающих переменные линейных и нелинейных моделей, решать систему дифференциальных уравнений в частных производных при ограничениях в виде дифференциальных неравенств. Решение этой системы уравнений в общем случае не является тривиальной задачей. В статье исследуется влияние вида правых частей системы обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих нелинейный объект, на сложность определения функций преобразования. Библиогр.: 11 назв.

Ключевые слова: геометрическая теория управления; функции преобразования; система дифференциальных уравнений в частных производных.

UDK 861.5.015.2

Investigation of the search method for the transformation functions of nonlinear systems to equivalent linear ones in geometric control theory / Dmitrienko V.D., Zakovorotny A.Y., Mezentsev N.V., Hlavchev D.M. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2018. – №.42 (1318). – P. 20 – 35.

One of the factors that prevent the expansion of the field of application of the geometric control theory (GCT) is the need to solve the system of partial differential equations with constraints in the form of differential inequalities for determining the transformation functions and connection between the variables of linear and nonlinear models. The solution of this system of equations in the general case is not a trivial task. The article investigates, the influence of the type of the right-hand sides of a system of ordinary differential equations, that describing a nonlinear object on the complexity of determining the transformation functions. Refs.: 11 titles.

Keywords: geometric control theory; transformation functions; system of partial differential equations.

УДК 004.932:519.652

DOI: 10.20998/2411-0558.2018.42.11

В. В. МОРОЗ, канд. техн. наук, проф., ОНУ, Одеса,
А. В. КОНДРАТЮК, студентка, ОНУ, Одеса

ВАРІАЦІЙНІ МЕТОДИ ОЦІНКИ РУХУ В ЗАДАЧАХ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ

Розглянуто модель оптичного потоку для оцінки видимого руху. Наведено знаходження рівняння оптичного потоку шляхом розкладання у ряд Тейлора неперервної функції інтенсивності зображення. Проаналізовані основні проблеми розрахунку оптичного потоку та основні варіаційні методи оцінки оптичного потоку, що базуються на методі регуляризації Тихонова та Арсеніна для вирішення некоректно поставлених задач. Іл.: 1. Бібліогр.: 15 назв.

Ключові слова: модель; оптичний потік; оцінка руху; інтенсивність зображення; некоректно поставлена задача.

Постановка проблеми. Теорія, моделі та методи аналізу, обробки і розуміння зображень є основою для побудови систем комп'ютеризованої медичної діагностики, систем військового застосування для виявлення живої сили і транспортних засобів противника, систем наведення ракет, систем управління автономними транспортними засобами і роботами, пілотними та безпілотними літальними апаратами, дослідження біологічних процесів росту від молекулярного рівня до рівня екосистем та багатьох інших. Аналіз послідовностей зображень дозволяє розпізнавати і аналізувати динамічні процеси шляхом визначення видимого руху. Рух є невід'ємною частиною нашого візуального досвіду, яка дає істотне джерело інформації для різноманітних візуальних задач у багатьох галузях.

Оцінка руху – одна з центральних проблем в області комп'ютерного зору, яка широко застосовується у процесах стиснення і обробки відео, пошуку рухомих об'єктів, супроводження об'єктів, розрахунку параметрів руху: швидкості, траєкторії і характерних ознак руху.

Процес аналізу послідовності кадрів з метою ідентифікації рухомих об'єктів зводиться до оцінки руху, яка ґрунтується на концепції оптичного потоку (ОП). ОП є моделлю видимого руху об'єктів, поверхонь та границь в візуальній сцені і може бути обчислений за допомогою градієнта, як міри зміни інтенсивності за одиницю часу. Але поле ОП є лише апроксимацією тривимірного (3D) руху точок об'єктів для двовірних (2D) зображень в кадрах. Ефективність обчислення ОП значною мірою залежить від моделі зображення. Якщо зображення описується меншим числом базисних функцій, то зменшується

складність обчислення ОП. Але такі базиси існують лише для глобально гладких зображень, а більшість реальних двовірних сигналів зображень не є такими. Більшість з існуючих методів гладких апроксимацій послідовностей зображень ґрунтуються на методах наближення 2D даних, не є адаптивними, мають високу надмірність в структурі зображень та сильну анізотропію. Так вейвлетні апроксимації, маючи добру просторову локалізацію і чутливість до зміни масштабу, не чутливі до змін орієнтації. Геометричні апроксимації дають можливість відчувати зміни орієнтації, але для їх побудови найбільш ефективні адаптивні методи, які вимагають апріорі наявності словників, розробка яких є нетривіальною задачею.

Побудова гладких апроксимацій послідовностей зображень на основі просторового та часового масштабування дозволяє підвищити ефективність обчислення ОП, значно зменшити об'єми даних при кодуванні та передачі динамічних зображень, покращити результативність методів видалення шуму, сегментації, знаходження границь, розпізнавання образів.

В зв'язку з цим, модифікація існуючих і розробка нових моделей та методів обчислення ОП в послідовностях зображень на основі просторово-часових апроксимацій є актуальною задачею.

Оптичним потоком називається відображення видимого руху, що розраховується з припущенням сталості інтенсивності. Оптичний потік представляє собою зміщення кожної точки між двома кадрами. Тобто, оптичний потік – це поле швидкостей, що складається з векторів зсуву, які відповідають миттєвій швидкості [1].

Для знаходження рівняння оптичного потоку зробимо деякі припущення:

1. Будемо вважати, що оптичні властивості та освітленість об'єкта не змінюються протягом часового інтервалу $[t_1, t_2]$.

2. Припустимо, що кожний малий окіл зображення $N_{(x,y)}$ в момент t_1 може бути знайдений у деякому зміщеному положенні $N_{(x+\Delta x, y+\Delta y)}$ в момент t_2 .

Нехай $E(x, y, t)$ – неперервна функція інтенсивності. Розкладемо її у ряд Тейлора у малій околиці довільної точки (x, y, t) .

$$E(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t) = E(x, y, t) + \frac{\partial E}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial E}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial E}{\partial t} \Delta t + h.o.t., \quad (1)$$

де $h.o.t.$ – доданки високого порядку.

У малій околі точки (x, y, t) можна знехтувати доданками високого порядку та враховувати тільки лінійні члени. Вектор оптичного потоку $V = [\Delta x, \Delta y]$ – це вектор, для якого потрібно знайти зміщення околиці (x, y) зображення N_1 у момент часу t_1 у рівну за інтенсивністю околицю $(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t)$ зображення N_2 у момент t_2 . Це означає, що

$$E(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t) = E(x, y, t). \quad (2)$$

Рівняння оптичного потоку (3) отримаємо, об'єднавши (1) та (2), ігноруючи доданки високого порядку.

Розв'язок рівняння оптичного потоку не визначає точно вектор потоку V , але накладає на нього лінійне обмеження.

$$\begin{aligned} -\frac{\partial E}{\partial t} \Delta t &= \frac{\partial E}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial E}{\partial y} \Delta y = \\ &= \left[\frac{\partial E}{\partial x}, \frac{\partial E}{\partial y} \right] \mathbf{o}[\Delta x, \Delta y] = \nabla E \mathbf{o}[\Delta x, \Delta y]. \end{aligned} \quad (3)$$

Аналіз літератури. У теорії розрахунку оптичного потоку рух розглядається, як відносна величина, бо поле оптичного потоку представляє собою проекцію поля дійсного руху. В реальних задачах виникають глянцеві, напівпрозорі об'єкти та зміни в освітленні. Тому оптичний потік іноді може бути досить поганою апроксимацією дійсного руху. Наприклад, сфера, що обертається зі статичним освітленням дає статичне зображення. Але нерухома сфера з переміщенням джерела світла дає зміну інтенсивності точок [2].

Двовимірна оцінка руху, як оцінка оптичного потоку, що базується на двох кадрах, є некоректно поставленою задачею за відсутності додаткових припущень щодо природи руху. Двовимірна оцінка руху зазнає усіх проблем некоректно поставленої задачі, тобто ми не можемо гарантувати існування та єдиність розв'язку та його неперервну залежність від вхідних даних.

Існування розв'язку зводиться до проблеми оклюзії, коли не може бути знайдено відповідності для перекритих точок (перекриття одного елемента іншим за час зміни кадрів).

Проблема існування єдиного розв'язку відома як апертурна проблема. Якщо компоненти вектору руху розглядаються як незалежні, тоді кількість невідомих у два рази більша за кількість спостережень.

Неперервна залежність від вхідних даних полягає в тому, що оцінка руху дуже чутлива до наявності шуму у кадрах. Невелика кількість

шуму може спричинити велике відхилення оцінюваного руху. Розглянемо ці проблеми більш детально:

1. Оклюзія відноситься до закритих та відкритих поверхонь, що з'являються за рахунок обертання тривимірних об'єктів та переміщення об'єктів, що займають лише частину поля зору [3].

2. Апертурна проблема є переосмисленням того факту, що розв'язок задачі оцінки оптичного потоку не є єдиним. Якщо вектори руху у кожному пікселі розглядаються як незалежні змінні, тоді кількість невідомих у два рази більша ніж кількість рівнянь (3). Кількість рівнянь дорівнює кількості пікселів зображення, але кожен піксель має дві компоненти вектору руху. Ми можемо визначити лише той рух, що ортогональний до просторового градієнту зображення – нормального градієнту у кожному пікселі. Рух, перпендикулярний за напрямком краю, називається нормальним потоком. Апертурну проблему можна подолати оцінюючи рух на основі блоку пікселів з достатньою варіацією рівня інтенсивності [4].

Тому, рівняння оптичного потоку є необхідним, але недостатнім для однозначного визначення поля руху. Воно лише обумовлює нормальну складову поля швидкостей.

Для того щоб усунути додатковий ступінь свободи, потрібно зробити додаткові припущення щодо характеру поля руху, тобто провести регуляризацію задачі. Розглянемо основні варіаційні підходи для вирішення цієї проблеми:

1. Метод Хорна – Шанка (Horn – Schunck) [5] полягає у мінімізації функціоналу, що описує відхилення від припущення сталості яскравості та гладкості векторного поля.

2. Модифікації метода Хорна – Шанка, що використовують інші обмеження на данні та гладкість.

Метод базується на обмеженні оптичного потоку (4) для малих зміщень та припущенні, що розглядаються непрозорі об'єкти скінченного розміру, що зазнають жорстких зміщень або деформацій. В такому випадку, сусідні точки об'єктів мають подібні швидкості та поле швидкостей малюнку яскравості зображення змінюється гладко майже скрізь.

Запишемо рівняння (3) у наступному виді

$$\frac{\partial E}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial E}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial E}{\partial t} = 0. \quad (4)$$

Припустимо $u = \frac{dx}{dt}$ та $v = \frac{dy}{dt}$, тоді маємо лінійне рівняння с двома невідомими

$$E_x u + E_y v + E_t = 0. \quad (5)$$

Записавши рівняння (5) таким чином

$$(E_x, E_y) \cdot (u, v) = -E_t,$$

отримаємо компоненту руху в бік градієнту яскравості (E_x, E_y)

$$-\frac{E_t}{\sqrt{E_x^2 + E_y^2}}.$$

Швидкість (u, v) повинна лежати вздовж лінії, перпендикулярної вектору градієнта яскравості (E_x, E_y) . Відстань цієї лінії від початку координат дорівнює E_t , поділений на величину (E_x, E_y) .

Один із способів виразити додаткове обмеження – мінімізувати квадрат величини градієнту швидкості оптичного потоку:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2, \quad \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2.$$

Іншою мірою гладкості поля оптичного потоку може бути сума квадратів операторів Лапласа по компонентах потоку x та y :

$$\nabla^2 u = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}, \quad \nabla^2 v = \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}. \quad (6)$$

У простих випадках обидва Лапласіани у (6) дорівнюють нулю. Якщо спостерігач рухається паралельно плоскому об'єкту, обертається навколо лінії, перпендикулярної до поверхні або рухається ортогонально до поверхні, тоді другі частинні похідні зникають.

Ціль статті – мінімізація суми помилок зміни інтенсивності вихідного та зміщеного пікселів

$$\varepsilon_b = E_x u + E_y v + E_t$$

та міри відхилення від гладкості поля швидкостей

$$\varepsilon_c^2 = \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2.$$

Тоді загальна помилка, яку треба мінімізувати:

$$\varepsilon^2 = \iint \alpha^2 \varepsilon_c^2 dx dy + \iint \varepsilon_b^2 dx dy, \quad (7)$$

де α^2 – невід’ємний ваговий коефіцієнт, що вводиться із міркувань, що ε_b не може бути еквівалентна нулю через помилки квантування та шум.

Мінімізація повинна здійснюватися шляхом пошуку відповідних значень швидкості оптичного потоку (u, v) .

Загалом, такий вид штрафного виразу було запроваджено Тихоновим та Арсеніним у 1977 році [6]. Перший вираз у (7) вимірює вірність даних, другий – регуляризуючий.

Загальні варіаційні методи. З моменту публікації роботи Хорна та Шанка у 1981 році було проведено дуже багато досліджень з метою покращення даного методу для обчислення оптичного потоку, що зазнає розривів, має великі зміщення та припускає варіації яскравості у часі. Серед них можна виділити три основних підходи:

1. Зміна регуляризуючого виразу у (7) на неквадратичний, наприклад, [7, 8, 9]:

$$\iint \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) dx dy, \quad (8)$$

або

$$\iint \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2} + \sqrt{\left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2} dx dy. \quad (9)$$

Таке обмеження гладкості оптичного потоку зростає лінійно із ростом градієнту швидкості. Це дозволяє послабити обмеження на гладкість поля оптичного потоку, що дозволяє обробляти послідовності з розривним оптичним потоком.

Вираз (8) називається повною варіацією у просторі L_1 , яка є залежною від повороту системи відліку, тобто оберт системи відліку на довільний кут призводить до зміни результатів розрахунку. Вираз (9) називається обмеженою варіацією, яка є інваріантною до обертання.

2. Використання у (7) нелінійного рівняння оптичного потоку, наприклад, [10, 11]:

$$\iint |E_1(x, y) - E_2(x + u, y + v)|^2 dx dy,$$

що дозволяє обчислювати великі зміщення, на відміну від лінійної апроксимації (5).

3. Неквадратичне рівняння оптичного потоку, наприклад, [12, 13]:

$$\iint |E_1(x, y) - E_2(x + u, y + v)| dx dy,$$

або

$$\iint (E_x u + E_y v + E_t) dx dy.$$

Завдяки цьому послаблюються обмеження на постійність яскравості, що дозволяє більш точно обчислювати оптичний потік послідовностей із варіаціями яскравості та перекриттям об'єктів. Таке обмеження робить метод менш чутливим до викидів, шуму.

Метод повної варіації. Відмовимося в алгоритмі Хорна – Шанка від квадратичних функцій:

$$E(u) = \int_{x \in E} |\nabla u_1| + |\nabla u_2| + \lambda |\rho(u)|.$$

Отримана функція може розглядатися як сума повної варіації і додаткового виразу в метриці L_1 . Але тут виникають складнощі: неможливість знаходження диференціала модуля в нулі, що не дає можливості застосування формули Ейлера – Лагранжа для варіації функціонала.

В даному випадку мінімізувати подібну енергетичну функцію можливо методом випуклої релаксації:

$$E_\theta(u, v) = \int_{x \in E} |\nabla u_1| + |\nabla u_2| + \frac{1}{2\theta} |u - v|^2 + \lambda |\rho(u)|.$$

Ця релаксація може бути мінімізована фіксацією значень u або v і мінімізацією для другої змінної. Для зменшення обчислювальної складності алгоритму виконується попередня гладка апроксимація кадрів зображення шляхом поєднання нелінійної вейвлетної апроксимації з корекцією границь. Для підвищення стійкості апроксимації до зміни орієнтації дозволило отримати результати, які є по якості близькими до перетворення Карунена-Лоєва, а по обчислювальній складності не перевершують швидке дискретне вейвлетне перетворення. Корекція границь реалізується шляхом обчислення локальної енергії зображення. Локальна енергія обчислюється на основі введення комплексного аналітичного сигналу, дійсну частину якого складає зображення, а уявну – його перетворення Гільберта. Аналітичний сигнал дозволяє однозначно визначити просторові параметри – миттєву амплітуду і миттєву частоту, а перетворення Гільберта дозволяє отримати подання зображення з

більшою просторово-частотною енергетичною концентрацією в порівнянні з вейвлетним.

Розглянемо результат реалізації оцінки руху методом $TV - L_1$ [14] на рис. 1.

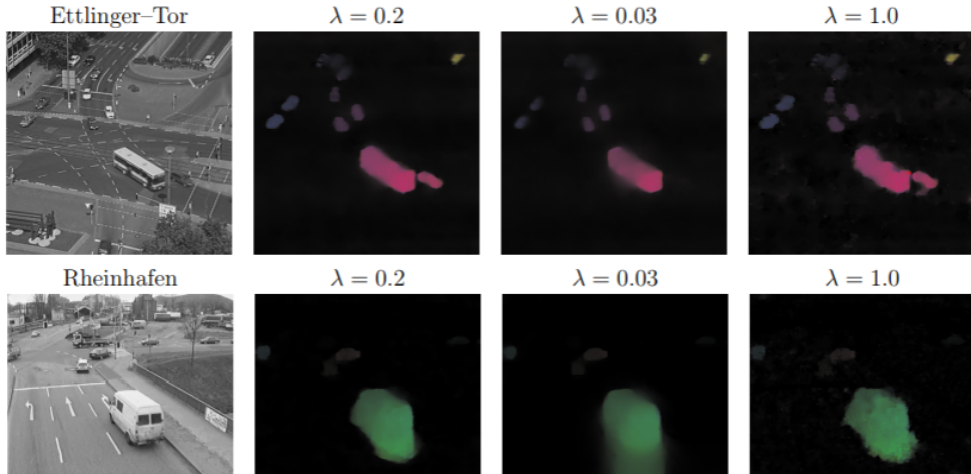


Рис. 1. Результат розрахунку оптичного потоку методом $TV - L_1$

Для візуалізації оптичного потоку використовується переведення потоку у кольоровий простір *HSV*.

Для порівняння запропонованого алгоритму були використані результати імплементації методів обчислення оптичного потоку з бази даних *Middlebury*, (<http://vision.middlebury.edu/flow/>) де наведені використані контрольні приклади для наступних методів:

1. Метод Хорна – Шанка [5];
2. Метод Блека – Анандана [7];
3. Метод Брокса [11];
4. Метод повної варіації у просторі L_1 [13].

Висновки. Задача оцінки оптичного потоку є некоректно поставленою задачею. Ця проблема вирішується методом регуляризації, тобто шляхом накладення додаткових обмежень.

Метод Хорна – Шанка досить неточний у випадках обчислення оптичного потоку, що зазнає розривів. Але він є основою подальших досліджень оптичного потоку. Модифікації метода Хорна-Шанка успішно долають проблеми розривних оптичних полів, перекриття та сильних зміщень. Модифікація на основі повної варіації, незважаючи на обчислювальну складність, використовується для оцінки руху в проблемі стабілізації відео та демонструє якісні результати.

Завдяки тому, що в даних методах обчислюється "щільне" оптичне поле, тобто у кожній точці зображення, ми можемо отримати важливу інформацію про характер об'єктів на послідовності зображень. Обчислювальна складність таких методів набагато більша ніж тих, що обчислюють "вибіркове" оптичне поле, але у деяких задачах більш важлива якість ніж швидкість обчислень. Тобто, розглянуті методи демонструють хороші результати, якщо немає потреби у обчисленні оптичного потоку у реальному часі. Для обчислення у реальному часі використовується метод Фаренбека, але він демонструє недостатню якість результатів. Тому поєднання гладкої апроксимації відео кадрів з обчисленням повної варіації в метриці L_1 дає прийнятні результати обчислення руху в задачах комп'ютерного зору як з точки зору складності обчислень, так і з точки зору якості.

Список літератури:

1. *Shapiro L.* Computer Vision / *L. Shapiro, G. Stockman.* – Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall PTR, 2001. – 618 p.
2. *Fleet D.J.* Optical flow estimation / *D.J. Fleet, Y. Weiss.* – New York: Springer, 2005. – P. 239-257. – In: Mathematical models of computer Vision: The Handbook / *N. Paragios, Y. Chen, and O. Faugeras* (eds.).
3. *Tekalp A.M.* Digital video processing / *A. Murat, Tekalp.* – Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall PTR, 1995. – 548 p.
4. *Kornprobst P.* Mathematical Problems in Image Processing / *P. Kornprobst, G. Aubert.* – New York: Springer, 2006. – 377 p.
5. *Horn B.K.P.* Determining Optical Flow / *B.K.P. Horn, B.G. Schunck.* – ARTIFICIAL INTELLIGENCE. – 1981. – Vol. 17. – P. 185-203.
6. *Тихонов А.Н.* Методы решения некорректных задач / *А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин.* – М.: Наука: Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 285 с.
7. *Black M.J.* The robust estimation of multiple motions: Parametric and piecewise – smooth flow fields / *M.J. Black, P. Anandan* // CVGIP: Image Understanding. – 1996. – 63 (1). – P. 75-104
8. *Nagel H.-H.* Constraints for the estimation of displacement vector fields from image sequences / *H.-H. Nagel* // Germany: Morgan Kaufmann Publishers Inc.: IJCAI'83 Proceedings of the Eighth international joint conference on Artificial intelligence. – 1983. – Vol. 2. – P. 945-951.
9. *Cohen I.* Nonlinear variational method for optical flow computation / *I. Cohen* // Scandinavian Conference on Image Analysis. – 1993. – Vol. 1. – P. 523-530.
10. *Xu L.* Motion Detail Preserving Optical Flow Estimation / *L. Xu, J. Jia, Y. Matsushita* // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2012. – Vol. 34. – № 9. – P. 1744-1757.
11. *Brox T.* High Accuracy Optical Flow Estimation Based on a Theory for Warping / *T. Brox, A. Bruhn, N. Papenberg, J. Weicker.t* – Berlin: Springer, 2004. – P. 26-36: In: Computer Vision – ECCV 2004. Lecture Notes in Computer Science, Vol. 3024.
12. *Zach T.C.* A Duality Based Approach for Realtime TV-L1 Optical Flow / *C. Zach, T. Pock, H. Bischof.* – New York: Springer. – In: Lecture Notes in Computer Science, 2007. – P. 214-223.

13. Wedel A. An Improved Algorithm for TV-L1 Optical Flow / A. Wedel, T. Pock, C. Zach, H. Bischof, D. Cremers. – Berlin: Springer. – In *Statistical and Geometrical Approaches to Visual Motion Analysis*, 2009. – P. 23-45.
14. Pérez J.S. TV-L1 Optical Flow Estimation / J.S. Pérez, E. Meinhardt-Llopis, G. Facciolo. // *Image Processing On Line*. – 2013. – Vol. 3. – P. 137-150.
15. Мороз В.В. Наближення зображень: методи апроксимації та стиск / В.В. Мороз // Вісник НТУ "ХПІ". Серія "Інформатика та моделювання". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2013. – № 19 (992). – С. 87-96.

References:

1. Shapiro, L., and Stockman, G. (2001), *Computer Vision*, Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall PTR, 618 p.
2. Fleet, D.J., and Weiss, Y. (2005), "Optical flow estimation", Springer, New York, pp. 239-257. – In: *Mathematical models of computer Vision: The Handbook* / N. Paragios, Y. Chen, and O. Faugeras (eds.).
3. Tekalp, A.M. (1995), *Digital video processing*, Upper Saddle River, NJ, USA, Prentice Hall PTR, 548 p.
4. Kornprobst, P., and Aubert, G. (2006), *Mathematical Problems in Image Processing*, Springer, New York, 377 p.
5. Horn, B.K.P., and Schunck, B.G. (1981), "Determining Optical Flow", *ARTIFICIAL INTELLIGENCE*, vol. 17, pp. 185-203.
6. Tikhonov, A.N. and Arsenin, V.Ya. (1979), *Methods for solving incorrect problems*, Science, Main edition of the physical and mathematical literature, Moscow, 285 p.
7. Black, M.J., and Anandan, P. (1996), "The robust estimation of multiple motions: Parametric and piecewise – smooth flow fields", *CVGIP: Image Understanding*, vol. 63 (1), pp. 75-104.
8. Nagel, H.-H. (1983), Constraints for the estimation of displacement vector fields from image sequences, *Germany: Morgan Kaufmann Publishers Inc., IJCAI'83 Proceedings of the Eighth international joint conference on Artificial intelligence*, vol. 2, pp. 945-951.
9. Cohen, I. (1993), "Nonlinear variational method for optical flow computation", *Scandinavian Conference on Image Analysis*, vol. 1, pp. 523-530.
10. Xu, L. Jia, J., and Matsushita, Y. (2012), "Motion Detail Preserving Optical Flow Estimation", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 34, No. 9, pp. 1744-1757.
11. Brox, T., Bruhn, A., Papenberg, N., and Weicker, J. (2004), "High Accuracy Optical Flow Estimation Based on a Theory for Warping", Berlin, Springer, pp. 26-36: In: *Computer Vision – ECCV 2004. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 3024.
12. Zach, T.C., Pock, T., and Bischof, H. (2007), "A Duality Based Approach for Realtime TV-L1 Optical Flow", New York: Springer. – In: *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 214-223.
13. Wedel, A., Pock, T., Zach, C., Bischof, H., and Cremers, D. (2009), "An Improved Algorithm for TV-L1 Optical Flow", Berlin, Springer. – In *Statistical and Geometrical Approaches to Visual Motion Analysis*, pp. 23-45.
14. Pérez, J.S., Meinhardt-Llopis, E., and Facciolo, G. (2013), "TV-L1 Optical Flow Estimation", *Image Processing On Line*, vol. 3, pp. 137-150.
15. Moroz, V.V. (2013), "Approximation of images: methods of approximation and compression", *Bulletin of the NTU "KhPI". Series "Informatics and Modeling"*, Kharkiv: NTU "KhPI", No. 19 (992), pp. 87-96.

Статтю подав д-р техн. наук, проф. ОНУ імені І.І. Мечникова Малахов Є.В.

Надійшла (received) 13.11.2018

Moroz Volodymyr Volodymyrovych, PhD Sci.Tech, Professor
Odessa I.I. Mechnikov National University
Str. Dvoryanskaya, 2, Odessa, Ukraine, 65082
e-mail: v.moroz@onu.edu.ua

Kondratyuk Anastasia Volodymyrivna, student
Odessa I.I. Mechnikov National University
Str. Dvoryanskaya, 2, Odessa, Ukraine, 65082
e-mail: kondratyuk.anastasia@stud.onu.edu.ua

УДК 004.932:519.652

Варіаційні методи оцінки руху в задачах комп'ютерного зору / Мороз В.В., Кондратюк А.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2018. – № 42 (1318). – С. 36 – 47.

Розглянуто модель оптичного потоку для оцінки видимого руху. Наведено знаходження рівняння оптичного потоку шляхом розкладання у ряд Тейлора неперервної функції інтенсивності зображення. Проаналізовано основні проблеми розрахунку оптичного потоку та основні варіаційні методи оцінки оптичного потоку, що базуються на методі регуляризації Тихонова та Арсеніна для вирішення некоректно поставлених задач. Ил.: 1. Бібліогр.: 15 назв.

Ключові слова: модель; оптичний потік; оцінка руху; інтенсивність зображення; некоректно поставлена задача.

УДК 004.932:519.652

Вариационные методы оценки движения в задачах компьютерного зрения / Мороз В.В., Кондратюк А.В. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2018. – № 42 (1318). – С. 36 – 47.

Рассмотрена модель оптического потока для оценки видимого движения. Приведено определение уравнения оптического потока путем разложения в ряд Тейлора непрерывной функции интенсивности изображения. Рассмотрены основные проблемы расчета оптического потока и основные вариационные методы оценки оптического потока, которые базируются на методе регуляризации Тихонова и Арсенина для решения некоректно поставленных задач. Ил.: 1. Библиогр.: 15 назв.

Ключевые слова: модель; оптический поток; оценка движения; интенсивность изображения; некоректно поставленная задача.

UDC 004.932:519.652

Variational motion estimation in computer vision / Moroz V.V., Kondratyuk A.V. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2018. – №.42 (1318). – P. 36 – 47.

The optical flow model for apparent motion estimation is considered. The equation of the optical flow is found by decomposition in a Taylor series of a continuous image intensity function. The article describes the main problems of calculating the optical flow and main variational methods for the optical flow, which are based on the Tikhonov and Arsenin regularization for solving ill-posed problem. Figs.: 1. Refs.: 15 titles.

Keywords: model; optical flow; motion estimation; image intensity; ill-posed problem.

УДК 681.5.015.52

DOI: 10.20998/2411-0558.2018.42.12

В. Д. ПАВЛЕНКО, д-р техн. наук, проф., ОНПУ, Одесса,
С. В. ПАВЛЕНКО, канд. техн. наук, с.н.с., ОНПУ, Одесса,
В. И. ЛОМОВОЙ, магистр, НУ "ОМА", Одесса

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ ВОЛЬТЕРРА НЕЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ

Исследуется точность и вычислительная устойчивость методов детерминированной идентификации нелинейных динамических систем в виде многомерных АЧХ и ФЧХ. Рассматриваются аппроксимационный и интерполяционный методы идентификации с использованием в качестве тестовых полигармонических сигналов. Вычислительная устойчивость процедуры идентификации обеспечивается применением метода регуляризации некорректных задач. Для сглаживания оценок получаемых характеристик используется вейвлет-фильтрация. Ил.: 9. Табл.: 2. Библиогр.: 14 назв.

Ключевые слова: нелинейные динамические системы; методы идентификации; модели Вольтерра; многомерные АЧХ и ФЧХ; регуляризация; вейвлет-фильтрация.

Постановка проблемы. Для математического моделирования сложных нелинейных динамических систем (НДС) часто используют непараметрические динамические модели на основе интегро-степенных рядов (модели Вольтерра) [1 – 3]. При этом исследуемые НДС характеризуются многомерными весовыми функциями – ядрами Вольтерра или их Фурье-изображениями – многомерными передаточными функциями, инвариантными к виду входного сигнала, для моделирования системы во временной или частотной области, соответственно [2].

Если для исследуемой НДС необходимо оценивать характер искажений формы сигналов, то используется временная область, и определяются ядра Вольтерра. Если же требуется проводить анализ частотных искажений, то, очевидно, при моделировании системы эффективнее использовать частотную область и определять передаточные функции или многомерные АЧХ и ФЧХ.

Для решения многих практических задач применяются частотные характеристики, которые находят, используя данные активных экспериментов "вход-выход" с помощью полигармонических тестовых сигналов [4, 5].

Актуальной задачей является исследование эффективности разработанных методов и инструментальных средств идентификации

НДС на основе модели Вольтерра в частотной области с использованием тестовых полигармонических сигналов.

Анализ литературы. В работах [6, 7] получил развитие аппроксимационный метод идентификации НДС на основе модели Вольтерра в частотной области в виде многомерных АЧХ и ФЧХ, основанный на составлении линейных комбинаций откликов системы на входные полигармонические сигналы с различными амплитудами. Предложен метод идентификации с выбором оптимальных амплитуд тестовых сигналов и автоматическим определением соответствующих масштабирующих коэффициентов, обеспечивающий минимум погрешности оценки многомерных АЧХ и ФЧХ.

В [8, 9] предложен интерполяционный метод построения модели Вольтерра НДС в частотной области, основанный на дифференцировании откликов по амплитуде тестовых воздействий, минимизирующий методическую погрешность метода идентификации.

На результаты идентификации НДС в частотной области в виде многомерных АЧХ и ФЧХ с помощью аппроксимационного и интерполяционного методов существенное влияние оказывают погрешности измерений откликов. Точность и вычислительная устойчивость оценок многомерных АЧХ и ФЧХ достигаются применением метода регуляризации некорректных задач [10 – 12].

Для повышения вычислительной устойчивости методов идентификации на основе модели Вольтерра в частотной области применяются процедуры шумоподавления (сглаживания) к получаемым оценкам многомерных АЧХ и ФЧХ, основанные на вейвлет-преобразовании [13].

Целью работы является сравнительный анализ точности и вычислительной устойчивости методов идентификации НДС в частотной области в виде многомерных АЧХ и ФЧХ с использованием полигармонических тестовых сигналов.

Описание нелинейных динамических систем на основе модели Вольтерра во временной и частотной области. В общем случае соотношение типа "вход-выход" для НДС (рис. 1) может быть представлено интегро-степенным рядом Вольтерра (РВ) вида [1 – 3]:

$$y[x(t)] = \sum_{n=1}^{\infty} y_n[x(t)] = \int_0^{\infty} \dots \int_0^{\infty} \underset{раз}{n} w_n(\tau_1, \dots, \tau_n) \prod_{l=1}^n x(t - \tau_l) d\tau_l, \quad (1)$$

где $x(t)$ и $y[x(t)]$ – соответственно входной и выходной сигналы системы; $w_n(\tau_1, \dots, \tau_n)$ – импульсная переходная функция или ядро Вольтерра n -го порядка; $y_n[x(t)]$ – n -ая парциальная составляющая (ПС) отклика $y[x(t)]$ системы (n -мерный интеграл свертки).



Рис. 1. Нелинейная динамическая система с одним входом и одним выходом

Идентификация НДС в виде модели Вольтерра состоит в определении n -мерных импульсных переходных функций $w_n(\tau_1, \dots, \tau_n)$ или их Фурье-образов $W_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n)$ – n -мерных передаточных функций (ПФ), соответственно для моделирования системы во временной (рис. 2) или частотной (рис. 3) области.

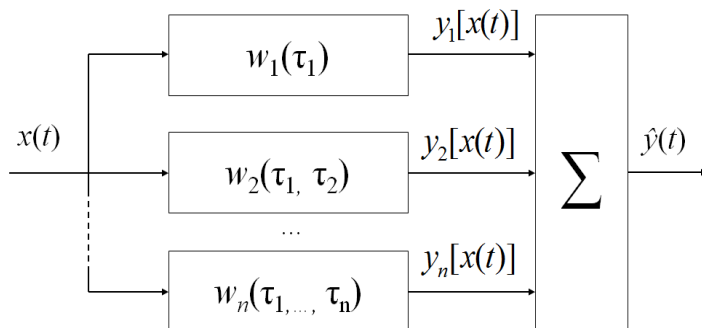


Рис. 2. Модель Вольтерра для НДС во временной области

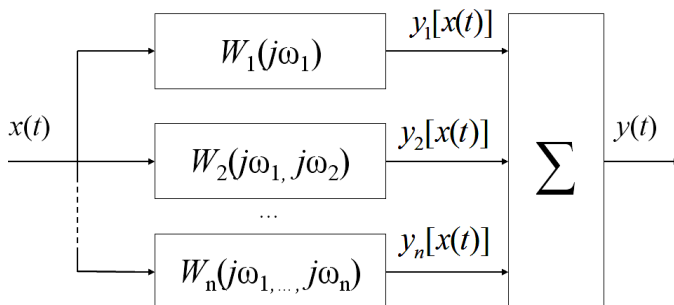


Рис. 3. Модель Вольтерра для НДС в частотной области

Многомерное (n -мерное) преобразование Фурье ядра Вольтерра n -го порядка записывается в виде

$$W_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n) = F_n \langle w_n(t_1, \dots, t_n) \rangle = \int_0^\infty \mathbf{K} \int_0^\infty w_n(t_1, \dots, t_n) \exp\left(-j \sum_{i=1}^n \omega_i t_i\right) \prod_{i=1}^n dt_i, \quad (2)$$

где $F_n \langle \rangle$ – n -мерное преобразование Фурье; j – мнимая единица. Тогда модель нелинейной системы на основе РВ в частотной области можно представить в виде [2]

$$y[x(t)] = \sum_{n=1}^{\infty} F_n^{-1} \left\langle W_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n) \prod_{i=1}^n X(j\omega_i) \right\rangle_{t_1 = \dots = t_n = t}, \quad (3)$$

где $F_n^{-1} \langle \rangle$ – обратное n -мерное преобразование Фурье; $X(j\omega_i)$ – Фурье-изображение входного сигнала.

Идентификация нелинейной системы в частотной области сводится к определению на заданных частотах значений модуля и фазы многомерной ПФ – многомерных АЧХ $|W_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n)|$ и ФЧХ $\arg W_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n)$, которые определяются по формулам:

$$|W_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n)| = \sqrt{[\operatorname{Re} W_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n)]^2 + [\operatorname{Im} W_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n)]^2}, \quad (4)$$

$$\arg W_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n) = \arctg \frac{\operatorname{Im} W_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n)}{\operatorname{Re} W_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n)}, \quad (5)$$

где Re и Im – вещественная и мнимая части комплексной функции n переменных, соответственно.

Аппроксимационный метод идентификации НДС. При идентификации ядра Вольтерра n -го порядка ($n > 1$) существенное влияние на точность оказывают соседние члены ряда (1). Поэтому необходимо применять специальные приемы [6], позволяющие минимизировать это влияние. Идея такого приема заключается в конструировании из реакций системы на N ($N \geq n$) тестовых входных сигналов с заданными амплитудами такого выражения, которое с точностью до отброшенных членов порядка $N+1$ и выше, было бы равно n -му члену ряда Вольтерра.

Если на вход системы поочередно подаются тестовые сигналы $a_1 x(t), a_2 x(t), \dots, a_N x(t)$, где N – порядок аппроксимационной модели; $a_1, a_2, \dots, a_N$ – разные действительные числа, отличные от нуля и удовлетворяющие условию $|a_j| \leq 1$ для $\forall j = 1, 2, \dots, N$; $x(t)$ – произвольная

функция, то линейная комбинация откликов НДС на эти воздействия равна n -й ПС отклика на сигнал $x(t)$ с погрешностью Δ , т. е.

$$\sum_{j=1}^N c_j y[a_j x(t)] = y_n[x(t)] + \Delta, \quad (6)$$

где c_j – вещественные коэффициенты, такие что удовлетворяют системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$\begin{aligned} c_1 a_1 + c_2 a_2 + \dots + c_N a_N &= 0, \\ c_1 a_1^2 + c_2 a_2^2 + \dots + c_N a_N^2 &= 0, \\ &\dots \\ c_1 a_1^n + c_2 a_2^n + \dots + c_N a_N^n &= 1, \\ &\dots \\ c_1 a_1^N + c_2 a_2^N + \dots + c_N a_N^N &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Система (7) всегда имеет решение, причем единственное, так как ее определитель только множителем $a_1 a_2 \dots a_N$ отличается от определителя Вандермонда. Выбор амплитуд a_j должен обеспечивать сходимость ряда (1) и минимум методической погрешности выделения парциальной составляющей Δ , определяемой остатком ряда (1).

В [7] обосновывается выбор амплитуд тестовых воздействий и соответствующих коэффициентов, обеспечивающих минимальную методическую погрешность оценки многомерных АЧХ и ФЧХ идентифицируемой системы.

Интерполяционный метод идентификации НДС. В данном методе идентификации НДС на основе модели Вольтерра для разделения отклика НДС на ПС $\hat{y}_n(t)$ используется n -кратное дифференцирование выходного сигнала по параметру a – амплитуде тестовых воздействий [8].

Если на вход системы подать тестовый сигнал вида $ax(t)$, где $x(t)$ – произвольная функция; $|a| \leq 1$ – масштабирующий коэффициент, то для выделения ПС n -го порядка $\hat{y}_n(t)$ из измеряемого отклика НДС $y[ax(t)]$ необходимо найти n -ую частную производную отклика по амплитуде a при $a = 0$

$$n! \int_0^\infty \dots \int_0^\infty w_n(\tau_1, \dots, \tau_n) \prod_{k=1}^n x(t - \tau_k) d\tau_k = y_a^{(n)}[ax(t)]_{a=0}. \quad (8)$$

Для вычисления данного выражения частная производная заменяется выражением в конечных разностях. Дифференцирование функции, заданной в дискретных точках, может быть выполнено одним из численных методов после предварительного сглаживания результатов измерений. Используется универсальный приём, позволяющий заменить производную любого порядка n , разностным соотношением так, чтобы погрешность от такой замены для функции $y[ax(t)]$ была любого заранее определённого порядка аппроксимации p относительно шага $h = \Delta a$ разностной сетки по амплитуде a . На основе равенства

$$\frac{\partial^n y[ax(t)]}{\partial a^n} = \frac{1}{h^n} \sum_{r=-r_1}^{r_2} c_r y(a+rh) + O(h^p) \quad \text{для } \forall t \geq 0 \quad (9)$$

методом неопределённых коэффициентов подбираются независимые от h коэффициенты c_r , $r = -r_1, -r_1+1, \dots, r_2$, так, чтобы равенство (9) оказалось справедливым. Границы суммирования $r_1 \geq 0$ и $r_2 \geq 0$ можно взять произвольными, но так, чтобы порядок $r_1 + r_2$ разностного отношения $h^{-n} \sum c_r y(a+rh)$ удовлетворял неравенству $r_1 + r_2 \geq n + p - 1$.

Для определения c_r необходимо решить следующую систему уравнений:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \mathbf{L} & 1 \\ -r_1 & -r_1+1 & \mathbf{L} & r_2 \\ \mathbf{L} & \mathbf{L} & \mathbf{L} & \mathbf{L} \\ (-r_1)^{n-1} & (-r_1+1)^{n-1} & \mathbf{L} & r_2^{n-1} \\ (-r_1)^n & (-r_1+1)^n & \mathbf{L} & r_2^n \\ (-r_1)^{n+1} & (-r_1+1)^{n+1} & \mathbf{L} & r_2^{n+1} \\ \mathbf{L} & \mathbf{L} & \mathbf{L} & \mathbf{L} \\ (-r_1)^{n+p-1} & (-r_1+1)^{n+p-1} & \mathbf{L} & r_2^{n+p-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_{-r_1} \\ c_{-r_1+1} \\ \mathbf{L} \\ c_{r_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \mathbf{L} \\ 0 \\ n! \\ 0 \\ \mathbf{L} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Получены формулы для численного дифференцирования при использовании центральных и правых разностей для равноотстоящих узлов $y_r = y[rhx(t)]$, $r = -r_1, -r_1+1, \dots, -1, 0, 1, \dots, r_2-1, r_2$ с шагом разностной сетки по амплитуде h . Значения амплитуд и соответствующих им коэффициентов для интерполяционного метода приведены в [8].

Использование тестовых полигармонических сигналов. Для идентификации НДС в частотной области применяются тестовые полигармонические сигналы

$$x(t) = A \sum_{k=1}^n \cos(\omega_k t) = \frac{A}{2} \sum_{k=1}^n (e^{j\omega_k t} + e^{-j\omega_k t}), \quad (11)$$

где n – порядок оцениваемых характеристик; A , ω_k – амплитуда и частота k -ой гармоники, соответственно.

В [14] показано, что n -ю ПС отклика НДС можно представить в виде:

$$y_n(t) = \frac{A^n}{2^{n-1}} \sum_{m=0}^{\left[\frac{n}{2}\right]} C_n^m \sum_{k_1=1}^n \dots \sum_{k_m=1}^n \left| W_n(-j\omega_{k_1}, \dots, -j\omega_{k_m}, j\omega_{k_{m+1}}, \dots, j\omega_{k_n}) \right| \times \quad (12)$$

$$\times \cos \left(\left(-\sum_{l=0}^m \omega_{k_l} + \sum_{l=m+1}^n \omega_{k_l} \right) t + \arg W_n(-j\omega_{k_1}, \dots, -j\omega_{k_m}, j\omega_{k_{m+1}}, \dots, j\omega_{k_n}) \right)$$

где $[\cdot]$ – функция выделения целой части числа.

Из ПС отклика (12) на тестовый сигнал (11) выделяется составляющая с частотой $\omega_1 + \dots + \omega_n$:

$$A^n |W_n(j\omega_1, \mathbf{K}, j\omega_n)| \cos[(\omega_1 + \mathbf{K} + \omega_n)t + \arg W_n(j\omega_1, \mathbf{K}, j\omega_n)]. \quad (13)$$

При определении многомерных АЧХ и ФЧХ необходимо учитывать ограничения на выбор частот тестовых полигармонических сигналов и, следовательно, значения АЧХ и ФЧХ в этих точках многомерного пространства частот не могут быть получены на основе прямых измерений, а только с помощью интерполяции [14]. При практической реализации метода идентификации НДС необходимо минимизировать число таких точек неопределенности на интервале определения многомерных частотных характеристик, т.е. обеспечить минимум ограничений на выбор частот тестового сигнала. Доказана теорема о выборе частот.

Теорема о выборе частот. Для однозначности фильтрации из n -ой парциальной составляющей отклика системы гармоники с комбинационной частотой $\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_n$ необходимо и достаточно, чтобы последняя не равнялась комбинационным частотам вида: $k_1\omega_1 + k_2\omega_2 + \dots + k_n\omega_n$, где коэффициенты $\{k_i | i = 1, 2, \dots, n\}$ удовлетворяют условиям:

– мощность χ конечного множества отрицательных коэффициентов ($k_i < 0$) может принимать значения $0 \leq \chi \leq [n/2]$;

– сумма модулей коэффициентов k_i не больше порядка n определяемого ядра:

$$\sum_{i=1}^n |k_i| \leq n; \quad (14)$$

– сумма модулей коэффициентов k_i сравнима по mod 2 с порядком определяемого ядра n :

$$\sum_{i=1}^n |k_i| \equiv n \pmod{2}, \text{ т.е. } n - \sum_{i=1}^n |k_i| = 2l, \quad l \in N. \quad (15)$$

Применение этих ограничений при определении АЧХ и ФЧХ второго порядка требует обеспечить между частотами тестового сигнала выполнение 3-х неравенств: $\omega_1 \neq 0$, $\omega_2 \neq 0$ и $\omega_1 \neq \omega_2$, при определении характеристик третьего порядка – 15 неравенств: $\omega_1 \neq 0$, $\omega_2 \neq 0$, $\omega_3 \neq 0$, $\omega_1 \neq \omega_2$, $\omega_1 \neq \omega_3$, $\omega_2 \neq \omega_3$, $2\omega_1 \neq \omega_2 + \omega_3$, $2\omega_2 \neq \omega_1 + \omega_3$, $2\omega_3 \neq \omega_1 + \omega_2$, $2\omega_1 \neq \omega_2 - \omega_3$, $2\omega_2 \neq \omega_1 - \omega_3$, $2\omega_3 \neq \omega_1 - \omega_2$, $2\omega_1 \neq -\omega_2 + \omega_3$, $2\omega_2 \neq -\omega_1 + \omega_3$ и $2\omega_3 \neq -\omega_1 + \omega_2$.

При использовании тестовых полигармонических сигналов процедура идентификации НДС в частотной области – определения АЧХ и ФЧХ n -го порядка на основе аппроксимационного и интерполяционного методов может быть представлена обобщенной структурной схемой (рис. 4).

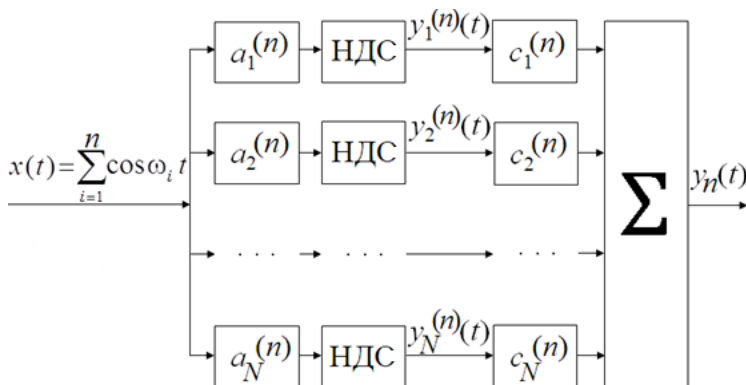


Рис. 4. Структурная схема процедуры идентификации НДС в частотной области

Анализ точности и вычислительной устойчивости методов идентификации. Исследование эффективности рассматриваемых вычислительных методов построения модели Вольтерра НДС в частотной области выполнено с помощью компьютерного эксперимента в системе Matlab. Исследование проводилось на модельном примере динамической системы первого порядка с квадратичной нелинейностью в обратной связи. Для рассматриваемой системы получены аналитические выражения АЧХ и ФЧХ первого, второго и третьего порядков [6], которые используются в исследованиях в качестве эталонных характеристик.

Для обеспечения вычислительной устойчивости методов идентификации НДС в частотной области применяется метод регуляризации некорректных задач [12]. При этом в качестве параметра регуляризации используется амплитуда тестовых полигармонических сигналов, что позволяет повысить точность идентификации в 1,5 – 2 раза [6].

Результаты идентификации с помощью аппроксимационного и интерполяционного методов для количества экспериментов $N = 4$ в виде АЧХ та ФЧХ первого и поддиагонального сечения второго порядка приведены на рис. 5 и рис. 6, соответственно.

Результаты сравнения по точности рассматриваемых методов идентификации тестовой системы в виде нормированной среднеквадратичной ошибки (НСКО) на примере поддиагональных сечений АЧХ и ФЧХ второго порядка, приведены в табл. 1 и табл. 2, соответственно.

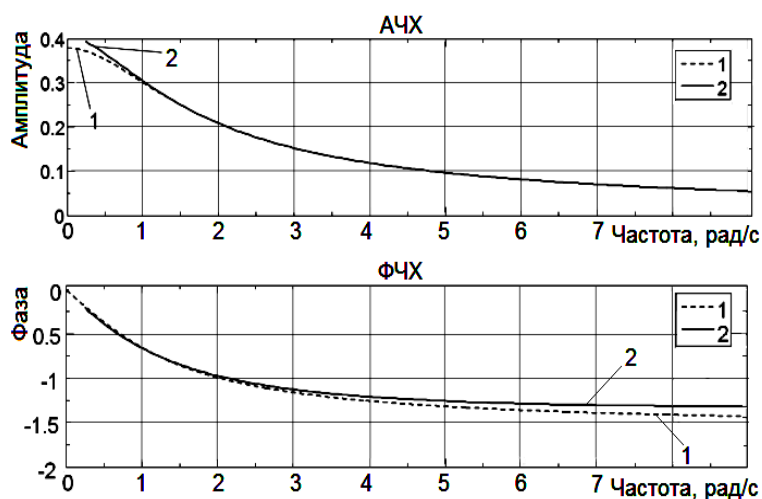


Рис. 5. АЧХ и ФЧХ тестовой НДС первого порядка: 1 – эталонная, 2 – результат идентификации

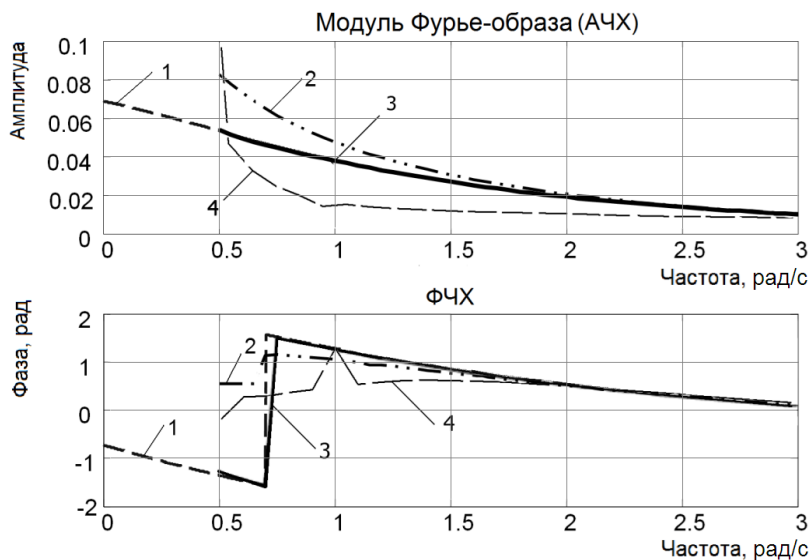


Рис. 6. Поддиагональные сечения АЧХ и ФЧХ тестовой НДС второго порядка: 1 – эталонное; результаты идентификации: 2 – аппроксимационным, 3 – интерполяционным методами, 4 – методом [1]

Таблица 1
Сравнительный анализ методов идентификации на примере АЧХ второго порядка

Порядок АЧХ n	Количество экспериментов (порядок аппроксимации), N	ПНСКО для АЧХ, %	
		Аппроксимационный	Интерполяционный
1	2	3.6429	2.1359
	4	1.1086	0.3468
	6	0.8679	0.2957
2	2	26.0092	30.2842
	4	3.4447	2.0452
	6	7.3030	89.2099
3	4	72.4950	10.9810
	6	74.4204	10.7642

Для повышения помехоустойчивости методов идентификации применяются процедуры шумоподавления (сглаживания) к полученным на основе реальных измерений откликов с погрешностью оценкам многомерных АЧХ и ФЧХ. Для шумоподавления в процедуре идентификации используется вейвлет-фильтрация [13] с автоматическим

выбором типа и параметров базовых вейвлет-функций, что позволило минимизировать влияние погрешностей измерений на точность идентификации и повысить точность оценки характеристик в 1,3 – 4 раза.

Проведено исследование вычислительной устойчивости интерполяционного метода идентификации на примере тестовой системы, результаты которого демонстрируют диаграммы значений ПНСКО оценки АЧХ (рис. 7 а) и ФЧХ (рис. 7 б) для " $n - N$ " ("порядок характеристики" – "порядок аппроксимации") при применении отдельно регуляризации и кумулятивный эффект от совместного применения регуляризации и вейвлет-фильтрации.

Таблица 2

Сравнительный анализ методов идентификации на примере ФЧХ второго порядка

Порядок ФЧХ, n	Количество экспериментов (порядок аппроксимации), N	ПНСКО для ФЧХ, %	
		Аппроксимационный	Интерполяционный
1	2	3.3451	2.5420
	4	3.1531	2.0618
	6	3.1032	1.9311
2	2	30.2842	76.8221
	4	2.0452	3.7603
	6	4.6408	5.9438
3	4	10.9810	1.6280
	6	10.7642	1.5522

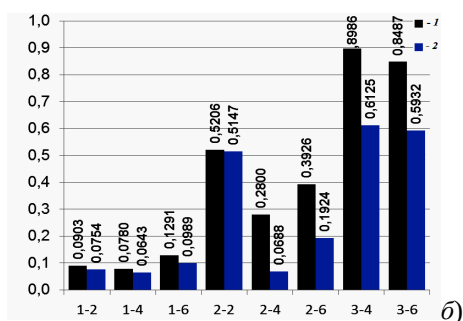
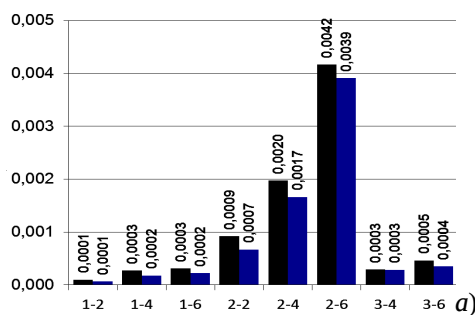


Рис. 7. НСКО оценки АЧХ (а) и ФЧХ (б) для " $n - N$ " с помощью интерполяционного метода идентификации при применении:
1 – регуляризации; 2 – регуляризации и вейвлет-фильтрации (кумулятивный эффект)

Результаты идентификации тестовой нелинейной динамической системы, полученные с помощью средств имитационного моделирования Matlab–Simulink в виде объёмных изображений АЧХ и ФЧХ, построенные по оценкам их поддиагональных сечений второго и третьего порядков при различных значениях количества экспериментов N и при различных значениях $\omega_2 - \omega_1$ и $\omega_3 = 0,1$ рад/с, представлены на рис. 8 и рис. 9.

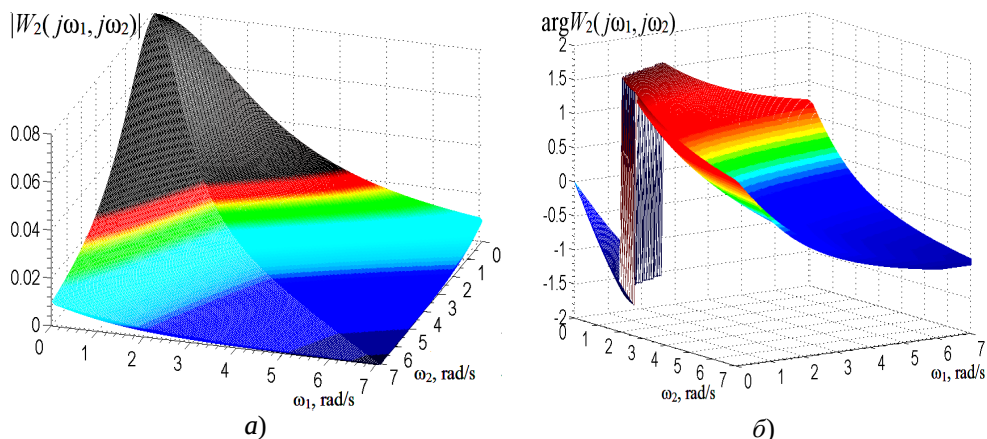


Рис. 8. Оценки АЧХ (а) и ФЧХ (б) 2-го порядка для $N = 4$

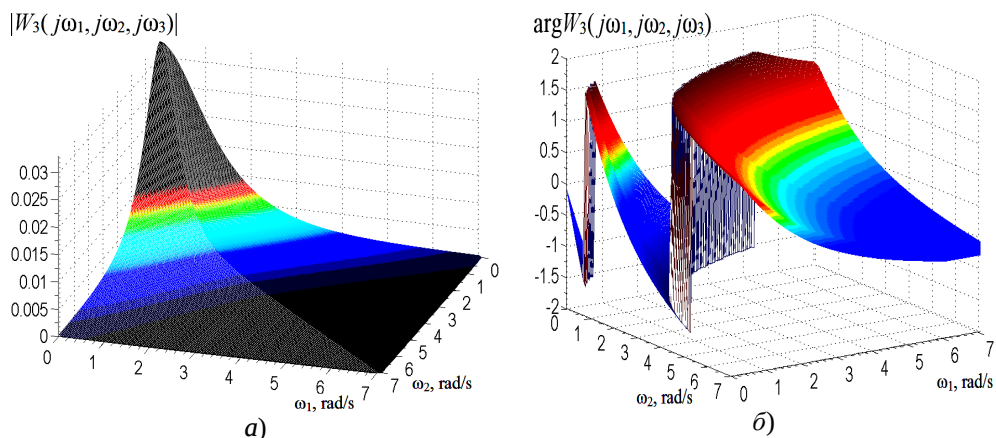


Рис. 9. Оценки АЧХ (а) и ФЧХ (б) 3-го порядка для $N = 6$, $\omega_3 = 0,1$ рад/с

Выводы. Проведено исследование эффективности разработанных методов и инструментальных средств идентификации НДС на основе модели Вольтерра в частотной области с использованием тестовых полигармонических сигналов. Исследования выполнены с помощью средств компьютерного моделирования в ППП Matlab–Simulink на

тестовой системе, для которой известны аналитические выражения АЧХ и ФЧХ 1-го, 2-го и 3-го порядков.

Рассматриваемый аппроксимационный метод оценки АЧХ и ФЧХ 1-го, 2-го и 3-го порядков исследуемой тестовой системы позволил повысить точность идентификации по отношению к существующему в 1,5 – 2 раза. Интерполяционный метод идентификации позволил повысить точность построения модели Вольтерра в 1,8 – 3 раза, но для вычисления оценок АЧХ и ФЧХ используется на 10% больше машинных инструкций.

Применение вейвлет-фильтрации на основе материнского вейвлета *coiflet* позволяет получать сглаженные оценки сечений АЧХ и ФЧХ и вместе с тем повысить точность идентификации более, чем в 2 раза.

Список литературы:

1. Данилов Л.В. Теория нелинейных электрических цепей / Л.В. Данилов, Л.Н. Матханов, В.С. Филиппов – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
2. Пупков К.А. Методы классической и современной теории автоматического управления. Статистическая динамика и идентификация систем автоматического управления: Учебник для ВУЗов. Т. 2, 2-е изд. / К.А. Пупков, Н.Д. Егупов. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 638 с.
3. Doyle F.J. Identification and Control Using Volterra Models / F.J. Doyle, R.K. Pearson, B.A. Ogunnaike – Published Springer Technology & Industrial Arts, 2001. – 314 p.
4. Giannakis G.B. A bibliography on nonlinear system identification and its applications in signal processing, communications and biomedical engineering / G.B. Giannakis, E. Serpedin // Signal Processing – EURASIP, Elsevier Science B.V., 2001. – Vol. 81. – №. 3. – P. 533-580.
5. Cheng C.M. Volterra-series-based nonlinear system modeling and its engineering applications: A state-of-the-art review / C.M. Cheng, Z.K. Peng, W.M. Zhang, G. Meng // Mechanical Systems and Signal Processing – November, 2016. – P. 1-25.
6. Pavlenko V. Identification of systems using Volterra model in time and frequency domain / V. Pavlenko, S. Pavlenko, V. Speranskyy // In book: "Advanced Data Acquisition and Intelligent Data Processing". V. Haasz and K. Madani (Eds.). Chapter 10. – River Publishers, 2014. – P. 233-270.
7. Pavlenko V. Modified Approximation Method for Identification of Nonlinear Systems Using Volterra Models in Frequency Domain / V. Pavlenko, V. Speranskyy, V. Ilyin, V. Lomovoy // Applied Mathematics in Electrical and Computer Engineering: Proc. of the AMERICAN-MATH'12 & CSST'12 & CEA'12, Harvard, Cambridge, USA, January 25–27, 2012. Published by WSEAS Press, 2012. – P. 423-428.
8. Pavlenko V. Interpolation Method of Nonlinear Dynamical Systems Identification Based on Volterra Model in Frequency Domain / V. Pavlenko, S. Pavlenko, V. Speranskyy // Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS'2013), 15-17 September 2013, Berlin, Germany. – 2013. – Vol. 2. – P. 138-142.
9. Pavlenko V.D. Analysis of Identification Accuracy of Nonlinear System Based on Volterra Model in Frequency Domain / V.D. Pavlenko, V.O. Speranskyy // American Journal of Modeling and Optimization. – 2013. – 1 (2). – P. 11-18.
10. Тихонов А.Н. Методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. – М.: Наука, 1979. – 288 с.

11. Тихонов А.Н. Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация / А.Н. Тихонов, А.В. Гончарский, В.В. Степанов. – М.: Наука, 1983. – 200 с.
12. Павленко С.В. Регуляризация процедуры идентификации нелинейных систем в виде моделей Вольтерры / С.В. Павленко, В.Д. Павленко // Идентификация систем и задачи управления: Труды X Международной конференции SICPRO'15, Москва 26-29 января 2015 г., Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. – М.: ИПУ РАН, 2015. – С. 230-238.
13. Павленко С.В. Применение вейвлет-фильтрации в процедуре идентификации нелинейных систем на основе моделей Вольтерры / С.В. Павленко // Вост.-европ. журн. передовых технологий. – Харьков, 2010. – № 6/4 (48). – С. 65-70.
14. Pavlenko V. Polyharmonic Test Signals Application for Identification of Nonlinear Dynamical System / V. Pavlenko, V. Speransky // The Second IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo'2017), 11-15 September 2017 Odessa, Ukraine: Collection of Proceedings of the Scientific and Technical Conference. – Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2017. – P. 86-90.

References:

1. Danilov, L.V., Matkhanov, L.N., and Filippov, V.S. (1990), *Theory of nonlinear electrical circuits*, L., Energiatomizdat, 256 p.
2. Pupkov, K.A., and Egupov, N.D. (2004), *Methods of classical and modern automatic control theory. Statistical dynamics and identification of automatic control systems: Textbook for Universities*. Vol. 2, 2nd ed., N.E. Bauman MGTU, 638 p.
3. Doyle, F.J., Pearson, R.K., and Ogunnaike, B.A. (2001), *Identification and Control Using Volterra Models*. – Published Springer Technology & Industrial Arts, 314 p.
4. Giannakis, G.B., and Serpedin, E. (2001), "A bibliography on nonlinear system identification and its applications in signal processing, communications and biomedical engineering". *Signal Processing – EURASIP*, Elsevier Science B.V., Vol. 81, No. 3, pp. 533-580.
5. Cheng, C.M., Peng, Z.K., Zhang, W.M., and Meng, G. (2016), "Volterra-series-based nonlinear system modeling and its engineering applications: A state-of-the-art review". *Mechanical Systems and Signal Processing*, November, pp. 1-25.
6. Pavlenko, V., Pavlenko, S., Speransky, V. (2014), "Identification of systems using Volterra model in time and frequency domain". In book: *Advanced Data Acquisition and Intelligent Data Processing*. V. Haasz and K. Madani (Eds.). Chapter 10. – River Publishers, pp. 233-270.
7. Pavlenko, V., Speransky, V., Ilyin, V., and Lomovoy, V. (2012), "Modified Approximation Method for Identification of Nonlinear Systems Using Volterra Models in Frequency Domain". *Applied Mathematics in Electrical and Computer Engineering: Proc. of the AMERICAN-MATH'12 & CSST'12 & CEA'12*, Harvard, Cambridge, USA, January 25–27, 2012. Published by WSEAS Press, pp. 423-428.
8. Pavlenko, V., Pavlenko, S., and Speransky, V. (2013), "Interpolation Method of Nonlinear Dynamical Systems Identification Based on Volterra Model in Frequency Domain". *Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS'2013)*, 15-17 September 2013, Berlin, Germany. Vol. 2, pp. 138-142.
9. Pavlenko, V.D., and Speransky, V.O. (2013), "Analysis of Identification Accuracy of Nonlinear System Based on Volterra Model in Frequency Domain". *American Journal of Modeling and Optimization*, 1 (2), pp. 11-18.

-
10. Tikhonov, A.N., Arsenin, V.Y. (1979), *Methods for solving ill-posed problem*, Nauka, Moscow, 288 p.
11. Tikhonov, A.N., Goncharsky, A.V., Stepanov, V.V. and oth. (1983), *Regularizing algorithms and a priori information*. Nauka, Moscow, 200 p.
12. Pavlenko, S.V., Pavlenko, V.D. (2015), "Regularization of an Identification Procedure of Non-linear Systems in the Form of the Volterra Models", *Proceedings of the X International Conference "System Identification and Control Problems", SICPRO'15*, Moscow, January 26-29, 2015. Moscow: V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences RAN, pp. 230-238. ISBN 978-5-91450-162-1.
13. Pavlenko, S.V. (2010), "Application of wavelet filtering in the process of identification of nonlinear systems based on Volterra models", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Kharkiv, No 6/4(48), pp. 65-70.
14. Pavlenko, V., and Speransky, V. (2017). "Polyharmonic Test Signals Application for Identification of Nonlinear Dynamical System". *The Second IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo'2017)*, 11-15 September 2017 Odessa, Ukraine: Collection of Proceedings of the Scientific and Technical Conference. – Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, pp. 86-90.

Статью представил д-р техн. наук, проф. НТУ "ХПИ" Заковоротный А.Ю.

Поступила 15.09.2018

Pavlenko Vitaliy, Dr. Sci. Tech, Professor
Odessa National Polytechnical University
Ave. Shevchenko, 1, Odessa, Ukraine, 65044
tel./phone: (048) 705-8-436, e-mail: pavlenko_vitalij@ukr.net
ORCID ID: 0000-0002-5655-4171

Pavlenko Sergey, PhD, Senior Researcher
Odessa National Polytechnical University
Ave. Shevchenko, 1, Odessa, Ukraine, 65044
tel./phone: (098) 289-77-83, e-mail: psv85@yandex.ru
ORCID ID: 0000-0002-9721-136X

Lomovoy Vladimir, Magister
National University "Odessa Maritime Academy"
Str. Didrihsone, 8, Odessa, Ukraine, 65029
tel./phone: (063) 157-86-83, e-mail: lomovoy_vi@ukr.net
ORCID ID: 0000-0003-0864-3839

УДК 681.5.015.52

Обчислювальні засоби побудови моделей Вольтерра нелінійних динамічних систем в частотній області / Павленко В.Д., Павленко С.В., Ломовий В.І. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2018. – № 42 (1318). – С. 48 – 63.

Досліджується точність та обчислювальна стійкість методів детермінованої ідентифікації нелінійних динамічних систем у вигляді багатовимірних АЧХ та ФЧХ. Розглядаються апроксимаційні та інтерполяційні методи ідентифікації з використанням як тестових полігармонічних сигналів. Обчислювальна стійкість процедури ідентифікації забезпечується застосуванням методу регуляризації некоректних задач. Для згладжування оцінок отриманих характеристик використовується вейвлет-фільтрація. Іл.: 9. Табл.: 2. Бібліогр.: 14 назв.

Ключевые слова: нелінійні динамічні системи; методи ідентифікації; моделі Вольтерра; багатовимірні АЧХ і ФЧХ; регуляризація; вейвлет-фільтрація.

УДК 681.5.015.52

Вычислительные методы построения моделей Вольтерра нелинейных динамических систем в частотной области / Павленко В.Д., Павленко С.В., Ломовой В.И. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2018. – № 42 (1318). – С. 48 – 63.

Исследуется точность и вычислительная устойчивость методов детерминированной идентификации нелинейных динамических систем в виде многомерных АЧХ и ФЧХ. Рассматриваются аппроксимационный и интерполяционный методы идентификации с использованием в качестве тестовых полигармонических сигналов. Вычислительная устойчивость процедуры идентификации обеспечивается применением метода регуляризации некорректных задач. Для сглаживания оценок получаемых характеристик используется вейвлет-фильтрация. Ил.: 9. Табл.: 2. Библиогр.: 14 назв.

Ключевые слова: нелинейные динамические системы; методы идентификации; модели Вольтера; многомерные АЧХ и ФЧХ; регуляризация; вейвлет-фильтрация.

UDC 681.5.015.52

Computational tools for building Volterra models of nonlinear dynamic systems in the frequency domain / Pavlenko V.D., Pavlenko S.V., Lomovoy V.I. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2018. – №.42 (1318). – P. 48 – 63.

The accuracy and computational stability of deterministic identification methods for nonlinear dynamical systems in the form of multidimensional frequency characteristics of amplitude and phase are investigated. Approximation and interpolation methods of identification with use of test polyharmonic signals are considered. The computational stability of the identification procedure is provided by the method of regularization of ill-posed problems. Wavelet filtering is used to smooth the estimates of the obtained characteristics. Figs.: 9. Tabl.: 2. Refs.: 14 titles.

Keywords: nonlinear dynamical systems; methods of identification; Volterra model; multidimensional frequency characteristics of amplitude and phase; regularization; wavelet filtering.

УДК 515.12.

DOI: 10.20998/2411-0558.2018.42.13

А. Х. РАХМАТУЛЛАЕВ, доц., ТИИИМСХ, Ташкент,

М. А. ХИДОЯТОВА, асс., ТИИИМСХ, Ташкент

**НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА КОВАРИАНТНОГО ФУНКТОРА
 P : $COMP \otimes COMP$ ВЕРОЯТНОСТНЫХ МЕР,
ДЕЙСТВУЮЩЕГО НА КАТЕГОРИИ
СТРАТИФИЦИРУЕМЫХ ПРОСТРАНСТВ**

В данной статье изучены геометрические и топологические свойства функтора P вероятностных мер в категории стратифицируемых пространств и непрерывных отображений в себя. Доказывается, что пространство $P(X)$ вероятностных мер является $AE(S)$ пространством. Доказано, что функция обладает свойствами гиперсвязности и гипергеодезичности, эквисвязности. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: функтор; вероятностные меры; стратифицируемые пространства; гиперсвязность; гипергеодезичность; эквисвязность.

Подстановка проблемы. Ковариантный функтор вероятностных мер применяется при решении ряда задач прикладного характера. Однако, поскольку неизвестно, обладает ли функтор свойствами гиперсвязности, гипергеодезичности, эквисвязности, то область применения функтора весьма ограничена. Она бы существенно расширилась, если бы удалось доказать эти свойства функтора. В связи с этим актуально исследование пространств с применением ковариантного функтора P вероятностных мер.

Анализ литературы. В работе [1] имеются общее определение и общие свойства топологического пространства и вероятностных мер. В работе [2] определены нормальные ковариантные функторы категории компактов. В [3] даны свойства стратифицируемых пространств и приведены общие топологические свойства, а в работе [4] исследованы и рассмотрены функториальные свойства метризуемых и стратифицируемых пространств при действии ковариантных функторов. В работе [5] впервые рассмотрены ковариантные функторы, действующие в стратифицируемых пространствах, также в работе [6] приведены стратифицируемые пространства образов при непрерывных отображениях. В работе [7] исследованы ковариантные функторы конечной степени метризуемых и стратифицируемых пространств и получены соответствующие новые результаты. В работе [8] исследованы ковариантные функторы конечной степени, действующие на конечномерных пространствах, которые являются абсолютными

окрестностными ретрактами и изучены экстензорные свойства этих топологических пространств и рассмотрены некоторые геометрические свойства соответствующих пространств в рассматриваемых категориях.

Цель статьи – доказать следующие свойства ковариантного функтора P вероятностных мер, действующего на категории стратифицируемых пространств:

- для каждого S -пространства X -пространство $P(X)$ есть гиперсвязное пространство;
- для каждого S -пространства пространство $P(X)$ является $AE(S)$ пространством;
- для каждого S -пространства X -пространство $P(X)$ является гипергеодезическим пространством.

Пусть X компакт и P функтор вероятностных мер. $P(X)$ это выпуклое подпространство линейного пространства $M(X)$, сопряженное к пространству $C(X)$ всех непрерывных функции на X и неотрицательных функционалов μ (т.е. $\mu(\phi) \geq 0$ для всякой неотрицательной $\phi \in C(X)$) единичной нормы. $P(X)$ естественно вложено в $R^{C(X)}$, поэтому базу окрестностей меры $\mu \in P(X)$ образуют всевозможные множество вида:

$$O(\mu_1, \phi_1, \phi_2, \dots, \phi_k, \varepsilon) = \\ = \{\mu' \in P(X) : |\mu'(\phi_i) - \mu(\phi_i)| < \varepsilon, \quad i = \overline{1, k}, \quad \varepsilon > 0, \quad \phi_i \in C(X)\}.$$

Необходимые факты, относящиеся к ковариантным функторам и их свойства, можно найти в работах [1, 2].

Пусть $P: \text{Comp} \rightarrow \text{Comp}$ функтор вероятностных мер.

Пространство L называется эквисвязным, если существует непрерывное отображение $F: L \times L \times I \rightarrow L$ такое, что $F(a, b, 0) = a$, $F(a, b, 1) = b$ для всех $(a, b) \in L \times L$, где $t \in I = [0, 1]$. Отображение F называется эквисвязным отображением, L называется локально эквисвязным, если F определено для множеств $U \times I$, где U есть некоторая окрестность диагонали $L \times L$. Заметим, что подпространство

$P_\omega(X)$ пространства $P(X)$ эквисвязно, где $P_\omega(X) = \bigcup_{n=1}^{\infty} P_n(X)$,

$$P_n(X) = \{\mu \in P(X) : |\sup p\mu| \leq n\}.$$

Определение [3]. Пространство L называется гипергеодезическим, если существует отображение с условиями:

1) для $x, y \in L$ и $t \in I = [0, 1]$, $F(x, y, t) = x$, $F(x, y, 1) = y$ и $F(x, x, t) = x$;

2) для каждого $y \in L$, отображение $(x, t) \rightarrow F(x, y, t)$ из $L \times I$ в L непрерывно;

3) для каждой совокупности $x, y, a \in L$ и окрестности U точки y , существуют окрестности V точки a и W точки x (V и W зависят от точки x) такие, что $W \subset U$ и из $F(a, x, t) \in W$ вытекает $F(b, x, t) \in U$;

4) для каждого $x \in L$ существуют базы окрестностей $\{V_a\}$ и $\{U_a\}$ точки x , такие что $V_a \subset U_a$ для каждого a и из $y \in V_a$, $z \in U_a$ вытекает $F(z, y, t) \in U_a$ для каждого $t \in I$. Отображение F называется геодезическим отображением для L . L называется локально геодезическим, если определение верно для каждого $U \times I$, где U есть некоторая окрестность диагонали произведения $L \times L$.

Топологическое пространство L называется гиперсвязным (соответственно, m -гиперсвязным), если для каждого i существует отображение $h_i : L^i \times \sigma^{i-1} \rightarrow L$, удовлетворяющее следующим условиям а), в) и с) (соответственно, а), в) и d)):

а) Из $t \in \sigma^{i-1}$ и $t_i = 0$ вытекает $h_n(x, t) = h_{n-1}(\sigma_i x, \sigma_i t)$ для каждого $x \in L^n$ и $n = 2, 3, \dots$;

в) Для каждого $x \in L^n$ отображение $t \rightarrow h_n(x, t)$, отображающее множество σ^{n-1} в L непрерывно;

с) Для каждого $x \in L$ и окрестности U точки x , существует такая окрестность V точки x , что $\bigcup_{i=1}^{\infty} h_i(V^i \times \sigma^{i-1}) \subset U$ и $V \subset U$;

d) Для каждого $x \in L$ и окрестности U точки x существует такая окрестность V точки x , что $\bigcup_{i=1}^n h_i(V^i \times \sigma^{i-1}) \subset U$ и $V \subset U$.

Говорят, что пространство L является локально гиперсвязным, если, для каждой точки $x \in L$ существует окрестности V точки x , что V – гиперсвязно. Пространство L называется ∞ -гиперсвязным, если L является m -гиперсвязным для $m = 1, 2, \dots$; локальная ∞ -гиперсвязность определяется подобно.

$$\text{Здесь } \sigma^{n-1} = \left\{ t \in R^n : t = (t_1, t_2, \dots, t_n); \sum_{i=1}^n t_i = 1, t_i \geq 0 \right\} \quad - \quad (n-1)\text{-}$$

мерный симплекс, а $\sigma_i : A^n \rightarrow A^{n-1}$ отображение, определенное по формуле $\sigma_i(a_1, a_2, \dots, a_n) = (a_1, a_2, \dots, a_{i-1}, a_{i+1}, \dots, a_n)$, $i = \overline{1, n}$. т.е. σ_i – "забывающий" i -ую координату произведения. Через S обозначаются стратифицируемые пространства [4].

В работе [5] Коти доказано, что $X \in A(N)R(S)$ тогда и только тогда, когда X гиперсвязно (локально гиперсвязно).

Теорема 1. Для каждого S -пространства X -пространство $P(X)$ есть гиперсвязное пространство.

Доказательство. Для каждого натурального $n \in N$ построим отображение

$$h_n : P^n(X) \times \sigma^{n-1} \rightarrow P(X),$$

полагая
$$h_n((\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n); (t_1, t_2, \dots, t_n)) = \sum_{i=1}^n t_i \mu_i,$$

где σ^{n-1} – $(n-1)$ -мерный симплекс и $\mu_i \in P(X)$.

Очевидно, что $h_n((\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n); (t_1, t_2, \dots, t_n)) \in P(X)$. Теперь проверим, что отображение h_n удовлетворяет всем условиям в определении гиперсвязности [7, 8].

а) Пусть $t \in \sigma^{n-1}$ и $t_i = 0$ отсюда $h_n((\mu, t) = h_{n-1}(\delta_i \mu_i, \delta_i t)$,

где

$$\begin{aligned} \mu \in P^n(X). h_{n-1}(\delta_i \mu, \delta_i t) &= h_{n-1}((\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n) \times (t_1, t_2, \dots, t_n)) = \\ &= t_1 \mu_1 + t_2 \mu_2 + t_{i-1} \mu_{i-1} + 0 \cdot \mu_i + t_{i+1} \mu_{i+1} + t_n \mu_n = h_n(\mu, t). \end{aligned}$$

б) Пусть $\mu \in P^n(X)$. Отображение $T : t \rightarrow h_n(\mu, t)$ непрерывно. Зафиксируем

$$\begin{aligned} \mu = (\mu_1, \dots, \mu_n) \in P^n(X). T : \delta^{n-1} \rightarrow P(X), T(t^0) &= t_1^0 \mu_1 + t_2^0 \mu_2 + \dots + t_n^0 \mu_n = \mu^0, \\ \mu^0 \in U = 0(\mu^0 \mu_1, \dots, \mu_n, \varepsilon) \end{aligned}$$

и положим $a = \max\{\mu_i(\phi_i)\} \in V = 0(t^0, \sigma)$, где $\sigma = \frac{\varepsilon}{a \cdot n}$.

Возможны следующие случаи

1⁰ Если $a > 0$ и $t \in V$, $\mu = T(t) = \sum t_i \mu_i$, то

$$\begin{aligned} |\mu(\phi_i) - \mu^0(\phi_i)| &= \left| \sum (t_i(\mu_i) - t_i^0 \mu_i(\mu_i)) \right| = |t_1 - t_1^0| \mu_i(\phi_i) + \dots + |t_n - t_n^0| \mu_i \leq \\ &\leq \frac{\varepsilon}{a \cdot n} (a + a + \dots + a) = \frac{\varepsilon}{a \cdot n} \cdot \varepsilon \cdot n = \varepsilon. \end{aligned}$$

Отсюда $|\mu(\phi_i) - \mu^0(\phi_i)| < \varepsilon$. Следовательно, $\mu \in U$, $V \subset T^{-1}(U)$.

^{2°} Возьмём произвольную $\mu_0 \in P(X)$ и $\mu_0 \in U$, тогда $\mu_0 \in U = O(\mu_0, \mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n, \varepsilon)$.

Получим $V = U$, $\mu \in h_n(V^n \cdot \delta^{n-1})$. Отсюда $\mu = t_1 \mu_1 + t_2 \mu_2 + \dots + t_n \mu_n$, где $\mu_i \in V$.

Следовательно

$$|\mu(\phi_i) - \mu_0(\phi_i)| = |t_1 \mu_1(\phi_i) - \mu_0(\phi_i)| = \left| \sum_{i=1}^n t_i (\mu_i(\phi_i) - \mu_0(\phi_i)) \right| \leq \sum_{i=1}^n t_i \varepsilon = 1 \cdot \varepsilon = \varepsilon.$$

Отсюда $\mu \in U$. Следовательно $h_n(V^n \times \delta^{n-1}) \subset U$. Далее имеем:

$$\bigcup_{n=1}^{\infty} h_n(V^n \times \delta^{n-1}) \subset U.$$

Значит, пространство $P(X)$ есть гиперсвязное пространство.

Теорема 1 доказана.

В силу теоремы 1 и теоремы 4.1 [3] Борхеса получаем.

Теорема 2. Для каждого S -пространства пространство $P(X)$ является $AE(S)$ пространством.

Теорема 3. Для любого S -пространства X -пространство $P(X)$ является гипергеодезическим пространством.

Доказательство. Пусть X есть S -пространство. Построим отображение $H : P(X) \times P(X) \times [0, 1] \rightarrow P(X)$, полагая

$$H(\mu, \nu, t) = (1-t)\mu + t\nu, \text{ где } \mu \in P(X), \nu \in P(X), t \in [0, 1].$$

Теперь проверим требуемые условия:

^{1°} Для каждого $\mu, \nu \in P(X)$ и $t \in [0, 1]$ имеем

$$H(\mu, \nu, 0) = (1-0)\mu + 0 \cdot \nu = \mu,$$

$$H(\mu, \nu, 1) = (1-1)\mu + 1 \cdot \nu = \nu,$$

$$H(\mu, \nu, t) = (1-t)\mu + t \cdot \nu = \mu.$$

2⁰ Для каждой точки $n \in P(X)$ построим отображения $f : P(X) \times [0,1] \rightarrow P(X)$, $f(m, t) = H(m, n, t)$. Покажем, что отображение f непрерывно. Фиксируем $n \in P(X)$, $(m_0, t_0) \in P(X) \times [0,1]$, где $\mu_0 \in P(X)$, $t_0 \in [0,1]$.

Пусть $f(\mu_0, t_0) = (1-t)\mu_0 + t\nu = m_0$. Теперь возьмём произвольную окрестность $U = O(m_0, \phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n, \varepsilon)$ точки m_0 в $P(X)$. Положим $a = \max\{\nu(\phi_i)\}$, $\mu_0 \in V = O(m_0, \phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n, \frac{\varepsilon}{2})$ – окрестность точки μ_0 , $t_0 \in W = \{t : |t - t_0| < \delta\}$ – окрестность t_0 , где $\delta = \frac{\varepsilon}{\varepsilon + 2a}$. Покажем, что $(\mu_0, t_0) \in V \times W \subset f^{-1}(U)$.

Пусть $(\mu, t) \in V \times W$, $f(\mu, t) = (1-t)\mu + t\nu = m$.

Далее $|m(\phi_i) - m_0(\phi_i)| = |(1-t)\mu(\phi_i) + \nu(\phi_i) + (1-t_0)\mu_0(\phi_i) - t_0\nu(\phi_i)| <$

$$< (1 + (t - t_0))|\mu(\phi_i) - \mu_0(\phi_i)| + |t - t_0|\nu(\phi_i) < (1 + \delta)\frac{\varepsilon}{2} + \delta \cdot a =$$

$$= \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\delta}{2}(\varepsilon + 2a) = \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2(\varepsilon + 2a)}(\varepsilon + 2a) = \varepsilon.$$

Следовательно $|m(\phi_i) - m_0(\phi_i)| < \varepsilon$. Отсюда $m \in f^{-1}(U)$.

Условие 2 выполнено.

3⁰ Теперь положим $P(X) = L$. Пусть x, a, y произвольные точки пространства L , U произвольная окрестность точки y . Существует окрестность V точки a и окрестность W точки y такие, что $W \subset U$, $H(x, a, t) \in W$. Следовательно $H(x, a, t) \in U$, для любого $b \in V$, где $H(x, a, t) = (1-t)x + ta$. Положим $U = O(y, \phi, \dots, \phi_x, \varepsilon)$, $V = O(a, \phi, \dots, \phi_x, \varepsilon/2)$, $W = O(y, \phi_1, \phi_2, \dots, \phi_x, \varepsilon/2) \subset U$. Теперь проверим, что эти окрестности искомые, т.е. $H(a, x, t) \in W$, тогда и только тогда, когда $(1-t)a + tx \in W$. Это эквивалентно $|(1-t)a(\phi_i) + tx(\phi_i) - y(\phi_i)| < \varepsilon/2$. Возьмём произвольную точку $b \in V$ и положим $H(b, x, t) = (1-t)b + tx = \mu$:

$$\begin{aligned} |\mu(\phi_i) - y(\phi_i)| &= |(1-t)b(\phi_i) + tx(\phi_i) - y(\phi_i)| = \\ &= |(1-t)a(\phi_i) + tx(\phi_i) - y(\phi_i) + (1-t)(b(\phi_i) - a(\phi_i))| < \\ &< |(1-t)a(\phi_i) + tx(\phi_i) - y(\phi_i)| + (1-t)|a(\phi_i) - b(\phi_i)| < \\ &< \varepsilon/2 + (1-t)\varepsilon/2 < \varepsilon/2 + \varepsilon/2 = \varepsilon. \end{aligned}$$

Отсюда $\mu \in U$. Следовательно $H(b, x, t) \in U$.

⁴ Возьмём произвольную точку $x \in L$ и положим $V_\alpha = U_\alpha = O(x, \phi_1, \phi_2, \dots, \phi_x, \varepsilon)$. Для точки $y \in V_a$ имеем $|x(\phi_i) - y(\phi_i)| < \varepsilon$.

Для точки $z \in U_a$ имеем $|x(\phi_i) - z(\phi_i)| < \varepsilon$. Покажем, что $H(z, y, t) \in U_a$, $H(z, y, t) = m$:

$$\begin{aligned} |\mu(\phi_i) - x(\phi_i)| &= |(1-t)z(\phi_i) + ty(\phi_i) - x(\phi_i)| = \\ &= |(1-t)(z(\phi_i) - x(\phi_i)) + t(y(\phi_i) - x(\phi_i))| < (1-t)\varepsilon + t \cdot \varepsilon = \varepsilon. \end{aligned}$$

Отсюда $\mu \in U_a$. Следовательно, $H(z, y, t) \in U_a$. Теорема 3 доказана.

Выводы: полученные результаты показывают, что ковариантный функтор при определенных условиях обладает свойствами гиперсвязности, гипергеодезичности и эквисвязности, которые способствуют расширению области применения ковариантного функтора.

Настоящие результаты применяются в топологических исследованиях, функциональном анализе и теории вероятностных мер.

Список литературы:

1. Федорчук В.В. Общая топология. Основные структуры / В.В. Федорчук, В.В. Филиппов. – М.: Из-во МГУ, 1988. – 252 с.
2. Щепин Е.В. Функторы и несчетные степени компактов / Е.В. Щепин. – У.М.Н. – 1981. – Т. 36. – № 3. – С. 3-62.
3. Zhumaev E.E. Covariant Functors Finite Degree Anyumaed stratifiable spaces / E.E. Zhumaev, T.F. Zhuraev, K.R. Juvonov // Journal of Physical. – 2017. – Vol. 8. – № 4. – P. 1-3.
4. Zhuraev T.F. Functorial properties of Cauty S test construction on stratifiable spaces / T.F. Zhuraev // Scientific Bul. of the Tashkent state Pedagogical university. – 2014. – Vol. 1. – P. 66-75.
5. Жураев Т.Ф. Некоторые геометрические и топологические свойства ковариантных функторов конечной степени, действующих на категории стратифицируемых пространств / Т.Ф. Жураев, А.Х. Рахматуллаев // Scientific Bul. of the Tashkent state Pedagogical university. – 2017. – Т. 2. – № 11. – С. 2-6.
6. Guo B.L. Spaces of measures on stratifiable spaces / B.L. Guo, K. Sakai // Kobe J. Math. – 1991. – Vol. 12. – № 1. – P. 3-11.
7. Жураев Т.Ф. Некоторые основные свойства ковариантных функторов конечной степени в категории M -метризуемых и S_t -стратифицируемых пространств / Т.Ф. Жураев. – М.: 1992. – В книге "Общая топология. Пространства, отображения и функторы", С. 45-53.
8. Жураев Т.Ф. Ковариантные функторы конечной степени и $A(N)R(M)$ пространства / Т.Ф. Жураев // Natural and technical Science. – 2017. – С. 34-37.

References:

1. Fedorchuk, V.V., Filippov, V.V. (1988), *General topology. Basic structures*, Publishing MSU, Moscow, pp. 252.
2. Shchepin, E.V. (1981), "Functors and uncountable degrees of compacts", *Successes Math. of Science*, vol. 36, No. 3, pp. 3-62.
3. Zhumaev, E.E., Zhuraev, T.F., and Juvonov, K.R. (2017), "Covariant Functors Finite Degree Anyumaed stratifiable spaces", *Journal of Physical Math*, vol. 8, No. 4, pp.1-3.
4. Zhuraev, T.F. (2014), "Functorial properties of Cauty S test construction on stratifiable spaces ". *Scientific Bul. of the Tashkent state Pedagogical university*, vol. 1, pp. 66-75.
5. Juraev, T.F., and Rakhmatullaev, A.H. (2017), "Some geometric and topological properties of finite degree covariant functors acting on categories of stratified spaces", *Scientific Bul. of the Tashkent state Pedagogical university*, vol. 2, No. 11, pp. 2-6.
6. Guo, B.L., and Sakai, K. (1991), "Spaces of measures on stratifiables spaces", *Kobe J. Math*, vol. 12, No. 1, pp. 3-11.
7. Juraev, T.F. (1992), "Some basic properties of covariant functors of finite degree in the category M -metrizable and S -stratified spaces", In *"General topology. Spaces, mappings and functors"*, Moscow, pp. 45-53.
8. Juraev, T.F. (2017), "Covariant functors of finite degree and $A(N)R(M)$ spaces", *Natural and technical Science*, pp. 34-37.

Статью представил доктор ф.-м. наук, проф., зав. кафедры "Геометрия и топология" Узбекского Национального Университета, г. Ташкента Б.Р. Бешимов

Поступила (received) 11.11.2018

Raxmatullayev Alimbay Khasanovich
Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers
Higher mathematics,
Str. Kari Niyaziy, 39, Tashkent, Uzbekistan, 100000,
Tel: +99890 965 74 59 , e-mail: olimboy56@gmail.com
ORCID ID: 0000-0002-4542-1296

Hidoyatova Muyassar
Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers
Higher mathematics,
Str. Kari Niyaziy, 39, Tashkent, Uzbekistan, 100000,
Tel: +99894 694 32 23
ORCID ID: 0000-0002-4542-1397

УДК 515.12.

Деякі властивості коваріантного функтора $P: \text{COMP} \rightarrow \text{COMP}$ імовірнісних мір, чинного на категорії стратифіцируємих просторів / Рахматуллаєв А.Х., Хидоятова М.А. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2018. – № 42 (1318). – С. 64 – 72.

У даній статті вивчені геометричні і топологічні властивості функтора P імовірнісних мір в категорії стратифіцируємих просторів і безперервних відображень в себе. Доводиться, що простір $P(X)$ імовірнісних мір є $AE(S)$ простором. Доведено, що функція має властивості гіперсвязності і гіпергеодезичності, еквів'язність. Бібліогр.: 8 назв.

Ключові слова: функтор; імовірнісні міри; стратифіцируємих простір; гіперсвязність; гіпергеодезичність; еквів'язність.

УДК 515.12.

Некоторые свойства ковариантного функтора $P: \text{COMP} \rightarrow \text{COMP}$ вероятностных мер, действующего на категории стратифицируемых пространств / Рахматуллаев А.Х., Хидоятова М.А. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2018. – № 42 (1318). – С. 64 – 72.

В данной статье изучены геометрические и топологические свойства функтора P вероятностных мер в категории стратифицируемых пространств и непрерывных отображений в себя. Доказывается, что пространство $P(X)$ вероятностных мер является $AE(S)$ пространством. Доказано, что функция обладает свойствами гиперсвязности и гипергеодезичности, эквивязности. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: функтор; вероятностные меры; стратифицируемые пространства; гиперсвязность; гипергеодезичность, эквивязность.

UDC 515.12.

Some properties of the covariant functor $P: \text{COMP} \rightarrow \text{COMP}$ of probability measures that act on categories of stratified spaces / Raxmatullayev A.Kh., Hidoyatova M.A. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2018. – № 42 (1318). – P. 64 – 72.

In this article, we study the geometric and topological properties of the functor P of probability measures in the category of stratified spaces and continuous mappings into itself. It is proved that the space $P(X)$ of probability measures is $AE(S)$ space. It is proved that the function has the properties of connectivity and hyper geodesicity, connectivity. Refs.: 8 titles.

Keywords: functors; probabilities measures; stratifiable spaces; hyperconnected; hyper geodesicity; connectivity.

УДК 004.932.2

DOI: 10.20998/2411-0558.2018.42.15

Р. В. СІРЯК, здобув. СНУ ім. В. Даля, Сєвєродонецьк,
І. С. СКАРГА-БАНДУРОВА, д-р техн. наук, доц., зав. каф., СНУ
ім. В. Даля, Сєвєродонецьк

МОДЕЛЬ ОБРОБКИ ПОТОКОВИХ ДАНИХ ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ ОКРЕМИХ ОДИНИЦЬ ЖЕСТОВОЇ МОВИ

У статті розглянута задача розпізнавання окремих жестів рук, отриманих з вебкамери. Запропоновано модель обробки поточкових даних та розпізнавання жестів на відеозображеннях у вигляді 10-шарової згорткової нейронної мережі. За результатами оцінки якості моделі, отримана точність на тестовій множині склала 96%, значення функції втрати – 0.02. Результати перевірки показали, що модель є стійкою до відносно широких кутів обертання рук і є незалежною від освітлення, завдяки використанню контурів. Іл.: 3. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: модель; потокові дані; розпізнавання; жестова мова; згорткова нейронна мережа; контур.

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні роки, завдяки розвитку обчислювальних технологій, з'явилися нові можливості для реалізації раніше важкоздійснюваних проєктів по розпізнаванню образів. На даний момент, для розпізнавання візуальних образів найбільше використання отримали згорткові нейронні мережі (Convolutional Neuron Networks, CNN), рекурентні нейронні мережі (Recurrent Neuron Networks, RNN), мережі з довгою короткостроковою пам'яттю (Long Short-Term Memory, LSTM), їх комбінування та різні модифікації. Проте до недавнього часу для задач автоматичного розпізнавання мови жестів використовувався далеко не весь потенціал, який є сьогодні широко доступним.

Завдання розпізнаванням жестів пов'язані з великою різноманітністю проблем, що виникають кожного разу, коли необхідно розпізнати об'єкт, такий як оклюзія, зміни умов освітлення, неоднорідність та зміни фону. Оскільки, в даному випадку, задача полягає не тільки в тому, щоб знайти цільове зображення у будь який момент часу та відокремити його від фону, а також проаналізувати динамічні функції простору-часу, відстежити початок і кінець жесту в потоці наступних кадрів.

Залежно від підходів і цілей завдання розпізнавання жестів можуть вирішуватися різними методами. Так, в роботі [1] CNN використовується для вилучення ознак, а Randomized Decision Forest Classifier для сегментації зображення. В [2] використано моделі багат шарового та

багатомодального глибокого навчання. Комбінуючи дані RGBD з даними Upper-Body Skeletal Motion, CNN була успішно навчена 20 знакам італійської мови жестів. Слід, однак, зауважити, що дана техніка не призначена для використання поза приміщенням. Автори [3] використовували CNN разом з Microsoft Kinect для розпізнавання мови жестів американської англійської мови. Отримана точність алфавітних і числових знаків склала відповідно 82,5% та 97%. В роботі [4] для розпізнавання жестів була використана 3D CNN, в якій витягувалися як просторові, так і часові ознаки, фіксуючи інформацію про рух і кодуючи її в сусідніх кадрах. Автори [5] поєднали у своїй роботі 3D CNN і мультипотокową LSTM-RNN для визначення жестів та їх класифікації. В результаті такої комбінації стало легше обробляти зміни рухів. Значних успіхів здобули автори [6], використовуючи для розпізнавання італійської мови жестів CNN і Microsoft Kinect. Автори досліджували п'ять різних архітектур глибокого навчання і прийшли до висновку, що двонаправлене повторення і часова згортка можуть істотно поліпшити розпізнавання жестів. Майже всі дослідники повідомляють про отримання високих показників точності на рівні від 77,5% [7] до 97% [3, 5, 8]. На відміну від більшості реалізованих проєктів, загальною метою нашого проєкту є розробка методу комп'ютерного бачення, здатного розпізнавати жести української мови за допомогою смартфонів, щоб використовувати жести для взаємодії з додатком. Враховуючи вищевикладене, варто відзначити, що на даний момент, універсального підходу, який працює з високою швидкістю і точністю розпізнавання при будь-яких умовах, і може бути використовуваним в смартфонах не існує. Автори останньої публікації, присвяченої розпізнаванню жестів за допомогою смартфонів [8], наголошують на необхідності підвищення точності процесу локації. Візуальні засоби, що використовують відеокамери смартфонів дають високу точність розпізнавання, проте сильно залежать від зміни освітлення. Застосування кольорових міток допомагає усунути цю проблему, але є неприродним і незручним для повсякденного життя. Використання спеціально обладнаних рукавичок допомагає з високою точністю визначити ознаки руки, але також є незручним засобом взаємодії з комп'ютером, і, до того ж, досить дорогим. Нарешті, тривимірні сенсори, будучи абсолютно незалежними від зміни освітлення, дозволяють легко знаходити ключові ознаки і локації руки, але дають досить низькі показники розпізнавання.

Метою статті є представлення розробленої моделі для обробки поточкових даних та розпізнавання жестів на відеозображеннях, як основи для створення системи розпізнавання жестової мови за допомогою

смартфонів, здатної ефективно оперувати в різних середовищах відносно освітлення та кутів обертання рук.

Основна частина. Модель пропонованої згорткової нейронної мережі надано на рис. 1.

Дана мережа містить 10 шарів. До трьох згорткових шарів застосовуються відповідно 16, 32 і 64 згортальних ядра з встановленим режимом valid. Функцією активації є Rectified Linear Unit (ReLU)

$$f(x) = \max(0, x). \quad (1)$$

За кожним згортковим шаром іде шар max-pooling розміром 2×2 з кроком в один піксель. Після чого, дані в шарі flatten перетворюються з 2D-представлення в одновимірний вектор, і в кінці проходять через два повнозв'язних шари dense. Другий повнозв'язний шар з функцією softmax, що перетворює вектор дійсних чисел в вектор ймовірностей, є вихідним і містить softmax-класифікатор з трьома класами. Мережа навчалася з використанням категорійної функції втрат ентропії.

Для вирішення завдання розпізнавання окремих жестів створено власний набір зображень рухів рук, що був використаний для навчання та перевірки тестових наборів. Набір зображень, отримано зі звичайної веб-камери, що знімала кожен окремий жест з періодичністю 3 мс. У створюваному наборі руки мали колір шкіри європеїда.

Світло розсіяне електричне з підстроюванням положення камери під найменший контраст між ділянками світлих і темних ділянок шкіри. Робота була виконана на двоядерному процесорі i3-7100.

Технологія розпізнавання жестів містить три основних етапи: (1) сегментація руки, (2) витяг ознак з отриманого регіону, (3) класифікація жестів.

На першому етапі отримані зображення розміром 200×200 пікселів переводилися в чорно-білий формат і піддавалися впливу фільтра Гаусова розмиття для видалення шуму [9]. Для реалізації даного фільтра використано функцію GaussianBlur бібліотеки OpenCV [10]. Після цього до них застосовувався алгоритм адаптивної порогової обробки для виділення контурів.

В даному випадку використовувалася ще одна функція бібліотеки OpenCV adaptiveThreshold.

В результаті, було отримано однотонні зображення розмірності $200 \times 200 \times 1$, що несуть інформацію про руку, яка демонструє один з жестових знаків.

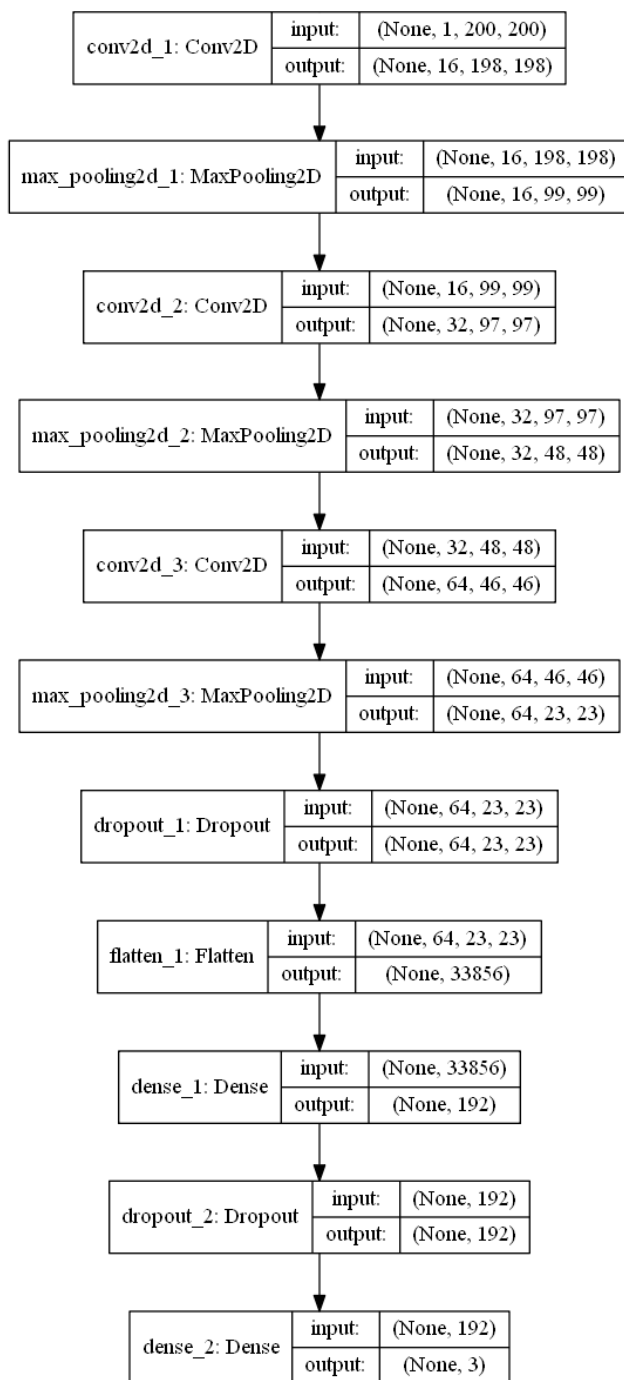


Рис. 1. Модель згорткової нейронної мережі для розпізнавання окремих одиниць жестової мови

Етап 2, витяг ознак, проводився за допомогою розробленої згорткової нейронної мережі (рис. 1). У процесі навчання нейронна мережа визначала особливості, характерні для кожного класу. Імовірність приналежності даних до класу реалізується функцією активації softmax, що перетворює вихідний сигнал останнього шару в розподіл імовірності між 0 і 1. Розмір вектора, що надходить у softmax, дорівнює кількості класів, представлених у моделі та зв'язок між функцією й розподілом імовірності рухів жестів, сформульованих як лінійна функція

$$z = W^T \cdot x + b, \quad (2)$$

де W^T позначає 2D-фільтр; $x \in R^{D \times 1}$ вхідна характеристика; $z \in R^{C \times 1}$ – змінна, що описує розподіл; C – кількість типів (класів) рухів жестів.

Значення i -го виходу в softmax визначається за формулою

$$y_i = \frac{e^{z_i}}{\sum_{j=1}^n e^{z_j}}, \quad (3)$$

де z_i – це i -й елемент z , а $y = [y_1, y_2, \dots, y_c]^T$ – це вихід рівня softmax класифікатора.

На етапі класифікації, для запобігання перенавчання використовувалась функція dropout. Також, для зниження ймовірності перенавчання, штучного збільшення даних і забезпечення інваріантності класифікатора до трансформацій було застосовано Data Augmentation. Через функцію Keras fit_generator генерувалися додаткові дані з вихідного набору за допомогою афінних перетворень обертання, зрушення і зміни масштабу вихідних зображень.

В якості метода оптимізації обрано оптимізації adaptive moment estimation (adam). Adam використовує як середні значення градієнтів, так і другі імпульси градієнтів, що запобігає потраплянню в локальний мінімум. Нижче надано формулу, в якій m_t вираховує перший імпульс, а v_t – другий:

$$\begin{aligned} m_t &= \beta_1 m_{t-1} + (1 - \beta_1) g_t, \\ v_t &= \beta_2 v_{t-1} + (1 - \beta_2) g_t^2. \end{aligned} \quad (4)$$

Результати. Для перевірки якості навчання використовувалася метрика ассюрасу, тобто, відношення кількості правильно передбачених значень до загальної кількості всіх відповідей. В якості функції втрати використовувалася категоріальна перехресна ентропія, тобто вираховувалася логарифмічна втрата на кілька представлених класів.

Якщо передбачені моделлю значення дорівнюють q , в той час як справжні значення дорівнюють p , то категоріальна перехресна ентропія буде виглядати як

$$\mathcal{L}(p, q) = - \sum_x p(x) \log (q(x)). \quad (5)$$

На рис. 2 показано зміну показника асигасу на навчальній і валідаційній вибірках протягом 50-и епох. На рис. 3 показано зміна значення функції втрат за той же період.

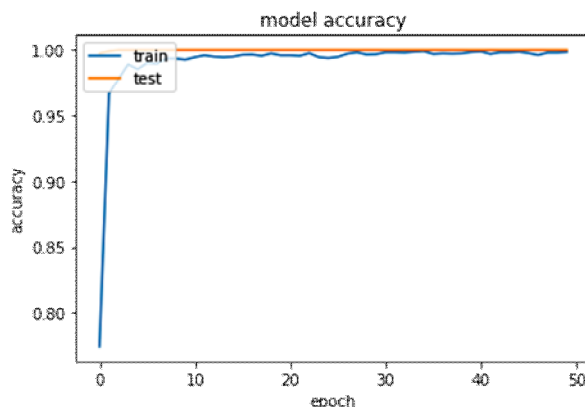


Рис. 2. Точність моделі для тренувального та тестового наборів

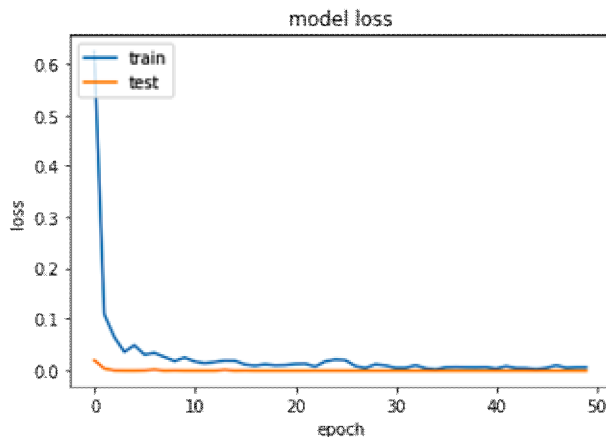


Рис. 3. Графік функції втрат для для тренувального та тестового наборів

Враховуючи той факт, що дослідження проводилися на двоядерному i3-7100 процесорі з використанням простої веб-камери отримано високий ступінь вірних прогнозів. В результаті роботи мережі досягнуто точність на тестовій множині в 96%, а значення функції втрати – 0.02.

Висновки. Розроблена модель відповідає основним принципам побудови згорткових нейронних мереж і дозволяє відстежувати і розпізнавати окремі жести у відеопотоці з високою якістю. Її точність розпізнавання з власним набором даних не гірша, ніж у відомих. Разом з тим, на відміну від існуючих, завдяки використанню контурів, модель є стійкою до відносно широких кутів обертання рук і незалежною від освітлення. При цьому, для ефективної роботи достатньо стандартної веб-камери. Серед недоліків моделі варто відзначити, що вона є не ефективною на неоднорідному зміненому фоні, і жести рук людей, які не брали участь у створенні набору даних, можуть бути гіршими. У наступному ми плануємо збільшити кількість та види впізнаваних жестів, та маємо намір поліпшити запропоновану мережу. Для розпізнавання складніших жестів до CNN буде доданий рекурентний блок. Планується розробити також засоби для поліпшення якості розпізнавання в умовах різномірного фону.

Список літератури:

1. *Tompson J.* Real-time continuous pose recovery of human hands using convolutional networks / *J. Tompson, M. Stein, Y. LeCun, K. Perlin* // ACM Transactions on Graphics (ToG). – 2014. – Vol. 33 (5). – P. 169-173.
2. *Neverova N.* Multi-scale deep learning for gesture detection and localization / *N. Neverova, C. Wolf, G.W. Taylor, F. Nebout* // Computer Vision – ECCV 2014 Workshops. ECCV. Lecture Notes in Computer Science. – 2014. – Vol. 8925. – P. 474-490.
3. *Bheda V.* Using deep convolutional networks for gesture recognition in american sign language / *V. Bheda, D. Radpour* // CoRR, abs/1710.06836. – 2017. – P. 1-5.
4. *Ji S.* 3D convolutional neural networks for human action recognition / *S. Ji, W. Xu, M. Yang, K. Yu* // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 2013. – Vol. 35 (1). – P. 221-231.
5. *Nishida N.* Multimodal gesture recognition using multi-stream recurrent neural network / *N. Nishida, H. Nakayama* // Image and Video Technology. PSIVT 2015. Lecture Notes in Computer Science. – 2015. – Vol. 9431. – P. 682-694.
6. *Pigou L.* Sign language recognition using convolutional neural networks / *L. Pigou, S. Dieleman, P.-J. Kindermans, B. Schrauwen* // Computer Vision – ECCV 2014 Workshops. ECCV 2014. Lecture Notes in Computer Science. – 2014. – Vol. 8925. – P. 572-578.
7. *Molchanov P.* Hand gesture recognition with 3D convolutional neural networks / *P. Molchanov, S. Gupta, K. Kim, J. Kautz* // 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW). – 2015. – P. 1-7.
8. *Alashhab S.* Hand gesture detection with convolutional neural networks / *S. Alashhab, A.-J. Gallego, M.Á. Lozano* // Advances in Intelligent Systems and Computing – 2018. – P. 45-52.
9. *Сиряк Р.В.* Технологии идентификации и распознавания жестов / *Р.В. Сиряк* // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2017. – № 8 (238). – С. 79-85.
10. Open Source Computer Vision: Library [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [www URL: https://opencv.org/](http://www.url: https://opencv.org/) (accessed 23.10.2018).

References:

1. Tompson, J., Stein, M., LeCun, Y. and Perlin, K. (2014), "Real-Time Continuous Pose Recovery of Human Hands Using Convolutional Networks", *ACM Transactions on Graphics (ToG)*, Vol. 33 (5), pp. 169.
2. Neverova, N., Wolf, C., Taylor, G.W. and Nebout, F. (2014), "Multi-Scale Deep Learning for Gesture Detection and Localization", In: Agapito L., Bronstein M., Rother C. (eds) *Computer Vision – ECCV 2014 Workshops. ECCV. Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 8925, pp. 474-490.
3. Bheda, V. and Radpour, D. (2017), "Using Deep Convolutional Networks for Gesture Recognition in American Sign Language", In: *CoRR*, *abs/1710.06836*, pp. 1-5.
4. Ji, S., Xu, W., Yang, M. and Yu, K. (2013), "3D Convolutional Neural Networks for Human Action Recognition", *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, Vol. 35 (1), pp. 221-231.
5. Nishida, N. and Nakayama, H. (2015), "Multimodal Gesture Recognition Using Multi-Stream Recurrent Neural Network", In: Bräunl T., McCane B., Rivera M., Yu X. (eds) *Image and Video Technology. PSIVT 2015. Lecture Notes in Computer Science*, Vol 9431, pp. 682-694.
6. Pigou, L., Dieleman, S., Kindermans, P.-J., and Schrauwen, B. (2014), "Sign Language Recognition Using Convolutional Neural Networks", In: Agapito L., Bronstein M., Rother C. (eds) *Computer Vision – ECCV 2014 Workshops. ECCV 2014. Lecture Notes in Computer Science*, Vol 8925, pp. 572-578.
7. Molchanov, P., Gupta, S., Kim, K., and Kautz, J. (2015), "Hand Gesture Recognition with 3D Convolutional Neural Networks", *2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*, pp. 1-7.
8. Alashhab, S., Gallego, A.-J., and Lozano, M.Á. (2018), "Hand Gesture Detection with Convolutional Neural Networks", *Advances in Intelligent Systems and Computing*, pp. 45-52.
9. Siryak, R.V. (2017), "Gesture Identification and Recognition Techniques", *Herald of Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, no. 8 (238), pp. 79-85.
10. Open Source Computer Vision Library, available at: <https://opencv.org/> (accessed 23 October 2018).

Статтю представив д.т.н., проф. Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" А.Е. Філатова

Надійшла (received) 16.11.2018

Siryak Rostislav, Ph.D. student
Volodymyr Dahl East Ukrainian National University
59-a Central Avenue, Severodonetsk, Luhansk region, Ukraine, 93400
tel./phone: (064) 522-89-97, e-mail: hashem.r@gmail.com
ORCID ID: 0000-0002-6775-1218

Skarga-Bandurova Inna, D.Sci.Tech., Professor
Volodymyr Dahl East Ukrainian National University
59-a Central Avenue, Severodonetsk, Luhansk region, Ukraine, 93400
tel./phone: (064) 522-89-97, e-mail: skarga_bandurova@ukr.net
ORCID ID: 0000-0003-3458-8730

УДК 004.932.2

Модель обробки поточкових даних для розпізнавання окремих одиниць жестової мови / Сіряк Р.В., Скарга-Бандурова І.С. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2018. – № 42 (1318). – С. 73 – 81.

У статті розглянута задача розпізнавання жестів рук, отриманих з вебкамери. Запропоновано модель обробки поточкових даних на відеозображеннях у вигляді 10-шарової згорткової нейронної мережі. За результатами оцінки якості, отримана точність на тестовій множині склала 96%, значення функції втрати 0.02. Результати перевірки показали, що модель є стійкою до відносно широких кутів обертання рук і є незалежною від освітлення, завдяки використанню контурів. Іл.: 3. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: модель, потокові дані; розпізнавання; жестова мова; згорткова нейронна мережа; контур.

УДК 004.932.2

Модель обработки потоковых данных для распознавания отдельных единиц жестового языка / Сиряк Р.В., Скарга-Бандурова И.С. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2018. – № 42 (1318). – С. 73 – 81.

В статье рассмотрена задача распознавания жестов рук, полученных с вебкамеры. Предложена модель обработки потоковых данных видеоизображения в виде 10-слойной сверточной нейронной сети. По результатам оценки качества, полученная точность на тестовом множестве составила 96%, значение функции потери 0.02. Результаты проверки показали, что модель устойчива к относительно широким углам вращения рук и мало зависит от освещения. Ил.: 3. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: модель; потоковые данные; распознавание; жестовый язык; сверточная нейронная сеть; контур.

UDC 004.932.2

A model for processing stream data for the recognition of individual units of the sign language / Siryak R.V., Skarga-Bandurova I.S. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2018. – № 42 (1318). – P. 73 – 81.

The paper deals with the problem of recognizing the single hand gestures received from a webcam. The model for processing of stream data and recognition of gestures from video images in the form of a 10-layer convolutional neural network is proposed. As a result of the model quality evaluation, the accuracy obtained on the test set was 96%, the value of the loss function 0.02. The results of the test showed that the model is resistant to relatively wide angles of hand rotation and is independent of light, due to the use of contours. Figs.: 3. Refs.: 10 titles.

Keywords: model; data stream; recognition; sign language; convolutional neural network; contour.

UDC 514.8

DOI: 10.20998/2411-0558.2018.42.16

V. I. *TIKHONOV*, Dr. of Tech. Sciences, Prof. "ONAT", Odessa,

O. V. *TYKHONOVA*, teacher "ONAT", Odessa

COGNITIVE TENSOR MODEL OF A SYSTEM BASED ON VON NEUMANN CLASSES

The paper focuses issues of tensor calculus study in technical universities. To promote a holistic insight on tensors by undergraduates, there proposed a cognitive tensor model of a physical system on the base of hierarchical John Von Neumann classes. Refs.: 23 titles.

Keywords: cognitive tensor model; physical system; Neumann classes.

1. Introduction. The problem statement. System tensor modeling plays an important role in various fields of theoretical science and applied researches. The concept of tensor goes back to Riemann's ideas of non-Euclidean geometry on curved smooth surfaces presented in 1854 [1]. Tensor calculus itself was introduced by Ricci-Curbastro (Italy) in 1887 primarily as extension of vectors [2], and further developed by his student Levi-Civita ([3], 1899).

The tensor method of Ricci-Curbastro/Levi-Civita latter found its application in general relativity theory (GRT) coauthored by A. Einstein and M. Grossman in 1913 [4]. In subsequent decades, tensor analysis penetrated other areas, and now included in advanced academic courses at technical universities and engineering high schools [5 – 12]. Students often seem aware of tensor's importance, though, unless engaged in a dedicated course, tensor remains covered in a veil of mystery [10].

An adequate insight of tensor by undergraduate students meets two major issues: *firstly*, the lack in a clear presentation of tensors tied to what students already know from other courses, such as vector algebra; *secondly*, the use of cumbersome tensor notation and construction rules for high rank tensors [10].

In this work, typical approaches considered towards introduction the category of tensor in technical universities. Diverse alternative points of view in understanding tensors have been studied, as well as logical aspects of "tensor calculus architecture" cleared up. To our mind, a major challenge in tensors perception by undergraduates is a seamless transition from intuitively known "geometric vectors" to the core formalism of tensor calculus, i.e. to the first rank covariant and contravariant tensors which are basic terms in various high rank tensor forms.

Tensor analysis is a truly novel holistic insight on our world which

extends far beyond traditional distinct academic disciplines like physics, geometry, algebra etc. To understand complex tensors in geometrical interpretation as abstract spatial forms (or spaces) with unusual properties, our theoretical and empirical knowledge must be crucially rethought.

A cognitive point of view on matter is about to recognize that spatial structure of the world is not more than an individual model of a local physical environment which is perceived through human sensations and/or various instruments of observation. Thus, no "absolute space" exists, and none "objective coordinate" can be measured for "a point" or "vector" in either physical or geometrical orthonormal coordinate basis.

For this reason, with respect to tensors, the notorious question arises again. What comes first – matter or consciousness? In other words, what is primarily predetermined in a formal theory (physical experiment or its geometrical model, vector as object or vector space, tensor as geometrical image or tensor as an abstract algebraic coordinate form)? Without convincing and consistent logical doctrine, most academic tutorials on tensor analysis run the risk of being incomprehensible to the target audience.

Numerous attempts at constructive introduction to tensor analysis for students of technical universities, as well as obvious difficulties in understanding this discipline, once again reflected the known problem of axiomatic foundation of mathematics. This problem is usually associated with Cantor's set theory (also known as "naïve" set theory) introduced by German mathematician Georg Cantor in 1879 – 1883 [13].

The Cantor's set theory became a common axiomatic platform of classic functional analysis, and still, remains a fundamental universities course, though sharp discussions on this theory triggered since end of XIX century. Actually, the Cantor's "naïve" set theory was designed as a "flat" (or single-level) formal grammar, where all the terms blend into one layer framework without any hierarchical subordination. Because of this, the "naïve" set theory is experiencing internal contradictions. Philosophers and mathematicians of 19 – 20 centuries (Bertrand Russell, J. Von Neumann, Kurt Gödel, Paul Bernays, and others) discovered some logical problems caused due to the Cantor's set theory.

Bertrand Russell pointed at one of those problems in 1901 (aka "Russell's paradox" or Russell's antinomy [14]. In simple words, the "Russell's paradox" sounds as a rhetorical question ("is the set of all sets a subset of itself?") for which neither "yes" nor "no" are right answers.

The same paradox was earlier discovered by E. Zermelo (1899), but not published. At the end of the 1890s G. Cantor himself realized the cognitive issues of his set theory [15].

The nature of mentioned above logical issues and paradoxes is that average human brain needs some explicit hierarchy of terms and notions for clear perception a complex logical construction. In fact, the underlying background of any serious formal theory should rely on statistics retrieved from empirical data.

Therefore, the axiomatic foundation of a well-tailored theory is a particular delicate shell of empirical knowledge that accumulates and reflects previous experience. And if the axiomatic background of a theory is not enough clear and transparent for target audience, then the whole building of abstract theory will inevitably fall apart, no matter how beautiful and strict there seemed the theory itself.

An outstanding result in radical rethinking the overall framework of math theory and its axiomatic basis for a physical system was exhibited by the greatest physicist and mathematician of the 20th century J. Von Neumann in his work on math foundation of quantum mechanics ([15], 1927). To design a consistent math model of quantum mechanics system, Neumann had to additionally create a fundamentally new set theory based on a multilevel class hierarchy (von Neumann classes) as an alternative to Cantor's single-level set theory ([16], 1928).

The essence of Neumann's class theory is that various "sets" in the formal theory are divided into hierarchy classes, forming a multi-level logical scheme of concepts. New terms of theory are built as functions of subordinated argument-terms, and the rank of a new function-term is determined by the highest rank among the argument-terms. No recursive definitions of terms are admitted (such as "set of all sets" in Russell's paradox mentioned above).

By the middle of the 20th century, joint efforts of J. Von Neumann, K. Gödel and P. Bernays, resulted in a coherent axiomatic basis for the set theory (aka NGB axioms [17], 1954). Despite NGB axioms issued about 70 years ago, many conventional courses on functional analysis are still based on the "naïve" set theory of G. Cantor ([18 – 20]).

The careful consideration of tensor methodology exhibited in university textbooks, indicates similar problems of cognitive nature, tied to non-classified "flat" categorization of different terms like "vector", "space", "tensor" etc. while introducing the terminology and formalisms of tensor calculus.

On this premise, the axiomatic foundation of tensor analysis is not accomplished yet, and therefore, new researches in this realm needed.

2. Related publications survey. Objectives. In this section, some common undergraduate tutorials on tensors issued in English within 2002 – 2016, are discussed.

Reference 1.

Consider the introduction to tensors for students of physics and engineering in NASA Glenn research center, Ohio ([5], 2002). Have a look at pages 4/8 and 5/9 of the text (where the first number "4" means the page number in content table, while the second number "8" means related page in "pdf" file). The given text claims the following:

Page 4/8:

- Scalar: *Tensor of rank 0.* (magnitude only – 1 component)
- Vector: *Tensor of rank 1.* (magnitude and one direction – 3 components)

This terminology is suggestive. Why stop at rank 1? Why not go onto rank 2, rank 3, and so on.

- Dyad: *Tensor of rank 2.* (magnitude and two directions – $3^2 = 9$ components)
- Triad: *Tensor of rank 3.* (magnitude and three directions – $3^3 = 27$ components)
- Etcetera...

Page 5/9:

In constructing a dyad product from two vectors, we form the term-by-term product of each of their individual components and add. If $\mathbf{U}$ and $\mathbf{V}$ are the two vectors under consideration, their *dyad product* is simply $\mathbf{UV}$. The dyad product $\mathbf{UV}$ is *neither a dot nor a cross product*. It is a distinct entity unto itself. If $\mathbf{U} = u_1\mathbf{i} + u_2\mathbf{j} + u_3\mathbf{k}$ and $\mathbf{V} = v_1\mathbf{i} + v_2\mathbf{j} + v_3\mathbf{k}$, then

$$\mathbf{UV} = u_1v_1\mathbf{ii} + u_1v_2\mathbf{ij} + u_1v_3\mathbf{ik} + u_2v_1\mathbf{ji} + \dots$$

where $\mathbf{i}$, $\mathbf{j}$, and $\mathbf{k}$ are unit vectors in the usual sense and $\mathbf{ii}$, $\mathbf{ij}$, $\mathbf{ik}$, etc. are unit dyads. In forming the product $\mathbf{UV}$ above, we simply "did what came naturally" (a favorite phrase of another of my professors!) from our knowledge of multiplying polynomials in elementary algebra. Notice that, by setting $u_1v_1 = \mu_{11}$, $u_1v_2 = \mu_{12}$, etc., this dyad can be rewritten as

$$\mathbf{UV} = \mu_{11}\mathbf{ii} + \mu_{12}\mathbf{ij} + \mu_{13}\mathbf{ik} + \mu_{21}\mathbf{ji} + \dots$$

Our remarks on the file [5] are the following.

1) Neither previously in the [5] nor in this text fragment of [5], the operations like $\mathbf{ii}$, $\mathbf{ij}$ are defined. Suppose that unitary vector dyads $\mathbf{ii}$, $\mathbf{ij}$ are scalar product multiplication, then must be: $\mathbf{ii} = 1$, $\mathbf{ij} = \cos \varphi(\mathbf{i}, \mathbf{j})$, etc. Because of that, the dyad $\mathbf{UV}$ must result in a single number.

2) The only formal definition in [5] for a tensor of rank n is brought above (scalar – 0 rank tensor, vector – 1 rank tensor, dyad – 2 rank tensor, triad – 3 rank tensor etc.).

Reference 2.

The advanced version of [5] is "Foundations of Tensor Analysis for Students of Physics and Engineering" ([6]), which was published by the NASA Glenn research center in 2005.

Page 11/17 in [6] says:

Multiplication.—As with vector multiplication, dyad multiplication may take one of several forms. The dyad products to be examined in the following sections are the inner product, the cross product, the product of a dyad and a scalar, and the direct product of two dyads.

Our remarks on the file [6] are the following.

1) Here introduced 4 special types of "dyad multiplications" (or "dyad products"): "inner product", "cross product", "product of dyad and scalar", "direct product of two dyads".

2) On the other hand, in mathematics also know very similar terms like "dot product", "scalar product", "inner product", "outer product of vectors", "vector product", "cross product", "dyad product", "scalar multiplication", "vector multiplication" etc. [21]. Such collection of similar terms seems to be over complicated and surplus for consistent definition the tensor entity.

3) In the content table of [6] the first mention of tensor is:

"Metric or Fundamental Tensor 24" I means, that "tensor" is not introduced formally as itself.

Reference 3.

"Tensors and their applications", Azad Inst. of technology (India), 2006 [7]. The Preface of this file on page /10 says: A quantity having magnitude only is called "scalar" and a quantity with magnitude and direction both, called "vector". But certain quantities are associated with two or more directions; such a quantity is called "tensor".

Next, page 6/23 of [7], section "Tensor algebra" says:

2.1 INTRODUCTION

A scalar (density, pressure, temperature, etc.) is a quantity whose specification (in any coordinate system) requires just one number. On the other hand, a vector (displacement, acceleration, force, etc.) is a quantity whose specification requires three numbers, namely its components with respect to some basis. Scalars and vectors are both special cases of a more general object called a tensor of order n whose specification in any coordinate system requires 3^n numbers, called the components of tensor. In fact, scalars are tensors of order zero with $3^0 = 1$ component. Vectors are tensors of order one with $3^1 = 3$ components.

Page 7/24 says:

2.3 COVARIANT AND CONTRAVARIANT VECTORS (TENSOR OF RANK ONE)

Let $(x^1, x^2, \dots, x^n)$ or x^i be coordinates of a point in X -coordinate system and $(\bar{x}^1, \bar{x}^2, \dots, \bar{x}^n)$ or $\bar{x}^i$ be coordinates of the same point in the Y -coordinate system.

Let A^i , $i = 1, 2, \dots, n$ (or $A^1, A^2, \dots, A^n$) be n functions of coordinates $x^1, x^2, \dots, x^n$ in X -coordinate system. If the quantities A^i are transformed to $\bar{A}^i$ in Y -coordinate system then according to the law of transformation

$$\bar{A}^i = \frac{\partial \bar{x}^i}{\partial x^j} A^j \quad \text{or} \quad A^j = \frac{\partial x^j}{\partial \bar{x}^i} \bar{A}^i$$

Then A^i are called components of contravariant vector.

Similarly, covariant tensors of rank 1 are introduced in [7]. Our remark on the file [7] is: The two coordinate systems are used (X and Y) which are not explicitly bound herewith in declarations.

Reference 4.

"Introduction to vectors and tensors", Houston, Texas, 2010 [8].

Consider the terminology used in the file [8].

Page /5: "Intersection", "Sum", "Direct Sum of Subspaces", "Factor Spaces", "Inner Product Spaces", [Reciprocal Basis].

Page 62/: "The factor space is also called a quotient space".

Page 76/ "Reciprocal Basis"(an analog of dual basis).

Page 158/166: "Spectral Decomposition for Hermitian Endomorphisms"

$$\mathbf{U} = (\mathbf{A}^* \mathbf{A})^{1/2} = \sum_{j=1}^L \lambda_j^{1/2} \mathbf{P}_j$$

Section 31. Linear Functions, the Dual Space.

Page 203/211: vector in a space itself vs. covector in a dual space.

Section 32. The Second Dual Space, Canonical Isomorphisms.

Section 33. Multilinear Functions,

Tensors, page 218/226:

More specifically, a *tensor of order* (p, q) on $\mathcal{V}$, where p and q are positive integers, is a $(p+q)$ -linear function

$$\underbrace{\mathcal{V}^* \times \dots \times \mathcal{V}^*}_{p \text{ times}} \times \underbrace{\mathcal{V} \times \dots \times \mathcal{V}}_{q \text{ times}} \rightarrow \mathcal{R}$$



Our remark on the file [8] is: that was the first mention of "tensor" in the content table (it is straight multi rank tensor).

Tutorial reference 5.

"Tensors: A guide for undergraduate students", 2013 [9].

Page 498/2: "A guide on tensors is proposed for undergraduate students in physics or engineering that ties directly to vector calculus in orthonormal coordinate systems. We show that once orthonormality is relaxed, a dual basis,

together with the contravariant and covariant components, naturally emerges. Manipulating these components requires some skill that can be acquired more easily and quickly once a new notation is adopted".

Consider terminology: Page 499/3:

"Between any two vectors is defined a dot (or scalar) product, a commutative rule that associates a real number to each pair of vectors". "In the 3D space, a cross (or vector) product is defined".

Consider definition of tensor.

Page 500/4:

jectivity character we are after. Quantities with such a character and defined in an N -dimensional space are called *tensors* and, more specifically, r th-rank tensors if they have N^r components. Scalars, being single-component quantities, are then zero-rank tensors, while vectors, being N -component quantities, are first-rank tensors. Higher-rank tensors are...well, tensors!

Page 501/5:

Any vector can be expressed as a linear combination of the basis $\{\mathbf{e}_a\}$ so that

$$\mathbf{A} = A^a \mathbf{e}_a, \quad (16)$$

which is equivalent to Eq. (3) except for the change in notation, where the components of the vector $\mathbf{A}$ in the basis $\{\mathbf{e}_a\}$ have been labelled with an *upper* index. However, if one asks if $A^a = \mathbf{e}_a \cdot \mathbf{A}$ or $\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = \sum_a A^a B^a$ still hold as in Eqs. (4) and (5), the answer is negative:

Our remarks on the file [9] are:

1) Quantities with such a character and defined in an N -dimensional space are called tensors and, more specifically, r th-rank tensors if they have N^r components.

Reference 6. "A gentle introduction to tensors", 2014 [10].

Page 1/2:

"Tensors and transformations are inseparable. To put it succinctly, tensors are geometrical objects over vector spaces, whose coordinates obey certain laws of transformation under change of basis. Vectors are simple and well-known examples of tensors, but there is much more to tensor theory than vectors".

"I have used the coordinate approach to tensors, as opposed to the formal geometrical approach. Although this approach is a bit old fashioned, I still find it the easier to comprehend on first learning, especially if the learner is not a student of mathematics or physics".

Page 4/5:

Consider two bases $(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2)$, which we will henceforth call the *old basis*, and $(\tilde{\mathbf{e}}_1, \tilde{\mathbf{e}}_2)$, which we will call the *new basis*. See, for example, Figure 1.4, in which we have brought the two bases to a common origin.

Since $(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2)$ is a basis, each of the vectors $(\tilde{\mathbf{e}}_1, \tilde{\mathbf{e}}_2)$ can be uniquely expressed as a linear combination of $(\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2)$, similarly to (1.1):

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{e}}_1 &= \mathbf{e}_1 S_1^1 + \mathbf{e}_2 S_1^2 \\ \tilde{\mathbf{e}}_2 &= \mathbf{e}_1 S_2^1 + \mathbf{e}_2 S_2^2\end{aligned}\tag{1.3}$$

Page 14/15:

Vectors, covectors, and linear operators are all special cases of tensors. We will not attempt to define tensors in abstract terms, but settle for a coordinate-based definition, as follows.

A *tensor of type* (or *valency*) (r, s) over an n -dimensional vector space is an object consisting of n^{r+s} coordinates, denoted by the generic symbol $a_{j_1 \dots j_s}^{i_1 \dots i_r}$, and obeying the following change-of-basis transformation law:

$$\tilde{a}_{j_1 \dots j_s}^{i_1 \dots i_r} = T_{k_1}^{i_1} \dots T_{k_r}^{i_r} a_{m_1 \dots m_s}^{k_1 \dots k_r} S_{j_1}^{m_1} \dots S_{j_s}^{m_s}\tag{1.28}$$

Our remarks on the file [10] are the following.

1) Terminology: "old basis", "new basis", "vector", "covector", "linear operators", "tensor valency".

2) "We will not attempt to define tensors in abstract terms...".

Reference 7. "Tensor Analysis and Elementary Differential Geometry for Physicists and Engineers", Chapter 2 – Tensor Analysis, Berlin, 2014 [11].

Page 36/2 says:

The definition of tensors is based on multilinear algebra with a multilinear map. We consider the real vector spaces $\mathbf{U}_1, \dots, \mathbf{U}_n$ and their respective dual vector spaces $\mathbf{V}_1, \dots, \mathbf{V}_m$. Each of their vector spaces belongs to the finite N -dimensional space $\mathbf{R}^N$, the image vector space $\mathbf{W}$, to the real space $\mathbf{R}$. A **mixed tensor of type (m, n)** can be defined as a multilinear functional $\mathbf{T}$ that maps an $(m + n)$ tuple of vectors of the vector spaces $\mathbf{U}$ and $\mathbf{V}$ into $\mathbf{W}$ (Fecko 2011) (Fig. 2.1):

$$\begin{aligned} \mathbf{T} : (\mathbf{U}_1 \times \dots \times \mathbf{U}_n) \times (\mathbf{V}_1 \times \dots \times \mathbf{V}_m) &\rightarrow \mathbf{W} \\ \underbrace{\mathbf{R}^N \times \dots \times \mathbf{R}^N}_{n \text{ copies}} \times \underbrace{\mathbf{R}^N \times \dots \times \mathbf{R}^N}_{m \text{ copies}} &\rightarrow \mathbf{R} \\ (\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_n; \mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_m) &\rightarrow \mathbf{T}(\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_n; \mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_m) \in \mathbf{R}. \end{aligned} \quad (2.1)$$

Our remarks on the file [11] following: This is a typical abstract definition of general case tensor form.

Reference 8. "Introduction to tensor calculus", Dep. of Physics & Astronomy, Univ. College, London, 2016 [12].

Pages (5 – 6)/(6 – 7):

"Vectors are broadly geometric objects which are uniquely identified by their magnitude (length) and direction in a presumed underlying space". "At this early stage in these notes, we generically define "tensor" as an organized array of mathematical objects such as numbers or functions".

"Non-indexed (lower or upper case) bold face Latin letters (e.g. **a**, **A**) are used for vectors. The exception to this is the basis vectors where indexed bold face lower or upper case symbols are used".

"Non-indexed upper case bold face Latin letters (e.g. **A**, **B**) are used for tensors (i.e. of rank > 1)". "Indexed light face italic symbols (e.g. a_i and B_j^{ki}) are used to denote tensors of rank > 0 in their explicit tensor form (index notation). Such symbols may also be used to denote the components of these tensors".

Page 11/12: "A tensor is an array of mathematical objects (usually numbers or functions) which transforms according to certain rules under coordinates change. In a d -dimensional space, a tensor of rank- n has d^n components ...".

Page 13/14: "Each tensor index should conform ... either covariant or contravariant. For orthonormal Cartesian coordinate systems, the two variance types (i.e. covariant and contravariant) do not differ...".

Our remarks on the file [12] following. 1) Much attention paid to accurate and consistent notification of the terms. 2) Given definition of tensor is not explicit. 3) It is claimed, that in Cartesian coordinate system both two principal forms of tensor (covariant and contravariant) match up.

Page 30/31 says about the tensor multiplication.

- This may also be called outer or exterior or direct or dyadic multiplication, although some of these names may be reserved for operations on vectors.
- On multiplying each component of a tensor of rank r by each component of a tensor of rank k , both of dimension m , a tensor of rank $(r + k)$ with m^{r+k} components is obtained where the variance type of each index (covariant or contravariant) is preserved, e.g.

$$A_i B_j = C_{ij} \quad (53)$$

Page 31/32: "Not every tensor can be synthesized as a product of lower rank tensors".

Page 32/33: "In general, the inner product is not commutative. When one or both of the tensors involved in the inner product are of rank > 1 the order of the multiplicands does matter". Another fragment of this page is:

- As indicated before (see § 2.6.4), the dot product of two vectors is an example of the inner product of tensors, i.e. it is an inner product of two rank-1 tensors to produce a rank-0 tensor:

$$[\mathbf{ab}]_i^j = a_i b^j \xrightarrow{\text{contraction}} \mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = a_i b^i \quad (59)$$

Our remarks on the file [12] (continued).

4) The tensor multiplication like $\otimes$ looks similar to matrix operations.

5) The statement on p.31/32 contradicts the general tensor definition.

6) The statement on p. 32/33 about the cumulateness indicates the non-consistence of given tensors introduction. Another statement provokes confusion around the terms "dot product", "inner product of tensors", "outer product", "scalar product" etc.

To our mind, too many identical terms are involved in such explanation. Also many special operations added into tensor algebra: contraction (p.31/32), permutation and quotient rule (p. 34/35), which is close to matrix algebra.

Analyzing the cited above tutorials on tensor calculus for students, we'll highlight the following cognitive aspects of tensor method.

1) There is no common definition of tensor among the specialists. Some of them introduce tensor as a special type of vector/covector multiplication (vectors understood as first rank tensors); other ones determine tensor through multiplication of vector spaces and dual vector spaces, taken from a common Euclidian space.

2) The core issue of a dedicated introduction to tensor analysis is how to explicitly define the first rank covariant and contravariant tensors.

3) The "plane" thesaurus of basic terms in known textbooks on tensors (vector, space, tensor etc.) leads to logical contradictions noted above.

Objective of this work is outlining a cognitive tensor model of a system on the basis of Von Neumann classes of hierarchy.

3. Outlines of tensor model based on Von Neumann classes

In this section core outlines and definitions are presented for construction a holistic tensor model of a physical system based on hierarchical set theory by J. Von Neumann (aka Neumann's classes). The following methodological principles are proposed for a cognitive tensor modeling.

1) *In a cognitive tensor model*, the standard matrix algebra forms the operational basis (first of all, the well-known matrix multiplication rule, [22]). *Therefore*, no special operations and related cumbersome terms will be introduced for tensors (like Einstein's summation notation $x = x_i e^i$, dyad product uv , tensor multiplication $u \otimes v$, tensor components etc.).

2) *In a cognitive tensor model*, the set of empirical data in some physical units (e.g. power, energy) will form a core layer (zero-order Neumann's class) for construction subsequent tensor-related terms and objects (high-order Neumann's classes). *Therefore*, no predetermined spaces and their bases are needed more (like vector space, factor space, quotient space, reciprocal space, orthonormal basis, Cartesian basis, normal basis, affine basis etc.). Only two spatial categories (i.e. vector space $\overset{1}{U}$ and dual vector space $\overset{2}{U}$) will be determined over initially given matrix $\mathbf{H}$ of empirical data.

3) In a cognitive tensor model, one more type of vector coordinates will be adopted (i.e. normal coordinates) in addition to conventional covariant and contravariant coordinates. This admits an accurate axiomatic definition of the first-rank covariant and contravariant tensors in terms of the first-order Neumann's class.

Based on declared above principles, we present a consistent axiomatic scheme for a cognitive tensor model of physical system. Let be given Hermitian matrix of empirical data measured on a physical system in abstract units of square magnitude (μ^2).

Axiom 1.

Let be given a nonsingular Hermitian matrix $\mathbf{H}_{\wp}$ of empirical data measured on a physical system $\wp$ in abstract units of square magnitude (μ^2). Matrix $\mathbf{H}_{\wp}$ considers be initial term of *zero-order* Neumann's class tied to system $\wp$.

Axiom 2.

The Hermitian matrix $\mathbf{H}_{\wp}$ of empirical data measured on physical system $\wp$ in square magnitude units (μ^2), be mapped on a scalar product $\langle \vec{\mathbf{U}} \cdot \vec{\mathbf{U}} \rangle := \mathbf{H}_{\wp}$ of an *abstract vector rapper* $\vec{\mathbf{U}} := \{\vec{\mathbf{U}}_1, \vec{\mathbf{U}}_2, \mathbf{K}\}$ in linear magnitude units ($\mu^1 = \mu$). The scalar product $\langle \vec{\mathbf{U}} \cdot \vec{\mathbf{U}} \rangle$ and vector rapper $\vec{\mathbf{U}}$ consider be terms of the *first-order* Neumann's class.

Axiom 3.

3.1. The vector rapper $\vec{\mathbf{U}}$ in linear magnitude units (μ), which predefined by its scalar product $\langle \vec{\mathbf{U}} \cdot \vec{\mathbf{U}} \rangle$ retrieved from Hermitian matrix $\mathbf{H}_{\wp} \rightarrow \langle \vec{\mathbf{U}} \cdot \vec{\mathbf{U}} \rangle$ of empirical data measured on a physical system $\wp$ in square magnitude units (μ^2), determines a local in time Euclidian space $\vec{\mathbf{E}}(\mathbf{H}_{\wp})$ tied to the system $\wp$.

3.2. The Euclidian space $\vec{\mathbf{E}}(\mathbf{H}_{\wp})$ tied to the system $\wp$, is defined by the orthonormal coordinate basis $\vec{\mathbf{e}} := \{\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots\}$ in physical units of an abstract magnitude (μ) due to the presentation the vector rapper $\vec{\mathbf{U}}$ by the Hermitian matrix $\underline{\mathbf{U}} = +\sqrt{\mathbf{H}_{\wp}}$ of its normal coordinates in basis $\vec{\mathbf{e}}$.

Definition 1. Hermitian matrix $\underline{\mathbf{U}} = +\sqrt{\mathbf{H}_{\wp}}$ of the normal coordinates in basis $\vec{\mathbf{e}}$ with physical units of an abstract magnitude (μ) we define as *fundamental covariant* (on rapper $\vec{\mathbf{U}}$) *first rank tensor*, which is determined in local Euclidian space $\vec{\mathbf{E}}(\mathbf{H}_{\wp})$ [23].

Euclidian space $\vec{\mathbf{E}}(\mathbf{H}_{\wp})$, basis $\vec{\mathbf{e}}$ and fundamental tensor $\underline{\mathbf{U}}$ consider be terms of the *first order* Neumann's class. Along with the fundamental tensor $\underline{\mathbf{U}}$, which is determined above, some other fundamental first rank covariant tensors can be defined; all these tensors we call "fundamental" because of their common origin from Hermitian matrix $\mathbf{H}_{\wp}$ of empirical data tied to physical system $\wp$. Therefore, all the fundamental tensors are nonsingular (have their inverse forms), and each of a fundamental tensor uniquely defines the local Euclidian space $\vec{\mathbf{E}}(\mathbf{H}_{\wp})$.

Definition 2. Let an arbitrary $\underline{\mathbf{z}}$ be a fundamental (nonsingular) first-rank tensor, which is covariant on some vector rapper $\vec{\mathbf{z}} \subseteq \vec{\mathbf{E}}(\mathbf{H}_{\wp})$ in a local

Euclidian space $\overset{\mathbf{I}}{\mathbf{E}}(\mathbf{H}_\varphi)$. The object $\bar{\mathbf{Z}} := \mathbf{Z}^{-1}$ we define *contravariant* on $\overset{\mathbf{I}}{\mathbf{Z}}$ first rank tensor in $\overset{\mathbf{I}}{\mathbf{E}}(\mathbf{H}_\varphi)$.

Definition 3. If $\mathbf{A}$ and $\mathbf{B}$ are fundamental first rank tensors, the matrix multiplication $\mathbf{C} := \mathbf{A} \cdot \mathbf{B}^*$ we define as *second-rank fundamental tensor* in a local Euclidian space $\overset{\mathbf{I}}{\mathbf{E}}(\mathbf{H}_\varphi)$; the type of tensor $\mathbf{C}$ is defined by the types of multiplication members. Four types are possible hereby:

double covariant tensor $\mathbf{C}_{AB}$, double contravariant tensor $\mathbf{C}^{AB}$, covariant on $\mathbf{A}$ and contravariant on $\mathbf{B}$ tensor $\mathbf{C}_A^B$, contravariant on $\mathbf{A}$ and covariant on $\mathbf{B}$ tensor $\mathbf{C}^A_B$.

As matrix multiplication is not commutative operation, four other fundamental tensors of second rank can be constructed by $\mathbf{A}$ and $\mathbf{B}$:

$$\mathbf{C} := \mathbf{B} \cdot \mathbf{A}^* \rightarrow \mathbf{C}_{BA}, \mathbf{C}^{BA}, \mathbf{C}_B^A, \mathbf{C}^B_A.$$

All the fundamental tensors we declare as members of the first-order Neumann's class.

Definition 4. If an arbitrary nonsingular *tuple of vectors* $\overset{\mathbf{I}}{\mathbf{V}}$ is presented by the matrix $\underline{\mathbf{V}}$ of normal coordinates in orthonormal basis $\overset{\mathbf{I}}{\mathbf{e}}$ of Euclidian space $\overset{\mathbf{I}}{\mathbf{E}}(\mathbf{H}_\varphi)$, then matrix $\underline{\mathbf{V}}$ we define as *spawned covariant* on $\overset{\mathbf{I}}{\mathbf{V}}$ first rank tensor, and matrix $\bar{\mathbf{V}} := \underline{\mathbf{V}}^{-1}$ – *spawned contravariant* on $\overset{\mathbf{I}}{\mathbf{V}}$ first rank tensor in $\overset{\mathbf{I}}{\mathbf{E}}(\mathbf{H}_\varphi)$. The multiplication of r first-rank spawned tensors we define as r -rank spawned tensor. All the spawned tensors we declare as members of the second-order Neumann's class (concisely called "tensors").

Conclusion.

Tensor methodology is a powerful mathematical tool used in physics, system engineering and others realms. In technical universities, variety of approaches is used for tensors study. However, in known guides for undergraduate students tensors still remain about a mystery. Academic disciplines on tensors are not provided by the solid theoretical foundation, and most of the formal terms are commonly determined in a "flat" logical architecture inherent to Cantor set theory which suffers known paradoxes.

In present paper there applied hierarchical Neumann's classes to provide a holistic cognitive tensor model of a physical system. Three Neumann's classes are introduced: class 0 for empirical data on system relationships, class 1 for fundamental tensors, and class 2 for spawned tensors (concisely called "tensors").

This approach opens the way for further strict classification of tensors, in their connection with vector properties in elementary geometry and classical

functional analysis in finite-dimensional Euclidean spaces. Eventually, the introduction to tensor algebra behind the Neumann's classes becomes more comprehensive and understandable by the target audience.

References:

1. Riemann, B. (1873), "On the Hypotheses which lie at the Bases of Geometry Nature", Vol. VIII, Nos. 183, 184, pp. 14-17, 36-37. – Available: <https://www.emis.de/classics/Riemann/WKCGeom.pdf>.
2. Ricci-Curbastro, G. (1887), "Sulla derivazione covariante ad una forma quadratica differenziale", *Rend. Acc. Lincei*, Vol. 3 (4), pp. 15-18.
3. Levi-Civita, T. (1899), "Interpretazione grupale degli integrali di un sistema canonico", *Rend. Acc. Lincei*, Vol. VII, pp. 235-238.
4. Einstein, A. (1913), "Entwurf einer verallgemeinerten Relativitätstheorie und einer Theorie der Gravitation", *Zeitschrift für Mathematik und Physik*, Vol. 62, pp. 225-261.
5. Kolecki, J.C. (2002), *An introduction to tensors for students of physics and engineering* [Electronic resource], NASA Glenn Research Center, Cleveland, Ohio, 29 P. – Available: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20020083040.pdf>.
6. Kolecki, J.C. (2005), *Foundations of tensor analysis for students of physics and engineering with an introduction to the theory of relativity* [Electronic resource], NASA Glenn Research Center, Cleveland, Ohio, 84 P. – Available: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20050175884.pdf>.
7. Islam, N. (2006), "Tensors and their applications" [Electronic resource], *New Age International (P) Ltd. Publishers*, 245 p. – Available: https://www.researchgate.net/publication/272047252_Tensors_and_TheirApplications.
8. Bowen, R.M. (2010), *Introduction to vectors and tensors. Linear and multilinear algebra*, [Electronic resource], 293 p. – Available: <http://oaktrust.library.tamu.edu/bitstream/handle/1969.1/2502/IntroductionToVectorsAndTensorsVol1.pdf>.
9. Battaglia, F. (2013), "Tensors: A guide for undergraduate students", *American Association of Physics Teachers*, No. 81 (7), pp. 498-511.
10. Porat, B. (2014), *A Gentle Introduction to Tensors* [Electronic resource], 86 p., Available: https://www.eese.wustl.edu/~nehorai/Porat_A_Gentle_Introduction_to_Tensors_2014.pdf.
11. Nguyen-Schäfer, H. (2014), "Tensor Analysis and Elementary Differential Geometry for Physicists and Engineers", *Mathematical Engineering* 21, Chapter 2. tensor analysis [Electronic resource], Springer Verlag Berlin Heidelberg, pp. 35-99. – Available: <https://link.springer.com/content/pdf/bfm%3A978-3-642-18617-2%2F1.pdf>.
12. Sochi, T. (2016), "Introduction to tensor calculus" [Electronic resource], *Department of Physics & Astronomy*, University College London, 84 p. – Available: https://www.researchgate.net/publication/296707240_Introduction_to_Tensor_Calculus.
13. Cantor, G. (1883), "Ueber unendliche, lineare Punktmannichfaltigkeiten", *Mathematische Annalen*, No. 21 (4), pp. 545-591.
14. Russell, B. (1980), *The Principles of Mathematics*. Vol. 1 [Electronic resource], 798 p. – Available: <http://people.umass.edu/klement/pom/pom-portrait.pdf>.
15. Neumann, Von J. (1927), "Mathematische Begründung der Quantenmechanik", *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse*, pp. 1-57.
16. Neumann, Von J. (1928), Die Axiomatisierung der Mengenlehre, *Mathematische Zeitschrift*, No. 27, pp. 669-752.
17. Bernays, P. (1954), "A system of axiomatic set theory", Part VII, *The journal of symbolic logic*, Vol. 19, No. 2, pp. 81-96. – Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/85221775.pdf>.

-
18. Kreyszig, E. (1978), *Introductory functional analysis with applications*, University of Windsor, 688 p. – Available: <http://www-personal.acfr.usyd.edu.au/spns/cdm/resources/Kreyszig%20-%20Introductory%20Functional%20Analysis%20with%20Applications.pdf>.
19. Teschl, G. (2010), "Topics in Real and Functional Analysis" [Electronic resource], *American Mathematical Society Providence, Rhode, Island*, 558 p. – Available: <https://www.mat.univie.ac.at/~gerald/ftp/book-fa/fa.pdf>.
20. Daners, D. (2017), *Introduction to Functional Analysis* [Electronic resource], School of Mathematics and Statistics University of Sydney, 117 p. – Available: <http://www.maths.usyd.edu.au/u/athomas/FunctionalAnalysis/daners-functional-analysis-2017.pdf>.
21. *Engineering Math – Quick Reference* [Electronic resource]. – Available: http://www.sharetechnote.com/html/Handbook_EngMath_Matrix_InnerProduct.html.
22. Gantmacher, F.R. (1960), *The theory of matrices*, Chelsea Publishing Company, N.Y., 276 p. – Available: <https://www.maths.ed.ac.uk/~v1ranick/papers/gantmacher1.pdf>.
23. Tikhonov, V. "A unified geometrical presentation of a quantum system experiment", *Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling"*. – 2018. – № 24 (1300). – P. 59-67.

The article is presented by doctor of technical sciences, professor, the head of "Radio and Television" depart. of the "Institute of Radio, Television and Information Security" of "O.S. Popov ONAT", Honored Worker of Science and Technology of Ukraine Gofiyzen O.V.

Received 12.11.2018

Tikhonov Victor, Doctor of technical science, associate professor
Laureate of the Ukraine State Prize for Science and Technology,
Professor of Communication Networks department
O.S. Popov Odessa National Academy of Telecommunications
Str. Kuznechna, 1, Odessa 65029, Ukraine
Tel.: 067-752-13-90
E-mail: victor.tykhonov@onat.edu.ua

Tykhonova Olena, Teacher of Communication Networks department
O.S. Popov Odessa National Academy of Telecommunications
Str. Kuznechna, 1, Odessa 65029, Ukraine
Tel.: 097-490-56-18
E-mail: elena.tykhonova@onat.edu.ua

УДК 514.8

Когнітивна тензорна модель системи на основі класів Фон Неймана / Тихонов В.І., Тихонова О.В. // Вісник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПИ". – 2018. – № 42 (1318). – С. 82 – 97.

У роботі розглядаються проблеми вивчення тензорного обчислення в технічних університетах. Для просування цілісного розуміння тензорів студентами, запропоновано когнітивну тензорну модель фізичної системи на основі ієрархічних класів Джона фон Неймана. Бібліогр.: 23 назв.

Ключові слова: когнітивна тензорна модель; фізична система; класи Фон Неймана.

УДК 514.8

Когнитивная тензорная модель системы на основе классов Фон Неймана / Тихонов В.И., Тихонова Е.В. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2018. – № 42 (1318). – С. 82 – 97.

В статье рассматриваются проблемы изучения тензорного исчисления в технических университетах. Чтобы способствовать целостному пониманию тензоров студентами, предложена когнитивная тензорная модель физической системы на основе иерархических классов Джона фон Неймана. Библиогр.: 23 назв.

Ключевые слова: когнитивная тензорная модель; физическая система; классы Фон Неймана.

UDC 514.8

Cognitive tensor model of a system based on Von Neumann classes / Tikhonov V.I., Tykhonova O.V. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2018. – № 42 (1318). – P. 82 – 97.

The paper focuses issues of tensor calculus study in technical universities. To promote a holistic insight on tensors by undergraduates, there proposed a cognitive tensor model of a physical system on the base of hierarchical John Von Neumann classes. Refs.: 23 titles.

Keywords: cognitive tensor model; physical system; Neumann classes.

УДК 539.3

DOI: 10.20998/2411-0558.2018.42.18

Б. А. ХУДАЯРОВ, д-р техн. наук, зав. каф., ТИИМСХ, Ташкент,
Ф. Ж. ТУРАЕВ, асс., ТИИМСХ, Ташкент,
Х. М. КОМИЛОВА, асс., ТИИМСХ, Ташкент

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ТРУБЫ С ПОТОКОМ ЖИДКОСТИ

В работе рассмотрена математическая модель и вычислительный метод определения колебаний прямого участка вязкоупругой трубы с потоком жидкости. При исследовании колебаний трубопроводов с протекающей внутри газо-жидкостью используется модель в виде цилиндрических оболочек и двухпараметрическая модель вязкоупругого основания Пастернака. Для описания вязкоупругих свойств использована наследственная теория вязкоупругости Больцмана-Вольтерра. Численно исследованы влияния параметров оснований Пастернака, влияние сингулярности в ядрах наследственности и геометрических параметров трубопровода на колебания конструкций, обладающих вязкоупругими свойствами. Ил.: 2. Библиогр.: 16 назв.

Ключевые слова: колебания трубы; основание; трубопровод; математическая модель; вычислительный метод; цилиндрическая оболочка.

Постановка проблемы и анализ литературы. Одной из главных проблем трубопроводных транспортных систем является их подверженность коррозионным разрушениям вследствие контакта материала труб с агрессивными средами. Используемые средства защиты чаще всего оказываются малоэффективными. В связи с этим остро стоит проблема поиска альтернативных путей модернизации нефтегазопроводных систем. Очевидным перспективным и современным направлением является внедрение труб из высокопрочных и коррозионностойких композиционных материалов, в частности, стеклопластика [1 – 4]

В настоящее время существует ряд предложений по совершенствованию механической модели грунтового основания, но, по-видимому, следующим шагом по простоте математической постановки задачи после винклеровой модели явилась разработка модели вязкоупругого двухпараметрического основания Пастернака. Модель двухпараметрического основания Пастернака, с одной стороны, позволяет учитывать распределительную способность грунта, а с другой – почти не усложняет математическую постановку задачи по сравнению с моделью Винклера [5]. Однако модель Винклера имеет и определенные недостатки [6, 7], что требует совершенствования существующих моделей.

© Б.А. Худаяров, Ф.Ж. Тураев, Х.М. Комилова, 2018

Целью данной работы является исследование колебаний трубопроводов с учетом двухпараметрического вязкоупругого основания Пастернака.

Постановка задачи и методы решения. Рассмотрим поведение тонкой круговой вязкоупругой цилиндрической оболочки, внутри которой с постоянной скоростью движется идеальная жидкость. Скорость жидкости равна U и имеет направление, совпадающее с направлением оси Ox . Реакция внешней среды описывается моделью двухпараметрического основания Пастернака. Будем пользоваться обычными гипотезами Кирхгоффа-Лявы и полагать прогибы малыми по сравнению с толщиной.

При предположениях в [8, 9] и полагая $y = R\theta$, уравнения Маргерра относительно перемещений u, v, w можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} (1-R^*) \left\{ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{1-\mu}{2R^2} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + \frac{1+\mu}{2R} \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial \theta} + L_1(w) \right\} - \rho \frac{1-\mu^2}{E} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= 0, \\ (1-R^*) \left\{ \frac{1}{R^2} \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2} + \frac{1-\mu}{2} \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{1+\mu}{2R} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial \theta} + L_2(w) \right\} - \rho \frac{1-\mu^2}{E} \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= 0, \quad (1) \\ D(1-R^*) \nabla^4 w + L_3^*(u, v, w) + (1-R_1^*) \left\{ k_1 w - k_2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right\} + \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= q, \end{aligned}$$

где R – радиус кривизны срединной поверхности; D – цилиндрическая жесткость трубы; μ – коэффициент Пуассона материала трубы; E – модуль упругости материала трубы, ρ – его плотность; k_1, k_2 – коэффициенты основания Пастернака, характеризующие свойства внешней среды; h – толщина стенки трубы; R^* и R_1^* – интегральные операторы [10]; $L_1(w)$, $L_2(w)$, $L_3^*(u, v, w)$ – дифференциальные и интегро-дифференциальные операторы; q – давление жидкости на стенку трубопровода

$$q = -\Phi_{cm}^* \rho \left(\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + U^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \quad (2)$$

где Φ_{cm}^* – присоединенная масса жидкости.

Граничные условия имеют вид:

$$x = 0; \quad x = L; \quad w = 0; \quad v = 0; \quad N_x = 0; \quad M_x = 0. \quad (3)$$

Решение систем ИДУ в частных производных (1) при различных граничных условиях и при наличии сингулярных ядер наследственности представляет собой значительные математические трудности. Поэтому естественным способом решения этих систем является, дискретизация по пространственным переменным и получение системы уравнений, разрешающих нелинейных ИДУ относительно функции времени.

Приближенное решение системы (1) будем искать в виде:

$$\begin{aligned} u(x, \theta, t) &= \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M u_{nm}(t) \cos \frac{n\pi x}{L} \sin m\theta, \\ v(x, \theta, t) &= \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M v_{nm}(t) \sin \frac{n\pi x}{L} \cos m\theta, \\ w(x, \theta, t) &= \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M w_{nm}(t) \sin \frac{n\pi x}{L} \sin m\theta, \end{aligned} \quad (4)$$

где $u_{nm}(t)$, $v_{nm}(t)$, $w_{nm}(t)$ – неизвестные функции времени.

Подставляя (4) в систему (1) и применяя метод Бубнова-Галёркина, получим следующую систему нелинейных интегро-дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} & \mathbb{U}_{kl} + (1 - R^*) \left\{ \left(k^2 \pi^2 \delta^2 \gamma^2 + \frac{1 - \mu}{2} l^2 \delta^2 \right) \mu_{kl} - \frac{1 - \mu}{2} k l \pi \gamma \delta^2 v_{kl} + \right. \\ & + \mu \delta^2 \gamma^2 k \pi w_{kl} + \sum_{n,i=1}^N \sum_{m,r=1}^M \left(\frac{n i^2 \pi^2}{2} \gamma^3 \delta + \frac{1 - \mu}{2} \cdot \frac{n r^2}{2} \gamma \delta \right) \bar{\Delta}_{1k \ln mir} w_{nm} w_{ir} - \\ & \left. - \frac{1 + \mu}{2} \sum_{n,i=1}^N \sum_{m,r=1}^M \frac{i m r}{2} \gamma \delta \bar{\Delta}_{2k \ln mir} w_{nm} w_{ir} \right\} = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \mathbb{V}_{kl} + (1 - R^*) \left\{ \left[\frac{1 - \mu}{2} k^2 \pi^2 \delta^2 \gamma^2 + l^2 \delta^2 \right] v_{kl} - \frac{1 + \mu}{2} k l \pi \gamma \delta^2 u_{kl} - l \delta^2 w_{kl} - \right. \\ & - \sum_{n,i=1}^N \sum_{m,r=1}^M \frac{m r^2}{2 \pi} \delta \bar{\Delta}_{3k \ln mir} w_{nm} w_{ir} + \frac{1 + \mu}{2} \sum_{n,i=1}^N \sum_{m,r=1}^M \frac{i n r \pi}{2} \gamma^2 \delta \bar{\Delta}_{4k \ln mir} w_{nm} w_{ir} - \\ & \left. - \frac{1 - \mu}{2} \sum_{n,i=1}^N \sum_{m,r=1}^M \frac{i^2 m \pi}{2} \gamma^2 \delta \bar{\Delta}_{3k \ln mir} w_{nm} w_{ir} \right\} = 0, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \left(1 + \phi_{\alpha l}^*\right) \mathbb{W}_{kl} + \left(1 - R^*\right) \left\{ \left(\frac{1}{12} \left[k^2 \pi^2 \gamma^2 + l^2 \right]^2 + \delta^2 \right) w_{kl} + \pi \mu \gamma \delta^2 k u_{kl} - \right. \\
& \left. - l \delta^2 v_{kl} - \frac{\delta}{4\pi} \sum_{n,i=1}^N \sum_{m,r=1}^M m r \bar{\Delta}_{5kl n mir} w_{nm} w_{ir} - \frac{\pi \mu \gamma^2 \delta}{4} \sum_{n,i=1}^N \sum_{m,r=1}^M n i \bar{\Delta}_{6kl n mir} w_{nm} w_{ir} \right\} + \\
& + \frac{1-\mu}{4} \gamma \delta \sum_{n,i=1}^N \sum_{m,r=1}^M w_{nm} n (1-R^*) \left[\gamma \pi i r v_{ir} - r^2 u_{ir} \right] \bar{\Delta}_{6kl n mir} + \\
& + \frac{\delta}{2} \sum_{n,i=1}^N \sum_{m,r=1}^M m w_{nm} (1-R^*) \left[i r \mu \gamma u_{ir} - \frac{r^2}{\pi} v_{ir} + \frac{r}{\pi} w_{ir} \right] \bar{\Delta}_{5kl n mir} + \\
& + \frac{1-\mu}{4} \delta \sum_{n,i=1}^N \sum_{m,r=1}^M m w_{nm} (1-R^*) \left[i r \gamma u_{ir} - \gamma^2 i^2 \pi v_{ir} \right] \bar{\Delta}_{5kl n mir} - \\
& - \frac{\delta}{2} \sum_{n,i=1}^N \sum_{m,r=1}^M m w_{nm} (1-R^*) \left[i r \mu \gamma^2 \pi v_{ir} - i^2 \gamma^3 \pi^2 u_{ir} - \mu \pi i \gamma^2 w_{ir} \right] \bar{\Delta}_{6kl n mir} - \\
& - \frac{1-\mu}{4} \delta \sum_{n,i=1}^N \sum_{m,r=1}^M n m w_{nm} (1-R^*) \left[r \gamma u_{ir} - i \gamma^2 \pi v_{ir} \right] \bar{\Delta}_{7kl n mir} - \\
& - \sum_{n,i=1}^N \sum_{m,r=1}^M m^2 w_{nm} (1-R^*) \left[i \mu \gamma u_{ir} - \frac{r}{\pi} v_{ir} + \frac{1}{\pi} w_{ir} \right] \frac{\delta}{2} \bar{\Delta}_{8kl n mir} - \\
& - \frac{\delta}{2} \sum_{n,i=1}^N \sum_{m,r=1}^M n^2 w_{nm} (1-R^*) \left[i \gamma^3 \pi^2 u_{ir} - \mu r \gamma^2 \pi v_{ir} + \mu \gamma^2 \pi w_{ir} \right] \bar{\Delta}_{8kl n mir} - \\
& - \delta^2 \left(M^* \right)^2 \gamma^2 M_E^2 k^2 \pi^2 w_{kl} + \delta^2 \left(1 - R_1^* \right) \left(\delta^2 k_1 + \pi^2 k^2 \gamma^2 k_2 \right) w_{kl} = 0,
\end{aligned} \tag{5}$$

$$u_{nm}(0) = u_{0nm}, \quad \mathbb{U}_{nm}(0) = \mathbb{U}_{0nm}, \quad v_{nm}(0) = v_{0nm}, \quad \mathbb{V}_{nm}(0) = \mathbb{V}_{0nm}, \quad w_{nm}(0) = w_{0nm},$$

$$\mathbb{W}_{nm}(0) = \mathbb{W}_{0nm}.$$

Здесь $\delta = \frac{R}{h}$, $\gamma = \frac{R}{L}$, $M^* = \frac{U}{V_\infty}$, $M_E = \sqrt{\frac{E}{\rho V_\infty^2}}$, V_∞ – скорость звука,

$\bar{\Delta}_{1k \ln mir}$, $\bar{\Delta}_{2k \ln mir}$, $\bar{\Delta}_{3k \ln mir}$, $\bar{\Delta}_{4k \ln mir}$, $\bar{\Delta}_{5k \ln mir}$, $\bar{\Delta}_{6k \ln mir}$, $\bar{\Delta}_{7k \ln mir}$, $\bar{\Delta}_{8k \ln mir}$ – безразмерные коэффициенты, связанные с координатными функциями и их производными; точки над переменной означает взятие производной по времени соответствующего порядка.

Результаты вычислительных экспериментов. Решение ИДУ (5) находится численным методом, основанным на использовании квадратурных формул [11, 12]. На основе этого метода описан алгоритм численного решения системы (5).

Исследовалось влияние вязкоупругих свойств материала на колебательный процесс трубопровода с учетом двухпараметрического основания Пастернака (рис. 1). Первая из этих кривых построена для упругих трубопроводов $A = 0,01$ (1), а вторая и третья кривая отражает влияние параметра вязкости при следующих значениях: $A = 0,05$ (2); $A = 0,1$ (3). При расчетах были использовано следующие значения параметров: $\alpha = 0,25$; $\beta = 0,005$; $A_1 = 0,1$; $\alpha_1 = 0,25$; $\beta_1 = 0,005$; $\gamma = 0,02$; $\delta = 4$; $\mu = 0,3$; $V_\infty = 330$ м/с; $M_1 = 0,1$; $\rho = 7800$ кг/см³; $k_1 = 1$; $k_2 = 1$; $N = 5$; $M = 2$.

Как видно из рисунка, учет вязкоупругих свойств материала приводит к уменьшению амплитуды и частоты колебаний трубопровода [9 – 12].

На рис. 2 представлены графики функции $w(t)$ по времени при разных значениях k_1 и k_2 .

Кривые 1 – 3 соответствуют значениям $k_1 = 0$; $k_2 = 0$ (кривая 1); $k_1 = 1$; $k_2 = 1$ (кривая 2); и $k_1 = 3$; $k_2 = 3$ (кривая 3). Анализируя полученные результаты можно сделать вывод о том, что наличие вязкоупругого основания грунта приводит к уменьшению амплитуды колебаний, а частота колебаний увеличивается. При $k_1 = 3$; $k_2 = 3$ (кривая 3) амплитуда колебаний быстро затухает.

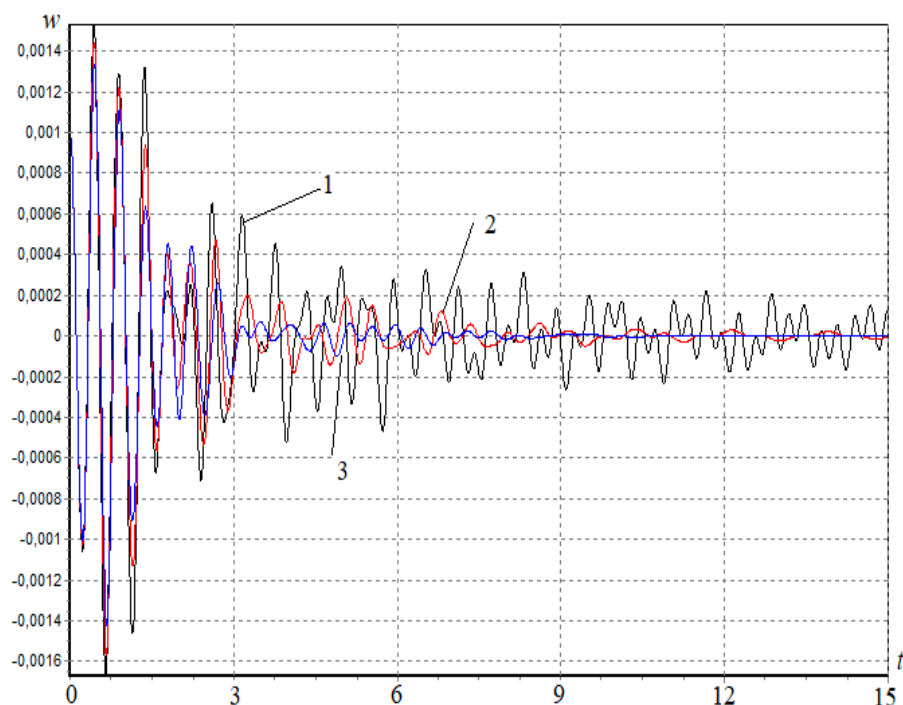


Рис. 1. Зависимости перемещений от времени при $A = 0,01$ (1), $A = 0,05$ (2); $A = 0,1$ (3)

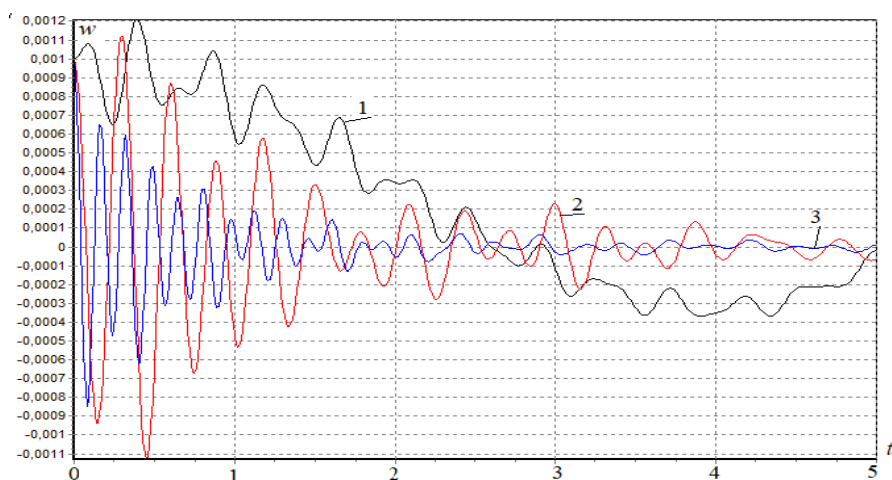


Рис.2. Зависимость прогиба от времени при значениях k_1 и k_2 : $k_1 = 0$; $k_2 = 0$ (кривая 1); $k_1 = 1$; $k_2 = 1$ (кривая 2); и $k_1 = 3$; $k_2 = 3$ (кривая 3)

Выводы. На основе интегральных моделей разработаны обобщенные математические модели нелинейных задач динамики

вязкоупругих цилиндрических оболочек с жидкостью. Разработаны и развиты математические модели задач о нелинейных колебаниях трубопроводов с учетом двухпараметрического вязкоупругого основания Пастернака. Установлено, что учет вязкоупругого основания грунта приводит к увеличению точности моделирования, в частности, к уменьшению амплитуды колебаний трубы, а частота колебаний увеличивается.

Список литературы:

1. Ягубов Э.З. Стеклопластиковые трубы – будущее экологически безопасного нефтегазопроводного транспорта / Э.З. Ягубов // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2007. – № 7. – С. 20-23.
2. Ягубов Э.З. Многоканальные трубопроводы для транспортировки нефтегазовых сред и восстановление изношенных нефтегазопроводов / Э.З. Ягубов, Н.Д. Цхадая, З.Х. Якубов // Научные труды. – 2013. – № 1. – С. 57-63.
3. Ягубов Э.З. Стеклопластиковые трубы: проблемы и перспективы применения в нефтяной промышленности / Э.З. Ягубов // Технологии нефти и газа. – 2006. – № 5. – С. 61-67.
4. Цхадая Н.Д. Стеклопластиковая труба для транспортировки нефти и газа / Н.Д. Цхадая, Э.З. Ягубов // Электронный журнал "Нефтегазовое дело". – 2012. – № 3. – С. 136-144.
5. Перельмутер А.В. Расчетные модели сооружений и возможности их анализа / А.В. Перельмутер, В.И. Сливкер. – К.: Сталь, 2002. – 600 с.
6. Горбунов-Посадов М.Н. Расчет конструкций на упругом основании / М.Н. Горбунов-Посадов, Т.А. Маликова, В.И. Соломин. – М.: Стройиздат, 1984. – 679 с.
7. Zhou X.Q. Dynamics characteristic of steady fluid conveying in the periodical partially viscoelastic composite pipeline / X.Q. Zhou, D.Y. Yu, X.Y. Shao, C.Y. Zhang // Composites Part B: Engineering. – 2017. – Vol. 111. – P. 387-408.
8. Григолюк Э.И. Нелинейное деформирование тонкостенных конструкций / Э.И. Григолюк, В.И. Мамай. – М.: Наука, 1997. – 272 с.
9. Вольмир А.С. Нелинейная динамика пластинок и оболочек / А.С. Вольмир. – М.: Наука, 1972. – 432 с.
10. Колтунов М.А. Ползучесть и релаксация / М.А. Колтунов. – М.: Высшая школа, 1976. – 276 с.
11. Бадалов Ф.Б. Методы решения интегральных и интегро-дифференциальных уравнений наследственной теории вязкоупругости / Ф.Б. Бадалов. – Ташкент: Мехнат, 1986. – 269 с.
12. Badalov F.B. Effect of the Hereditary Kernel on the Solution of Linear and Nonlinear Dynamic Problems of Hereditary Deformable Systems / F.B. Badalov, B.A. Khudayarov, A. Abdurkarimov // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2007. – Vol. 36. – № 4. – P. 328-335.
13. Khudayarov B.A. Numerical Study of the Dependence of the Critical Flutter Velocity and Time of a Plate on Rheological Parameters. International Applied Mechanics / B.A. Khudayarov. – 2008. – Vol. 44. – №. 6. – P. 676-682.
14. Khudayarov B.A. Numerical Analysis of Nonlinear Flutter of Viscoelastic Plates. International Applied Mechanics / B.A. Khudayarov. – 2005. – Vol. 41. – №. 5. – P. 538-542.
15. Khudayarov B.A. Flutter of Viscoelastic Plate in a Supersonic Gas Flow / B.A. Khudayarov // International Applied Mechanics. – 2010. – Vol. 46. – №. 4. – P. 455-460.

16. Худаяров Б.А. Нелинейный флаттер вязкоупругих ортотропных цилиндрических панелей / Б.А. Худаяров, Н.Г. Бандурин // Математическое моделирование. – 2010. – Т. 17. – № 10. – С. 79-86.

References:

1. Yagubov, E.Z. (2007), "Fiberglass pipes - the future of environmentally friendly oil and gas transportation", *Environmental protection in the oil and gas complex*, No. 7, pp. 20-23.
2. Yagubov, E.Z., Tshadaya, N.D., and Yakubov, Z.H (2013), "Multichannel pipelines for transporting oil and gas environments and restoring worn oil and gas pipelines", *Scientific works*, No. 1. pp. 57-63.
3. Yagubov, E.Z. (2006), "Stectoplastic pipes: problems and prospects of application in the oil industry", *Oil and gas technology*, No. 5, pp. 61-67.
4. Tshadaya, N.D., and Yagubov, E.Z. (2012), "Fiberglass pipe for oil and gas transportation", *Oil and gas business*, No.3, pp. 136-144.
5. Perelmutter, A.V., and Sluker, V.I. (2002), *Design models of structures and their analysis capabilities*, Steel, Kiev, 600 p.
6. Gorbunov-Posadov, M.N., Malikova, T.A., and Solomin V.I. (1984), *Calculation of structures on an elastic basis*, Stroizdat, Moskow, 679 p.
7. Zhou, X.Q., Yu, D.Y., Shao, X.Y., and Zhang, C.Y. (2017), "Dynamics characteristic of steady fluid conveying in the periodical partially viscoelastic composite pipeline", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 111, pp. 387-408.
8. Grigolyuk, E.I., and Mamai, V.I. (1997), *Nonlinear deformation of thin-walled structures*, Science, Moskow, 272 p.
9. Volmir, A.S. (1972), *Nonlinear dynamics of plates and shells*, Science, Moskow, 432 p.
10. Koltunov, M.A. (1976), *Creep and relaxation*, High School, Moskow, 276 p.
11. Badalov F.B. (1986), *Methods for solving integral and integro-differential equations of the hereditary theory of viscoelasticity*, Mehnat, Tashkent, 269 p.
12. Badalov, F.B., Khudayarov, B.A., and Abdukarimov, A. (2007), "Effect of the Hereditary Kernel on the Solution of Linear and Nonlinear Dynamic Problems of Hereditary Deformable Systems", *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, Vol. 36, No. 4, pp. 328-335.
13. Khudayarov, B.A. (2008), "Numerical Study of the Dependence of the Critical Flutter Velocity and Time of a Plate on Rheological Parameters. International Applied Mechanics", Vol. 44, No. 6, pp. 676-682.
14. Khudayarov, B.A. (2005), "Numerical Analysis of Nonlinear Flutter of Viscoelastic Plates. International Applied Mechanics", Vol. 41, No. 5, pp. 538-542.
15. Khudayarov, B.A. (2010), "Flutter of Viscoelastic Plate in a Supersonic Gas Flow", *International Applied Mechanics*, Vol. 46, No. 4, pp. 455-460.
16. Khudayarov, B.A., and Bandurin N.G. (2010), "Nonlinear flutter of viscoelastic orthotropic cylindrical panels", *Mathematical modeling*, Vol. 17, No. 10, pp. 79-86.

Статтю представив д.т.н., проф. Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" С.Ю. Леонов

Надійшла (received) 16.11.2018

Khudayarov Bakhtiyar, Dr.Tech.Sci., Professor
Tashkent institute of irrigation and agricultural mechanization engineers
Str. Kari-Niyazova, 39, Tashkent, Uzbekistan, 100000
Tel.:(99871)2370986, bakht-flpo@yandex.ru
ORCID ID: 0000-0002-2876-8447

Turaev Fozilzhon, Assistant

Tashkent institute of irrigation and agricultural mechanization engineers

Str. Kari-Niyazova, 39, Tashkent, Uzbekistan, 100000

Tel.:(99871)2370986, t.fozil86@mail.ru

Komilova Kholidakhon, Assistant

Tashkent institute of irrigation and agricultural mechanization engineers

Str. Kari-Niyazova, 39, Tashkent, Uzbekistan, 100000

Tel.:(99871)2370986, komilova591@mail.ru

УДК 539.3

Чисельне моделювання коливань труби з потоком рідини / Худаяров Б.А., Тураєв Ф.Ж, Комілова Х.М. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2018. – № 42 (1318). – С. 98 – 107.

В роботі розглянута математична модель і обчислювальний метод визначення коливань прямого ділянки в'язкопружної труби з потоком рідини. При дослідженні коливань трубопроводів з протікаючою всередині газо-рідиною використовується модель у вигляді циліндричних оболонок і двопараметрична модель в'язкопружної підстави Пастернака. Для опису в'язкопружних властивостей використана спадкова теорія в'язкопружності Больцмана-Вольтерра. Чисельно досліджені впливу параметрів підстав Пастернака, вплив сингулярності в ядрах спадковості і геометричних параметрів трубопроводу на коливання конструкцій, що володіють в'язкопружними властивостями. Іл.: 2, Бібліогр.: 16 назв.

Ключові слова: коливання труби; підстава; трубопровід; математична модель; обчислювальний метод; циліндрична оболонка.

УДК 539.3

Численное моделирование колебаний трубы с потоком жидкости / Худаяров Б.А., Тураев Ф.Ж, Комилова Х.М. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2018. – № 42 (1318). – С. 98 – 107.

В работе рассмотрена математическая модель и вычислительный метод определения колебаний прямого участка вязкоупругой трубы с потоком жидкости. При исследовании колебаний трубопроводов с протекающей внутри газо-жидкостью используется модель в виде цилиндрических оболочек и двухпараметрическая модель вязкоупругого основания Пастернака. Для описания вязкоупругих свойств использована наследственная теория вязкоупругости Больцмана-Вольтерра. Численно исследованы влияния параметров оснований Пастернака, влияние сингулярности в ядрах наследственности и геометрических параметров трубопровода на колебания конструкций, обладающих вязкоупругими свойствами. Ил.: 2. Библиогр.: 16 назв.

Ключевые слова: колебания трубы; основание; трубопровод; математическая модель; вычислительный метод; цилиндрическая оболочка.

UDC 539.3

Numerical simulation of the oscillations of the elements of the pipe with the flow of fluid / Khudayarov B.A., Turaev F.Zh., Komilova Kh.M. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2018. – № 42 (1318). – P. 98 – 107.

The paper considers a mathematical model and a computational method for determining oscillations of a straight section of a viscoelastic pipe with a fluid flow. In the study of pipeline oscillations with a gas-liquid flowing inside, a model in the form of cylindrical shells and a two-parameter model of the viscoelastic Pasternak base are used. To describe the viscoelastic properties, hereditary Boltzmann-Volterra theory of viscoelasticity is used. The effects of the parameters of Pasternak's bases, the influence of singularity in the heredity nuclei and the geometric parameters of the pipeline on the vibrations of structures with viscoelastic properties are numerically investigated. Figs.: 2. Refs.: 16 titles.

Keywords: pipe vibrations; base; pipeline; mathematical model; computational method; cylindrical shell.

Компьютерная инженерия

УДК 004.732.056

DOI: 10.20998/2411-0558.2018.42.05

С. Ю. ГАВРИЛЕНКО, канд. техн. наук, проф., НТУ "ХПИ",

В. В. ЧЕЛАК, магистр, НТУ "ХПИ",

В. В. ДАВЫДОВ, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ"

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ФИКСАЦИИ АНОМАЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ КОМПЬЮТЕРА

Предложена система фиксации аномальных состояний компьютера на базе нечеткой логики. В качестве входных данных модели использованы шаблоны нормального состояния компьютерной системы, базирующиеся на контрольных картах, BDS-статистике, показателе Херста и качественных метриках. Выполнена оптимизация системы и проведено ее тестирование, которое показало, что вероятность обнаружения аномальной работы компьютерной системы с учетом ложных срабатываний достигает 96,5%. Результаты исследований показали возможность использования разработанного модуля в эвристических анализаторах систем обнаружения вторжений. Ил.: 5. Библиогр.: 19 назв.

Ключевые слова: аномальное состояние, антивирусная защита информации; BDS-статистика; контрольные карты; показатель Херста; системы обнаружения вторжений; эвристический анализатор.

Постановка проблемы. Новые информационные технологии успешно внедряются во все сферы человеческой деятельности и являются самой большой ценностью современного общества. С ростом ценности информации вырос и спрос на неё, и вместе с этим – количество желающих получить к ней несанкционированный доступ за счет использования компьютерных вирусов. Указанная проблема усиливается распространением Интернет-технологий, переходом на облачные технологии и динамическим ростом количества мобильных устройств. Все это приводит к росту количества вредоносного программного обеспечения (ВПО). Несмотря на принятые во многих странах законы по борьбе с компьютерными преступлениями и разработку специальных программных средств защиты от вирусов, количество новых программных вирусов постоянно растет. Поэтому актуальной темой является разработка эффективных методов и технологий противостояния компьютерным вирусам, что позволит своевременно обнаружить аномальное состояние компьютерной системы и предотвратит возможные катастрофические последствия.

Анализ литературы [1, 2] показал, что современные антивирусные программы не могут обеспечить полную защиту компьютерных систем (КС). Это обусловлено тем, что принципы анализа ВПО не могут обнаружить новые версии вредоносных программ до их анализа

аналитиками антивирусных компаний, и внесения сигнатур вновь созданных вирусов в антивирусные базы данных. Использование различных эвристических моделей оценки состояния объекта по результатам измерений контролируемых показателей и базирующихся на различных методах, также имеет ряд недостатков.

Так использование многофакторных дискриминантных моделей [3] зависит от особенностей контролируемых показателей, их смысла, объема, что приводит к низкой точности и скорости, высокой вероятности ложных срабатываний.

Кластерный анализ [4, 5] достаточно прост в реализации, имеет однозначную трактовку результатов. Вместе с тем, принадлежность к какому-либо кластеру не всегда информативна, так как не учитывается близость точек к границам разделения на кластеры.

Мощным, эффективным методом является регрессионный анализ [6], позволяющий учесть также взаимодействие между выбранными показателями. Вместе с тем данному методу присуще жесткость механизма преобразования исходных данных в конечный результат, субъективный характер выбора вида конкретной зависимости (формальная подгонка модели под эмпирический материал), невозможность объяснения причинно-следственной связи [7 – 9] и, как следствие, недостаточная информативность результатов, что допускает неоднозначную их трактовку.

Дисперсионный анализ позволяет проверить наличие влияния взаимодействия факторов, но вместе с тем он чувствителен к нарушениям условий нормальности и гомоскедастичности.

Системы обнаружения аномального состояния системы также плохо адаптированы для обработки больших объемов данных в режиме реального времени [10, 11].

Данные недостатки трудно устранить, используя только классические методы обнаружения ВПО. Одним из путей увеличения эффективности систем компьютерной безопасности является аргументированный выбор критериев оценки аномального поведения КС.

В условиях воздействия на компьютерную систему ВПО изменяются показатели функционирования компьютерной системы (загрузка центрального процессора, оперативной памяти, трафика и т.д.), что зачастую приводит к сбоям в работе аппаратного и программного обеспечения. Проведенные исследования показали эффективность использования различных статистических методов обработки вышеперечисленных показателей функционирования системы для оценки состояния компьютера [12 – 17].

В данной работе в качестве входных данных разрабатываемой модели фиксации аномального состояния компьютерной системы (сканера) использованы ранее полученные нами результаты исследований: значения BDS-теста в статике и динамике [12, 13], показатель Херста [14], контрольные карты Шухарта (ККШ), карты кумулятивных сумм (КУСУМ), карты EWMA [15, 16] и Парето, а также качественные метрики, полученные посредством анализа РЕ-структуры файла и действий, выполняемых вредоносным программным обеспечением [17].

BDS-тест основан на статистической величине:

$$w_{m,N}(\varepsilon) = \sqrt{N - m + 1} \frac{C_{m,N}(\varepsilon) - C_{1,N-m}(\varepsilon)^m}{\sigma_{m,N}(\varepsilon)}, \quad (1)$$

где $w_{m,N}(\varepsilon)$ – значение BDS-статистики; N – число элементов временного ряда; $C_{m,N}(\varepsilon) - C_{1,N-m}(\varepsilon)^m$ – числитель BDS-статистики, определяющийся корреляционными интегралами $C_{m,N}(\varepsilon)$; $C_{1,N-m}(\varepsilon)^m$ для выборки размера m ; ε – радиус гиперсферы; $\sigma_{m,N}(\varepsilon)$ – среднеквадратичное отклонение разницы $C_{m,N}(\varepsilon) - C_{1,N-m}(\varepsilon)^m$.

Ранее нами получено [12, 13], что критерием оценки нормального состояния компьютерной системы для входных данных является значение джиттера BDS-теста в интервале [25%, 75%].

Показатель Херста характеризует степень самоподобия процесса. Предыдущие исследования показали [14], что влияние ряда вирусов на компьютерную систему приводит к изменению показателя Херста, который характеризуется стремлением к среднему значению 0,55, что указывает на случайность процесса, то есть процесс не является самоподобным.

Известно, что ККШ карты обнаруживают значительные и краткосрочные изменения процесса, карты КУСУМ – с большой вероятностью обнаруживают небольшие, но постоянные изменения, карты EWMA позволяют выполнять мониторинг полной истории выходных значений. Использование разных типов контрольных карт позволяет более точно оценить состояние компьютерной системы. Экспериментальные данные позволили построить шаблоны нормального состояния компьютерной системы, выход за рамки которых свидетельствует об аномальности [15, 16]. Признаком аномального состояния компьютерной системы также является:

- 112

где x_i ($i=1, 2, \dots, n$) – коэффициент значимости i -го признака, b_{ij} ($i=1, 2, \dots, n$, $j=1, 2, \dots, m$) – бинарные коэффициенты, означающие присутствие или отсутствие i -го признака в j -ом образце, K_a , K_b начало и конец диапазона допустимых значений выборки.

Цель статьи – разработка, исследование и совершенствование методов и моделей фиксации аномальных состояний компьютерных систем.

Результаты разработки сканера обнаружения вторжений в компьютерные системы. Так как часть входных данных имеет интервальный характер, то было принято решение в основе работы сканера использовать аппарат нечеткой логики [18, 19]. Кроме того, в отличие от традиционных математических задач, которые, требуют на каждом шаге моделирования однозначной формулировки закономерностей, нечеткая логика является совершенно иным уровнем мышления, при котором постулируется лишь минимальный набор закономерностей, благодаря которому творческий процесс моделирования происходит на наивысшем уровне абстракции. Она позволяет быстро моделировать сложные динамические системы и сравнивать их с заданной степенью точности.

Процесс нечеткого вывода представляет собой некоторую процедуру, или алгоритм получения нечетких выводов на основе нечетких условий или предпосылок. Этот процесс сочетает в себе все основные концепции теории нечетких множеств, функций принадлежности, лингвистических переменных, нечетких логических операций, методов нечеткой импликации и нечеткой композиции.

Структурная схема сканера приведена на рис. 1.

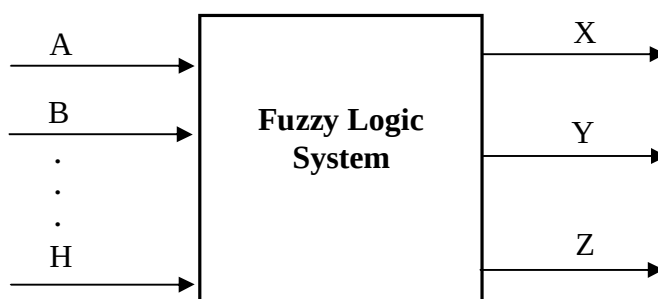


Рис. 1. Структурная схема системы фиксации аномального состояния компьютера

На рис. 1 приняты следующие обозначения: *A* – значение BDS-теста; *B* – значение контрольных карт Шухарта; *C* – значение карт CUSUM; *D* – значение EWMA-карт; *E* – значение показателя Хертста; *F* – значение качественной метрики (QM); *G* – значение BDS-теста виртуальной машины; *H* – значение карт Парето; *X* – активация подпрограммы "Лечение"; *Y* – активация подпрограммы "Удаление"; *Z* – активация подпрограммы "Карантин".

Активация выходных подпрограмм задана следующим образом. Если значение *X* или *Y*, или *Z* больше либо равно 0.75, запускается соответствующая подпрограмма. В случае срабатывания нескольких выходов приоритет вызова подпрограмм следующий: "Лечение" (*X*), Карантин (*Z*), Удаление (*Y*).

Входные лингвистические переменные для системы нечеткого вывода по методу Мамдани описаны таким кортежем:

$$\langle \alpha, T, L, G_r, M \rangle,$$

где: α – имя лингвистической переменной (*A, B, C, D, E, F, G, H*); *T* – множество значений (термов) входной лингвистической переменной {"Опасный", "Возможно опасный", "Неопределенный", "Безопасный", "Скорее безопасный"}; *L* – множество отградуированных значений входной переменной; *G_r* – процедура агрегации условий (новых термов); *M* – функция формирования нечеткого множества значений для каждого терма заданной лингвистической переменной.

Экспериментальные данные позволили определить для каждой из входных и выходных переменных количество, тип и значение функций принадлежности. Тестирование предложенной системы проводилось в пакете Matlab. Как видно из рис. 2, входная переменная *A* (значение BDS-теста) задана 5 функциями принадлежности: Z-образный, трапецевидный, треугольный и S-образный типы. Форма и границы функций принадлежности выбраны на основе экспериментальных данных.

Входные и выходные лингвистические переменные связываются базой правил. Фрагмент базы правил приведен на рис. 3, где темным цветом выделено правило нахождения объекта для нормального состояния. Предварительный расчет количества правил (произведение числа нечетких множеств всех входных переменных) показал, что число правил равно 45000, что является существенным недостатком данного метода. Для уменьшения количества правил принято решение выполнить попарное сравнение нечетких переменных. В результате получено 443 правила. Для более корректной работы, база правил дополнена 44 правилами для двух крайних ситуаций (срабатывают от 8 – 9 крайних

функций принадлежности) и 30 правилами для противоречивых ситуаций. В итоге получено 517 правил, что существенно увеличило быстродействие предложенной системы.

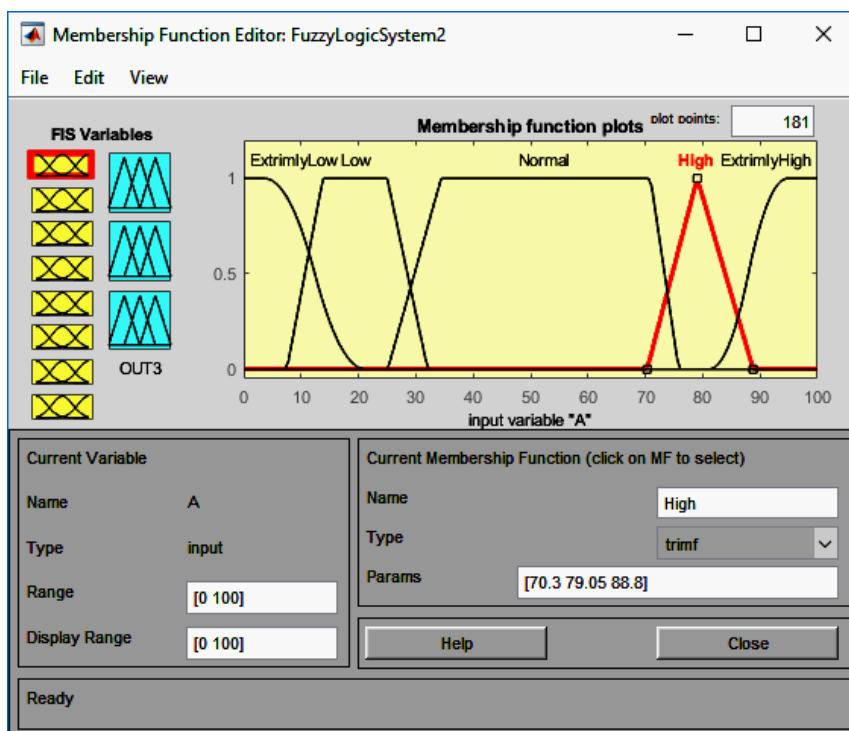


Рис.2. График функции принадлежности входной лингвистической переменной A (значение BDS теста)

В дальнейшем, для решения задачи, система нечеткого вывода принимает решение на основе весовых коэффициентов каждого из подусловий правила, и, опираясь на сложившуюся базу правил, дает определенный нечеткий вывод. Субъективная исходная оценка далее проходит процесс дефаззификации, то есть процесс перехода от функции принадлежности выходной лингвистической переменной к ее четкому числовому значению [18]. Процесс дефаззификации может проводиться различными методами, например, методом центра тяжести:

$$\Delta = \frac{\int_{\min}^{\max} xMF(x)dx}{\int_{\min}^{\max} MF(x)dx} \quad (5)$$

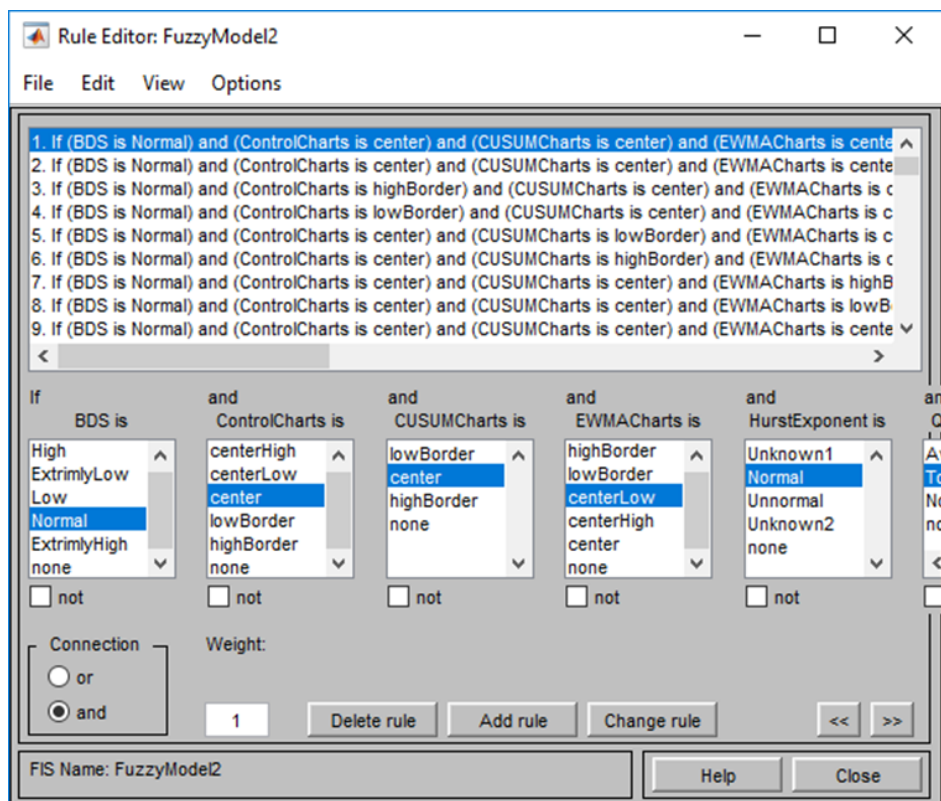


Рис. 3. Фрагмент базы правил системы нечеткого вывода

Фрагмент результатов фиксации аномального состояния системы с наихудшими показателями входных параметров приведен рис. 4.

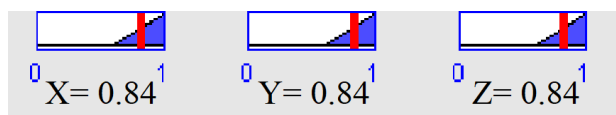


Рис. 4. Результат фиксации аномального состояния системы

На вход поданы следующие параметры компьютерной системы: значение BDS-теста – 0, значение контрольных карт Шухарта – 50, значение карт CUSUM – 50, значение EWMA-карт – 50, значение показателя Хертста 55, качественной метрики (QM) – 30, значение BDS-теста виртуальной машины – 0, значение карт Парето – 100. Получены следующие выходные значения: $X = 0,84$; $Y = 0,84$; $Z = 0,84$. Согласно ранее разработанной базе правил, такой результат свидетельствует об аномальности компьютерной системы. Как результат, выполнится

активации программы "Лечение". В случае отрицательного результата подпрограммы, активируется подпрограмма "Карантин". В худшем случае, будет активирована подпрограмма "Удаление", которая деактивирует вредоносное ПО и удалит все данные, которые были связаны с ним (данные реестра, ОЗУ, файлы, скрипты установки и т.п.).

Обобщенные результаты эксперимента приведены на рис. 5. Всего использовалось 4 типа ВПО, процесс распознавания длился 500 с. Как видно из графика в течении 500 с было обнаружено около 96,5% вредоносного программного обеспечения с учетом ложных срабатываний.

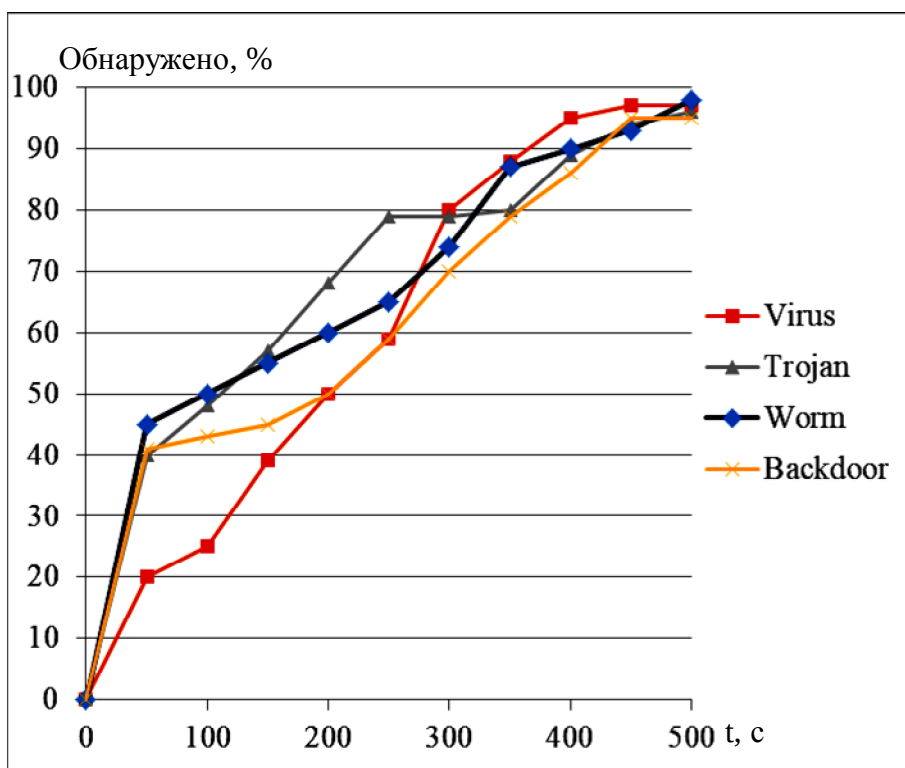


Рис. 5. Результаты тестирования системы

Выводы. В работе проведено сравнительное исследование основных методов оценки состояний компьютерных систем, показаны их преимущества и недостатки. Предложена система фиксации аномального состояния компьютера.

Впервые, в качестве входных данных системы использованы критерии, полученные и апробированные в предыдущих исследованиях:

шаблоны нормального состояния КС, базирующиеся на контрольных картах, BDS-статистике, показателе Херста и качественных метриках.

В основе работы системы использовано аппарат нечеткой логики. Выполнена оптимизация работы предложенной системы за счет уменьшения количества правил, связывающих входные и выходные нечеткие переменные, что позволило увеличить ее быстродействие.

Проведено тестирование разработанной системы, которое показало, что вероятность обнаружения ВПО, с учетом ложных срабатываний, составляет 96.5%.

Полученные результаты исследований показали, что предложенная система фиксации аномального состояния компьютера позволяет строить многоуровневые нечеткие продукционные модели, а используемый механизм нечеткого вывода на основе алгоритма Мамдани (Mamdani) позволяет принять решение и выработать меры по предотвращению катастрофических последствий.

Список литературы:

1. Семенов С.Г. Защита данных в компьютеризированных управляющих системах (монография) / С.Г. Семенов, В.В. Давыдов, С.Ю. Гавриленко // "LAP LAMBERT ACADEMIC PUBLISHING": Germany, 2014. – 236 с.
2. Шелухин О.И. Обнаружение вторжений в компьютерные сети / О.И. Шелухин, Д.Ж. Сакалема, А.С. Филинова. – М.: Горячая линия-Телеком, 2013. – 220 с.
3. Illowsky Barbara. Introductory Statistics / Barbara Illowsky, Susan Dean. – OpenStax CNX, 2014. – 905 p.
4. Everitt Brian. Cluster analysis / Brian Everitt. – Chichester, West Sussex, U.K: Wiley, 2011. – 330 p.
5. Суслов С.А. Кластерный анализ: сущность, преимущества и недостатки / С.А. Суслов // Вестник НГИЭИ. – 2010. – Vol. 1. – № 1. – С. 51-57.
6. Sen A. Regression Analysis – Theory, Methods, and Applications / A. Sen, M. Srivastava. – Springer-Verlag, Berlin, 2011. – 264 p.
7. Nugzar Todua. ANOVA in marketing research of consumer behavior of different categories in georgian market / Todua Nugzar, Dotchviri Teona // Annals of the Constantin Brancusi University of Targu Jiu. – Economy Series. – 2015. – Issue 1. – Vol. I. – P. 183-189.
8. Weedmark David. The Advantages & Disadvantages of a Multiple Regression Model. – Sciencing. – 2018. <https://sciencing.com/advantages-disadvantages-multiple-regression-model-12070171.html>.
9. Flom Peter. The Disadvantages of Linear Regression. – Sciencing, 2018, <https://sciencing.com/disadvantages-linear-regression-8562780.html>.
10. Лукацкий А.В. Обнаружение атак. – СПб.: ВХВ-Петербург, 2001. – 624 с.
11. Касперский К. Играй, как "Лаборатория Касперского": компания открывает доступ к своей базе знаний о киберугрозах в рамках нового бизнес-сервиса – Режим доступа: https://www.kaspersky.ru/about/press-releases/2017_kompaniya-otkryvayet-dostup-k-svoyey-baze-znaniy-o-kiberugrozakh-v-ramkakh-novogo-biznes-servisa
12. Семенов С.Г. Разработка шаблонов идентификации состояния компьютерных систем на основе BDS-тестирования / С.Г. Семенов, С.Ю. Гавриленко, В.В. Челак // Вісник НТУ

"ХПІ". Серія "Інформатика та моделювання". – Харків: НТУ "ХПІ", 2016.– № 21. – С. 118-125.

13. Semenov S. Developing parametrical criterion for registering abnormal behavior in computer and telecommunication systems on the basis of economic test // *S. Semenov, S. Gavrilenko, V. Chelak* // Actual problems of economics. – Kiev, 2016. – Vol 4 (178). – P. 451-459.

14. Gavrylenko S. Investigation of intrusion in computer systems based on the hurst exponent / *S. Gavrylenko, V. Chelak, N. Bilogorskiy* // Advanced Information System. Quarterly scientific and technical journal. – Kharkiv: KhPI, 2017. – Vol. 1. – № 2. – P. 58-61.

15. Gavrylenko S. Intrusion detection in computer systems / *S. Gavrilenko, V. Chelak, O. Hornostal* // Proceedings of the symposium "Metrology and metrology assurance". – Sozopol, Bulgaria, 2016. – P. 342-347.

16. Гавриленко С.Ю. Разработка адаптивных шаблонов фиксации аномального поведения компьютерной системы / *С.Г. Семенов, С.Ю. Гавриленко, А.А. Горносталь* // Зб. наукових праць. Системи обробки інформації. – Х.: ХУ ПС, 2016. – № 3 (140). – С. 11-14.

17. Gavrylenko S. Development of the method and program model of the static analyzer of harmful files / *S. Gavrylenko and D. Saenko* // Advanced Information System. Quarterly scientific and technical journal. – Kharkiv: KhPI, 2017. – Vol. 1. – № 1. – P.44-48.

18. Gavrylenko S. Development of a heuristic antivirus scanner based on the file's PE-structure analysis / *S.Yu. Gavrylenko, M.S. Melnyk, V.V. Chelak* // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. Міжнародний науково-технічний журнал.– Вінниця: ВНТУ, 2017. – №3 (40). – С. 23-29.

19. Зайченко Ю.П. Нечеткие модели и методы в интеллектуальных системах / *Ю.П. Зайченко*. – К.: Слово, 2008. – 344 с.

References:

- 1. Semenov, S., Davydov, V. and Gavrilenko, S. (2014),** *Data Protection in Computer-Aided Control Systems*, "LAP LAMBERT ACADEMIC PUBLISHING", Germany, 236 p.
- 2. Shelukhin, O.I., Sakalema, D.Zh. and Filinova, A.S. (2013),** *Detection of intrusions into computer networks*. Hot line-Telecom, Moscow, 220 p.
- 3. Illowsky, Barbara, Dean, Susan (2014),** *Introductory Statistics*, OpenStax CNX, 905 p.
- 4. Everitt, Brian (2011),** *Cluster analysis*, Chichester, West Sussex, U.K: Wiley, 330 p.
- 5. Suslov, S.A. (2010),** "Cluster analysis: the nature, advantages and disadvantages", *Vestnik NGIEI*, Vol. 1, No. 1, pp. 51-57.
- 6. Sen, A., Srivastava, M. (2011),** *Regression Analysis – Theory, Methods, and Applications*, Springer-Verlag, Berlin, 264 p.
- 7. Nugzar, Todua and Teona, Dotchviri (2015),** "ANOVA in marketing research of consumer behavior of different categories in georgian market", *Annals of the "Constantin Brancusi" University of Targu Jiu, Economy Series*, Issue 1, Vol. I, pp 183-189.
- 8. Weedmark, David (2018),** *The Advantages & Disadvantages of a Multiple Regression Model*. Sciencing, available at: <https://sciencing.com/advantages-disadvantages-multiple-regression-model-12070171.html>.
- 9. Flom, Peter (2018),** *The Disadvantages of Linear Regression*, Sciencing, available at: <https://sciencing.com/disadvantages-linear-regression-8562780.html>.
- 10. Lukatsky, A.V. (2001),** *Detection of attacks*, VKhV, St. Petersburg, 624 p.
- 11. Kaspersky, K. (2017),** *Play as Kaspersky Lab: The company opens up access to its knowledge base on cyber threats within a new business service*, available at:

https://www.kaspersky.com/about/press-releases/2017_kompaniya-otkryvayet-dostup-k-svoyey-baz-znaniy-o-cybergrozakh-v-ramkakh-novogo-business-service

12. Semenov, S., Gavrilenko, S. and Chelak, V. (2016), "Development of templates for the identification of the state of computer systems based on BDS-testing", *Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling*, Vol. 21, pp.118-125.
13. Semenov, S., Gavrilenko, S. and Chelak, V. (2016), "Developing parametrical criterion for registering abnormal behavior in computer and telecommunication systems on the basis of economic test", *Actual problems of economics*, Vol 4 (178), pp. 451-459.
14. Gavrylenko, S., Chelak, V. and Bilogorskiy, N. (2017), "Investigation of intrusion in computer systems based on the hurst exponent", *Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Advanced Information System*, Volume 1, No. 2, pp.58-61.
15. Gavrilenko, S., Chelak, V., Hornostal, O. (2016), "Intrusion detection in computer systems". *Proceedings of the symposium "Metrology and metrology assurance"*, Sozopol, Bulgaria, pp. 342-347.
16. Gavrilenko, S.Yu., Semenov, S.G. and Gornostal, A.A. (2016), "Development of adaptive patterns for fixing anomalous behavior of a computer system", *Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Sb. scientific works Systems of information processing*, Vol. 3 (140), pp. 11-14.
17. Gavrylenko, S. and Saenko, D. (2017), "Development of the method and program model of the static analyzer of harmful files", *Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Advanced Information System. Quarterly scientific and technical journal*, Vol. 1, No1, pp.44-48.
18. Gavrylenko, S.Yu., Melnyk, M.S. and Chelak, V.V. (2017), "Development of a heuristic antivirus scanner based on the file's PE-structure analysis", *Herald of the Vinnitsa National Technical University. Subject issue: Information Technology and Computer Engineering. International scientific and technical journal*, No. 3 (40), pp. 23-29.
19. Zaychenko, Yu.P. (2008), *Fuzzy Models and Methods in Intellectual Systems*, Word, Kiev, 344 pp.

Статью представил д.т.н., проф. Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" С.Г. Семенов

Поступила (received) 23.10.2018

Gavrilenko Svetlana, PhD Tech.,
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Kirpicheva, 21, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel: (057) 707-01-65, e-mail: 7573997@gmail.com
ORCID ID: 0000-0002-6919-0055

Chelak Viktor, master
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Kirpicheva, 21, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel: (050) 867-88-55, e-mail: victor.chelak@gmail.com
ORCID ID: 0000-0001-8810-3394

Davydov Viacheslav, PhD Tech.,
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Kirpicheva, 21, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel: (050) 867-88-55, e-mail: vyacheslav.v.davydov@gmail.com
ORCID ID: 0000-0002-2976-8422

УДК 004.732.056

Розробка системи фіксації аномального стану комп'ютера / Гавриленко С.Ю., Челака В.В., Давидов В.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2018. – № 42 (1318). – С. 109 – 121.

Представлено систему фіксації аномального стану комп'ютера на базі нечіткої логіки. В якості вхідних даних моделі використані шаблони нормального стану комп'ютерної системи, що базуються на контрольних картах, BDS-статистике, показниках Херста, а також якісних метриках. Виконано оптимізацію системи за рахунок зменшення кількості правил, що дозволило збільшити її швидкість. Проведено тестування розробленої системи, яке показало, що вірогідність виявлення наявності аномальної роботи комп'ютерної системи з урахуванням помилкових спрацювань досягає 96,5%. Результати дослідження показали можливість використання розробленого модуля у евристичних аналізаторах систем виявлення вторгнень. Іл.: 5. Бібліогр.: 19 назв.

Ключові слова: аномальне стан; антивірусний захист інформації; BDS-статистика; контрольні карти; показник Херста; системи виявлення вторгнень; евристичний аналізатор.

УДК 004.732.056

Разработка системы фиксации аномальных состояний компьютера / Гавриленко С.Ю., Челака В.В., Давыдов В.В. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2018. – № 42 (1318). – С. 109 – 121.

Предложена система фиксации аномального состояния компьютера на базе нечеткой логики. В качестве входных данных модели использованы шаблоны нормального состояния компьютерной системы, базирующиеся на контрольных картах, BDS-статистике, показателе Херста и качественных метриках. Выполнена оптимизация системы и проведено тестирование системы, которое показало, что вероятность обнаружения аномальной работы компьютерной системы с учетом ложных срабатываний достигает 96,5%. Результаты исследований показали возможность использования разработанного модуля в эвристических анализаторах систем обнаружения вторжений. Ил.: 5. Библиогр.: 19 назв.

Ключевые слова: аномальное состояние; антивирусная защита информации; BDS-статистика; контрольные карты; показатель Херста; системы обнаружения вторжений; эвристический анализатор.

UDC 004.732.056

Development of a system for fixing a computer's anomalous state / Gavrilenko S.Yu., Chelak V.V., Davydov V.V. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2018. – №.42 (1318). – P. 109 – 121.

The means of anti-virus information protection, their advantages and disadvantages are considered. A system for fixing the anomalous computer state, based on fuzzy logic, is proposed. The models of the normal state of a computer system based on control charts, BDS-statistics, the Hurst index, as well as qualitative metrics, were used as input data of the model. The system was optimized by reducing the number of rules, which made it possible to increase its speed. Testing of the developed system was carried out, which showed that the probability of detecting the presence of abnormal operation of a computer system, taking into account false alarms, reaches 96,5%. The results of the research showed the possibility of using the developed module in heuristic analyzers of intrusion detection systems. Figs.: 5. Bibliography: 19 titles.

Keywords: anomalous state; anti-virus information protection; BDS-statistics; control cards; Hurst indicator; intrusion detection systems; heuristic analyzer.

***Автоматизация и компьютерно-
интегрированные технологии***

УДК: 661.333(075)–048.34:005.337 DOI: 10.20998/2411-0558.2018.42.03

А. О. БОБУХ, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПІ",

А. М. ПЕРЕВЕРЗЄВА, асп., НТУ "ХПІ"

РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ СТРУКТУРНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА КАЛЬЦИНОВАНОЇ СОДИ

В результаті досліджень розроблено алгоритм структурної ідентифікації на базі методу покрокової регресії, який є економічним з точки зору необхідного для його реалізації числа операцій, сприяє значному підвищенню енергозбереження з поліпшенням якості управління за рахунок отримання адекватного математичного опису технологій при розробці та впровадженні комп'ютерно-інформаційної технології виробництва кальцинованої соди аміачним способом. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: алгоритм; структурна ідентифікація; покрокова регресія; управління; комп'ютерно-інформаційна технологія; виробництво кальцинованої соди.

Постановка проблеми. Процес визначення математичної моделі хімічних технологій включає як їх експериментальне дослідження, так і розробку алгоритмів, які передбачають визначення структури моделі (структурна ідентифікація), оцінку параметрів математичної моделі визначеної структури (параметрична ідентифікація) та оцінку адекватності цієї моделі реальної технології [1 – 9].

Значні труднощі отримання адекватного математичного опису технології виробництва кальцинованої соди (ТВКС) завдають неконтрольовані зміни значень параметрів технологічних процесів, які викликані старінням обладнання, нестабільністю характеристик сировини тощо. При ідентифікації ТВКС лінійних параметрів математичних моделей описується широкий клас технологій: статичних, динамічних, лінійних та нелінійних за незалежними параметрами. Використовуються нелінійні математичні моделі не вище другого порядку [10].

Підвищення точності ідентифікації технології шляхом його опису нелінійними математичними моделями статички до другого порядку приводе до багато розмірної задачі параметричної ідентифікації, а з урахуванням інерційності технологій отримують ще більше розмірні задачі.

Для виходу із цієї складної ситуації треба розробити алгоритми, які б забезпечували зменшення розмірності математичної моделі шляхом виключення із її структури незалежних параметрів (парних добутоків параметрів тощо), які не забезпечують значного підвищення точності цієї моделі.

Аналіз літератури. При структурній ідентифікації визначають структуру і вид оператора технології, або іншими словами вид математичної моделі технології. Завданням структурної ідентифікації є уявлення реальної технології у вигляді математичної моделі, конкретний вибір якої залежить від типу технології [1 – 9].

До існуючих методів структурної ідентифікації відноситься цілий ряд алгоритмів, які дозволяють з моделей заданого класу вибрати оптимальну модель. Найбільш відомими є: метод усіх регресій, покрокова регресія (методи послідовного включення і виключення), метод Ефроїмсона, метод групового обліку аргументів [1 – 5]. У цих роботах подано докладний огляд існуючих методів структурної ідентифікації. Для зазначених методів важко дати вичерпний порівняльний аналіз, так як одні з них носять більш строгий характер (методи всіх регресій, Ефроїмсона), інші – в значній мірі евристичну організацію [6 – 9]. Все це, в свою чергу, ускладнює вибір конкретного методу структурної ідентифікації.

Мета статті – розробити алгоритм структурної ідентифікації на базі методу покрокової регресії, який був би економічним з точки зору необхідної для його реалізації кількості операцій, сприяв підвищенню енергозбереження з покращанням якості управління за рахунок отримання адекватного математичного опису технологій при розробці та впровадженні комп'ютерно-інформаційної технології виробництва кальцинованої соди аміачним способом.

Матеріали та результати аналізу. Введемо деякі допущення:

1) задаємо клас операторів $A_k \in A$, якими можливо описати співвідношення поміж вхідними (незалежними) та вихідними (залежними) параметрами ТВКС, для якої виконується ідентифікація, тобто вигляд математичної моделі визначається рівнянням:

$$y = A_k(x), \quad (1)$$

де y – вихід (залежний параметр) ТВКС; $x = (x_1, \dots, x_k)^T$, k – мірний вектор входів (незалежних) параметрів ТВКС; T – символ транспонування; A_k – оператор ТВКС, який треба визначити.

Практично в залежності від призначення математичної моделі (управління, прогнозування, оптимізації тощо) клас операторів задається евристично.

2) усі оператори A_k можливо апроксимувати на базі співвідношення:

$$A_k(x) = k^T \varphi(x), \quad (2)$$

де $k = (k_1, \dots, k_m)^T$ – m -мірний вектор; $\varphi(x) = (\varphi_1(x), \dots, \varphi_m(x))^T$ – m -мірний вектор, елементами якого є деякі функціональні перетворення від вхідних (незалежних) параметрів.

Шляхом відповідного вибору елементів m -мірного вектору k , які дорівнюють нулю або деякій величині, яка не дорівнює нулю, можливо апроксимувати з достатнім ступенем точності будь-який з операторів $A_k \in A$ (для скорочення запису в подальшому $\varphi(x) = (\varphi_1(x), \dots, \varphi_m(x))^T$ будемо позначати φ). Розглянуте допущення вводимо для лінійної параметризації завдання ідентифікації, воно є поширеним способом апроксимації;

3) існує оператор $A_k^{\text{опт}} \in A$, який краще других операторів $A_k \in A$ описує ТВКС, який ідентифікують, та складається із елементів $\varphi^{\text{опт}} \supset \varphi$;

4) виходячи із того, що оператори A_k апроксимуються лінійною комбінацією елементів вектора (множини) φ , якість апроксимації справжнього оператора краще за все оцінювати коефіцієнтом множинної кореляції $R_{y/\varphi}^{\text{онм}}$;

5) якість оцінки параметрів математичної моделі краще за все визначати за допомогою випуклого функціонала від різниці виходів цієї моделі та ТВКС.

За зазначених допущеннях формальна постановка завдання структурної ідентифікації визначається наступним чином: із заданого класу операторів A необхідно вибрати оператор $A_k^{\text{опт}} \in A$ та оцінити його параметри, які складаються із елементів $\varphi^{\text{опт}} \supset \varphi$, при цьому повинні виконуватися умови критерію:

$$R_{y/\varphi}^{\text{онм}} = \max R_{y/\varphi^j}; \quad \forall \varphi^j \subset \varphi; \quad j \leq r \leq m, \quad (3)$$

де j – кількість елементів в множині φ^j ; r – максимально допустиме значення j ; m – розмірність вектору φ ,

а потім визначити оцінку вектора k на основі оптимізації вибраного випуклого показника якості (різниця виходів цієї математичної моделі та ТВКС).

Наведена постановка завдання структурної ідентифікації стала

початковою для розробки алгоритму, який здатний реагувати як на параметричну, а також на структурну нестаціонарність математичних моделей ТВКС. Під структурною нестаціонарністю моделі будемо розуміти таку параметричну нестаціонарність, при якій деякі значимі параметри моделі можуть стати не значимими та/або навпаки.

Одним із таких алгоритмів може стати алгоритм структурної ідентифікації, який подібний алгоритму покрокової регресії [1 – 5], але реалізований шляхом рекурентного розрахунку коефіцієнтів часткової кореляції, що підвищує швидкість його розрахунку.

Для розробленого алгоритму прийняте співвідношення:

$$\frac{S_e^2}{S_y^2} = 1 - R_{y/\Phi^j} = \prod_{i=1}^r (1 - \rho_{y, \Phi_i \cdot \Phi^{i-1}}), \quad \Phi_i \in \Phi \setminus \Phi^{i-1}, \quad (4)$$

де R_{y/Φ^j} – коефіцієнт множинної кореляції; S_e^2 – оцінка дисперсії залишкової помилки математичної моделі; S_y^2 – оцінка дисперсії виходу об'єкта; $\rho_{y, \Phi_i \cdot \Phi^{i-1}}$ – коефіцієнти часткової кореляції;

$$\rho_{y, \Phi_i \cdot \Phi^{i-1}} = \frac{\rho_{y, \Phi_i \cdot \Phi^{i-1}} - \rho_{y, \Phi_{i-1} \cdot \Phi^{i-2}} \cdot \rho_{y, \Phi_{i-1} \cdot \Phi^{i-2}}}{[(1 - \rho_{y, \Phi_{i-1} \cdot \Phi^{i-2}})(1 - \rho_{y, \Phi_{i-1} \cdot \Phi^{i-2}})]^{1/2}}, \quad (5)$$

$i-1$ – число елементів множини Φ^{i-1} .

В формулах (4) та (5) припускається, що елементи множини Φ підпорядковані та включені в множину Φ^{i-1} послідовно 1, 2, ..., $i-1$ тим саме, обумовлено виконання умови $\Phi_i \in \Phi \setminus \Phi^{i-1}$.

На кожному кроці алгоритму (4) перевіряються умови зупинки вибору структури за рахунок зменшення кількості моделей, що розглядаються, тому:

– на першому кроці визначаються усі моделі з одним незалежним параметром. Із цих моделей вибирається та модель, у якій значення критерію (3) максимальне;

– на другому кроці до незалежного параметра в модель, яка вибрана на першому кроці, доповнюються один по одному усі незалежні параметри, що залишилися в множині Φ^m (те ж саме виконується до $(i-1)$ -го кроку);

– на i -му кроці до незалежних параметрів, які вибрані в моделі на $(i-1)$ -му кроці, доповнюються по одному усі незалежні параметри, які залишилися в множині Φ^{m-i+1} .

Після цього визначаються математичні моделі з i -ми незалежними параметрами, а із них вибирається математична модель, яка приводить до максимального значення критерію (3).

Процедура продовжується поки не буде виконаний критерій зупинки процесу вибору математичної моделі, але не більше r кроків, оскільки кількість незалежних параметрів в моделі повинно бути не більше r .

Кількість (k) математичних моделей за методом покрокової регресії, які треба переглянути, визначається [1 – 5] за рівнянням:

$$k = \sum_{i=1}^r (m-i+1) + 1. \quad (6)$$

Для зупинки вибору математичної моделі за методом покрокової регресії мають місце дві різновидності критерію цього вибору, перша з них зв'язана із статистикою:

$$E_j = \frac{R_{y/\Phi^j}^2 - R_{y/\Phi^{j-1}}^2}{t-j-1} \cdot \frac{1}{1 - R_{y/\Phi^{j-1}}^2}, \quad (7)$$

яка має розподілення Фішера [5] $F(1, t-j-1)$. Гіпотеза про значимість приросту коефіцієнта множинної кореляції (тобто гіпотеза про необхідність продовження вибору моделі) сприймається, якщо

$$E_j > F(1, t-j-1, \alpha), \quad (8)$$

де α – заданий рівень значимості.

Друга різновидність критерію вибору математичної моделі дозволяє припинити вибір моделі, якщо в множині $\Phi \setminus \Phi^i$ не залишилось елементів Φ_k , для яких коефіцієнт кореляції з елементами Φ^i менший заданого значення $R_{\max}$ (який дорівнює 0,95 – 0,99).

Дослідження підтвердили [4, 5], що розроблений алгоритм структурної ідентифікації (разом з двома різновидностями критерію вибору моделі) є економічним з точки зору необхідної для його реалізації кількості операцій, оскільки не потребує для вибору структури побудови адекватних математичних моделей.

Розроблений алгоритм ідентифікації має підвищену швидкодію та точність ідентифікації, а також може бути застосований для широкого класу не тільки статичних, але також динамічних технологій.

Реалізація розробленого алгоритму може бути виконана на базі сучасних мікропроцесорних контролерів при розробці комп'ютерно-інформаційної ТВКС для підвищення енергозбереження цієї технології.

Висновок. В результаті досліджень розроблений алгоритм структурної ідентифікації на базі методу покрокової регресії, який є економічним з точки зору необхідної для його реалізації кількості операцій, сприяє значному підвищенню енергозбереження з покращанням якості технологій за рахунок отримання адекватного математичного опису при впровадженні комп'ютерно-інформаційної технології виробництва кальцинованої соди за аміачним способом.

Список літератури:

1. Горлач Б.А. Математическое моделирование. Построение моделей и численная реализация / Б.А. Горлач, В.Г. Шахов. – М.: Лань, 2016. – 292 с.
2. Тарасик В.П. Математическое моделирование технических систем. Учебник / В.П. Тарасик. – М.: Инфра-М, Новое знание, 2016. – 592 с.
3. Федоткин И.М. Математическое моделирование технологических процессов / И.М. Федоткин. – М.: Ленанд, 2015. – 416 с.
4. Емельянов С.В. Информационные технологии и вычислительные системы: вычислительные системы. Математическое моделирование. Прикладные аспекты информатики / С.В. Емельянов. – М.: Ленанд, 2015. – 96 с.
5. Yiannis Boutalis System Identification and Adaptive Control / Boutalis Yiannis, Manolis A. Christodoulou, Teodor Kommac, Dimitrios Theodoridis // Springer International Publishing Switzerland. – 2014. – 313 p.
6. Charlie C.L. Wang Recent technology in design and manufacturing automation / C.L. Wang Charlie // International Journal of Computer Integrated Manufacturing.– 2013.– 26 p.
7. Kandethody M. Ramachandran Mathematical Statistics with Applications // M. Ramachandran Kandethody, P. Tsokos Chris. – Elsevier, 2014. – 848 с.
8. Переверзева А.М. Розробка математичної моделі статистики технології насичення очищеного розсолу газами виробництва соди / А.М. Переверзева, А.О. Бобух // Вісник НТУ "ХПІ". – Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х.: НТУ "ХПІ". – 2017. – № 42 (1214). – С. 68-73.
9. Бобух А.О. Синтез адаптивних методів керування технологічними об'єктами хімічної промисловості / А.О. Бобух, О.М. Дзевочко, М.О. Подустов, А.М. Переверзева // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія. – Х.: НТУ "ХПІ". – 2016. – № 35 (1207). – С. 31-36.
10. Малакей З.А. Некоторые особенности и современные тенденции производства кальцинированной соды / З.А. Малакей, Л.З. Васерман // Химия и технология основной химической промышленности. Сборник научных трудов ГУ "НИОХИМ". – Харьков. – 2016. – Т. 78. – С. 21-36.

References:

1. Gorlach, B.A., Gorlach, B.A., and Shahov, V.G. (2016), *Mathematical modeling. Model building and numerical implementation*, Lan, Moskow, 292 p..

2. Tarasik, V.P. (2016), *Mathematical modeling of technical systems*, Infra-M, Moscow, New Knowledge, 592 p.
3. Fedotkin, I.M. (2015), *Mathematical modeling of technological processes*, Lenand, Moscow, 416 p.
4. Emelyanov, S.V. (2015), *Information technology and computing systems: computing systems. Math modeling. Applied Aspects of Computer Science*, Lenand, Moscow, 96 p.
5. Yiannis Boutalis, Manolis A. Christodoulou, and Dimitrios Theodoridis (2014), "System Identification and Adaptive Control", *Springer International Publishing Switzerland*, 313 p.
6. Charlie C.L. Wang (2013), "Recent technology in design and manufacturing automation", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 26 p.
7. Kandethody M. Ramachandran, and Chris P. Tsokos (2014), *Mathematical Statistics with Applications*, Elsevier, 848 p.
8. Pereverzieva A.M., and Bobukh A.O. (2017), "Development of a mathematical model of static technologies purified brine saturation gas production of sod", *Visnik NTU "HPI". Series: New solutions in modern technology, Kharkiv.*, no 32 (1254), p. 68-73.
9. Bobukh A.O., Dzevochko O.M., Podustov M.O., and Pereverzova A.M. (2016), "Synthesis of adaptive methods of Kerwan by technological processes of chemical industry", *Bulletin of NTU "KhPI". Seria: Chemistry, hemy technology and ecolog., Kharkiv.*, no. 35 (1207), p. 31-36.
10. Malakey Z.A., and Vaserman L.Z. (2016), "Some features and modern trends in the production of soda ash", *Chemistry and technology of the main chemical industry. Collection of scientific papers GU "NIOHIM", Kharkiv*, no. 78, p. 21-36.

Статтю представив д-р техн. наук, проф. НТУ "ХПІ", зав. каф. АТС та ЕМ Подустов М.О.

Поступила (received) 08.10.2018

Bobukh Anatoly, PhD Tech.,
National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute",
Str. Kirpicheva, 2, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel.: +38-096-233-47-96, e-mail: aabobukh@ukr.net
ORCID ID 0000-0002-3405-386X

Pereverzieva Alevtyna, postgraduate,
National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute",
Str. Kirpicheva, 2, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel.: +38-095-253-12-63 e-mail: pereverzieva_alyna@ukr.net
ORCID ID 0000-0003-2072-2521

УДК: 661.333(075)–048.34:005.337

Розробка алгоритму структурної ідентифікації технології виробництва кальцинованої соди / Бобух А.О., Переверзева А.М. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2018. – № 42 (1318). – С. 123 – 130.

В результаті досліджень розроблено алгоритм структурної ідентифікації на базі методу покрокової регресії, який є економічним з точки зору необхідного для його реалізації числа операцій, сприяє значному підвищенню енергозбереження з поліпшенням якості управління за рахунок отримання адекватного математичного опису технологій при розробці та впровадженні комп'ютерно-інформаційної технології виробництва кальцинованої соди аміачним способом. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: алгоритм; структурна ідентифікація; покрокова регресія; управління; комп'ютерно-інформаційна технологія; виробництво кальцинованої соди.

УДК: 661.333(075)–048.34:005.337

Разработка алгоритма структурной идентификации технологии производства кальцинированной соды / Бобух А.А., Переверзева А.Н. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2018. – № 42 (1318). – С. 123 – 130.

В результате исследований разработан алгоритм структурной идентификации на базе метода пошаговой регрессии, который является экономичным с точки зрения необходимого для его реализации числа операций, способствует значительному повышению энергосбережения с улучшением качества управления за счет получения адекватного математического описания технологий при разработке и внедрении компьютерно-информационной технологии производства кальцинированной соды аммиачным способом. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: алгоритм; структурная идентификация; пошаговая регрессия; управление; компьютерно-информационная технология; производство кальцинированной соды.

UDC 661.333(075)–048.34:005.337

Development of algorithm for structural identification of the technology of production of calcined soda technologies / Bobukh A.A., Pereverzieva A.N. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2018. – №.42 (1318). – P. 123 – 130.

As a result of the research, the algorithm of structural identification based on the step-by-step regression method, which is economical in terms of the number of operations necessary for its implementation, has been developed, contributes to a significant increase in energy savings with improved management quality by obtaining an adequate mathematical description of technologies in the design and implementation of computer-information technology by production calcined soda by ammonia. Refs.: 10 titles.

Keywords: algorithm; structural identification; step-by-step regression; control; computer-information technology; production of calcined soda.

УДК 519.6

DOI: 10.20998/2411-0558.2018.42.04

В. В. ВАХОБОВ, доц., ТИИМСХ, Ташкент

О ВЫБОРЕ ПАРАМЕТРОВ МИНИМАКСНОГО ПЛАНА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ПРИЁМОЧНОГО КОНТРОЛЯ

Оценка качества готовой промышленной или сельскохозяйственной продукции, например, длина или диаметр изготовленной детали, всхожесть зерна, длина волокна хлопка и другие факторы исследования проводятся методами статистического приемочного контроля (СПК). СПК дает возможность, с одной стороны, осуществить текущий контроль производственного процесса, своевременно предотвращая выпуск некачественных изделий, с другой стороны, позволяет с наименьшими затратами проводить приемку выпускаемой готовой продукции. Последнее достигается с помощью выбора планов СПК. В данной работе рассматривается вопрос о выборе параметров последовательного контроля, минимизирующего максимальные потери. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: оценка качества; статистический приемочный контроль; текущий контроль; производственный процесс.

Постановка проблемы. Наиболее распространенная форма выбора планов СПК заключается в следующем:

Из генеральной совокупности, представленной на контроль, извлекается случайная выборка объема n и измеряется качественный или количественный признак X . Пусть $x_1, x_2, \dots, x_n$ – результаты выборочного обследования на основании которого строятся оценка $g(\bar{\theta}_n(x_1, x_2, \dots, x_n))$ и рассматривается следующее решающее правило:

Если $g(\bar{\theta}_n) \leq k$, то оставшаяся часть изделий (не попавшая в выборку) без обследования принимается, а в противном случае, т.е. при $g(\bar{\theta}_n) > k$, представленные контролю изделия отвергаются.

Приведенное приемочное правило определяется заданием параметров n и k она называется статистическим планом. Выбор плана контроля, т.е. определение параметров (n, k) может быть осуществлено различными способами в зависимости от соответствующих требований. Например, в зависимости от наличия или отсутствия априорной информации о неизвестном параметре θ распределения наблюдаемой совокупности существует два подхода к решению задачи о выборе оптимального плана, а именно минимаксный и байесовский. В минимаксном подходе параметры (n, k) выбираются из условия минимальности максимальной потери от принятых или отверженных совокупностей изделий.

В данной работе рассматривается выбор параметров минимаксного

плана последовательного контроля при более общих предположениях относительно вида средней функции потерь, когда количественный признак X имеет функцией распределения $F(x, \theta)$, При этом будем считать что $M(X) = \theta$, $D(X) = \sigma^2(\theta)$.

Анализ литературы. В работах [2, 3] изучено нахождение параметров последовательного контроля, когда средняя функция потерь является линейной относительно доли дефектных объектов и контролируемый признак X имеет гауссовское распределение,

В работах [5, 6] изучены асимптотические свойства однократного и двукратного минимаксного плана по многомерному количественному признаку соответственно.

В работе [7] при довольно общих предположениях относительно функции потерь и выборочной стоимости исследованы асимптотические свойства двукратного плана по многомерному количественному признаку.

Необходимо отметить, что первоначальные исследования задачи выбора планов СПК по качественным и количественным признакам изучены в работах [8 – 10]. При этом в [8] изучается контроль по качественному признаку, когда признак X распределен по биномиальному закону. В (9) исследован случай плана СПК по количественному признаку X имеющему гауссовское распределения. В работе [10] исследован байесовский однократный выборочный план для дискретного априорного распределения. Дальнейшие исследованные по выборам плана контроля продолжены в работах [11] и [12], которые рассматривают случай, когда распределение признака принадлежит достаточно широкому классу непрерывных распределений.

Цель статьи – найти оптимальные параметры последовательного СПК, минимизирующего максимальную потерю.

Пусть на контроль представлена совокупность объема N изделий, которые характеризуются качественным или количественным признаком X . Будем считать, что X представляет собой случайную величину с функцией распределения $F(x, \theta)$, $(-\infty < x < \infty)$, зависящей от неизвестного параметра θ , с

$$M(x) = \theta, \quad D(x) = \sigma^2(\theta).$$

Положим

$$g(\theta) = \int_{-\infty}^{\infty} k(x, \theta) dF(x, \theta), \quad (1)$$

где $k(x, \theta)$ – функция такая, что интеграл (1) существует.

Если $k(x, \theta) = x$, то $g(\theta)$ представляет собой долю дефектных изделий в контроле по качественному признаку. В случае, когда дефектность определяется некоторым количественным признаком X , положив

$$k(x, \theta) = \begin{cases} 0, & \text{при } x \leq T, \\ 1, & \text{при } x \geq T, \end{cases}$$

получим

$$g(\theta) = \int_{-T}^{\infty} dF(x, \theta) = 1 - F(T, \theta).$$

Здесь T – заданное число (допустимый предел рассматриваемого признака). В этом случае $g(\theta)$ означает долю дефектных изделий в контроле по количественному признаку. Пусть $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ – оценка максимального правдоподобия параметра θ (существование этой оценки предполагается).

Вышеприведенные рассуждения показывают, что процесс проведения статистического приемочного контроля (СПК) может быть основан на изучении статистики $g(\theta_n)$, и в такой постановке эти задачи приобретают наибольшую общность.

Выборочный план последовательного контроля состоит в следующем: из партии берут по одному изделию и измеряют значение контролируемого признака. Если $g(\theta_n) \leq -h + nk$, то всю партию принимают, а если $g(\theta_n) \leq h + nk$, то всю партию отвергают, и наконец, если $-h + nk \leq g(\theta_n) \leq h + nk$, то процесс контроля продолжится, берут еще одно $(n+1)$ -ое изделие $(n = 1, 2, \dots)$.

Последовательный процесс контроля определяется заданием числовых параметров h и k .

В работах [2, 3] исследован минимаксный план в случае, когда

$$g(\theta_n) = \theta_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i.$$

Как замечено, во многих работах по СПК [2 – 4], существует значение параметра $\theta = \theta_0$, при котором ущербы от принятия и отвержения совокупности совпадают. В нашем случае таким значением безразличия являются $g(\theta_n)$. По аналогии с работами [5, 6] введем следующую функцию потери

$$\Pi(g(\theta), g(\theta_n)) = \begin{cases} \Pi_1(g(\theta_0) - g(\theta))^{v_1}, & \text{если } g(\theta) \leq g(\theta_0), \\ \Pi_2(g(\theta_0) - g(\theta))^{v_2}, & \text{если } g(\theta) > g(\theta_0), \end{cases} \quad (2)$$

где v_1, v_2, Π_1, Π_2 – положительные параметры (стоимостные, постоянные). Параметры Π_1 и Π_2 зависят от объёма совокупности N и $\Pi_1 = \alpha \cdot \Pi_2$ при некотором $\alpha > 0$.

Кроме того, предположим, что стоимость выборочного наблюдения как функция от M при больших M имеет вид:

$$r_s(M) = cM^s(1 + O(1)),$$

где $c > 0$ не зависит от M , $s \geq 1$.

Средняя потеря

$$R_{cp}(h, k, g(\theta_n)) = \begin{cases} \Pi(g(\theta), g(\theta_0)) \cdot P(g(\theta_n)) > h + nk, \\ \text{если } g(\theta) \leq g(\theta_0), \\ \Pi(g(\theta), g(\theta_0)) \cdot P(g(\theta_n)) \leq -h + nk, \\ \text{если } g(\theta) > g(\theta_0). \end{cases} \quad (3)$$

Тогда остаточная функция $R(h, k, g(\theta)) = r_s(M) + R_{cp}(h, k, g(\theta))$.

В минимаксном подходе план контроля считается оптимальным, если его параметры (h, k) удовлетворяют равенству

$$\sup_{\theta} R(h, k, g(\theta)) = \inf_{h, k} \sup_{\theta} R(h, k, g(\theta)).$$

Нетрудно показать, что для вероятности принятия партии и математического ожидания среднего числа контролируемых изделий, имеют место соотношения:

$$P(g(\theta) \leq -h + kn) = \frac{e^{2w} - 1}{e^{2w} - e^{-2w}} = \frac{1}{2}(1 - thw), \quad (4)$$

$$M = \frac{h^2}{\sigma^2(\theta)} \cdot \frac{thw}{w}, \quad w = \frac{k - \theta}{\sigma^2(\theta)} \cdot h. \quad (5)$$

В работе установлены асимптотические решения для параметров оптимального плана, в частности, получен следующий результат:

Теорема. Если $\Pi_1 = \Pi_2 = O(N)$ и $v_1 = v_2 = v$ то для параметров оптимального плана имеют место соотношения:

$$h_0 = \left(\frac{|w_0|^2 (1 - thw_0)}{2 \cdot thw_0} \right) \cdot g(w_0)^{\frac{1}{2s+\vartheta}} \cdot N^{-\frac{1}{2s+\vartheta}} + O \left(N^{-\frac{1}{2s+\vartheta}} \right),$$

$$k_0 = \theta_0 + \frac{w(\theta_0)}{h_0} \cdot \sigma^2(\theta_0) + O \left(N^{-\frac{2}{2s+\vartheta}} \right).$$

Оптимальные значения для среднего числа контролируемых изделий и остаточной функции потерь будут равны соответственно:

$$M_0 = \left(\frac{thw_0}{w_0} \cdot \frac{1}{\sigma_0^2} \right) h_0^{\frac{2}{2s+\vartheta}},$$

$$R_{on} = \min_{h,k} \max_w R(h,k,g(w)) = \left(1 + \frac{2s}{v} \right) M_0 C.$$

Выводы: В работе исследованы оптимальные параметры плана СПК по количественному признаку в схеме проведения испытаний по последовательному анализу. При этом допускается, что функции потерь имеют (в отличие от упомянутых работ) более общий вид.

Список литературы:

1. Вальд А. Последовательный анализ / А. Вальд. – М.: Физматгиз, 1960. – 328 с.
2. Moziguti S. Notes on Sampling Inspections Plans / S. Moziguti // Reports of Statistical Appl. Research. – USE. – 1955. – Vol. 3. – № 4.
3. Сирожидинов С.Х. Об оптимальных планах статистического контроля по количественному признаку / С.Х. Сирожидинов, А. Ражабов // Известия АН УзССР, серия физ.-мат. наук. – 1973. – № 4.
4. Ваҳобов В. Об асимптотике оптимальных параметров статистического контроля / В. Ваҳобов, Л. Ражабова // Материалы V-международной Ферганской конференции. – г. Фергана, 10-12 мая – 2005.
5. Абдалимов Б. Об асимптотике параметров минимаксного плана приёмочного контроля / Б. Абдалимов, В. Вахобов // Объединенный научный журнал. – 2008. – № 11 (217). – С. 45-53.
6. Абдалимов Б. Об оптимальных планах контроля по многомерному количественному признаку / Б. Абдалимов, В. Вахобов // Объединенный научный журнал. – 2009. – № 12 (230). – С. 56-59.
7. Абдалимов Б. О планах контроля по многомерному количественному признаку / Б. Абдалимов, В. Вахобов Л. Ражабова // Материалы республиканской научно-практической конференции. Статистика и ее применение. – 2012. – С. 45-49.
8. Van der Waerden B.L. Sampling inspection as a minimum loss problem / B.L. Van der Waerden // Ann. Math. Statist. – 1960. – Vol. 31. – № 2.
9. Strange K. Die Berechnung wirtschaftlicher plane für messende Prüfung / K. Strange // Metrika. – 1964. – Vol. 8. – № 1. – P. 48-82.

10. Hald A. Bayesian single sampling plans for discrete prior distributions / A. Hald // *Mat. Fys. Skr. Dan.Vid. Selsk.* – 1965. – Vol. 3. – № 2. – P. 1-88.
11. Гродзенский С.Я. Управление качеством / С.Я. Гродзенский. – Учебник. – М.: Проспект, 2017. – 226 с.
12. Юдин С.В. Методика расчета информационных планов статистического приемного контроля на основе байесовского подхода / С.В. Юдин, В.Е. Протасьев, Р.Ю. Подкопаев, А.С. Юдин // *Современные наукоемкие технологии.* – 2018. – № 11. – С. 90-94.

References:

1. Wald, A. (1960), *Sequential analysis*. Fizmatgiz, Moscow, pp. 328.
2. Moziguti, S. (1955), "Notes on Sampling Inspections Plans", *Reports of Statistical Appl. Research*, USE, vol. 3, No. 4.
3. Sirozhidinov, S.H., and Rajabov, A. (1973), "On optimal plans for statistical control on a quantitative basis", *Proceedings of the Academy of Sciences of the Uzbek SSR, series physical-mat. of science*, No. 4.
4. Vaxobov, V., and Rajabova, L. (2005), "On the asymptotics of the optimal parameters of statistical control", *Materials of the V-International Fergana Conference*. G. Fergana, 10-12 May.
5. Abdalimov, B., and Vaxobov, V. (2008), "On the asymptotics of the parameters of the minimax acceptance control plan ", *United Scientific Journal*, No. 11 (217), pp. 45-53.
6. Abdalimov, B., and Vaxobov, V. (2009), "On optimal control plans for a multidimensional quantitative trait", *United Scientific Journal*, No. 12 (230), pp. 56-59.
7. Abdalimov, B., Vaxobov, V., and Rajabova, L. (2012), "On control plans for a multidimensional quantitative trait", *Materials of the Republican Scientific and Practical Conference. Statistics and its application*, pp. 45-49.
8. Van der Waerden B.L. (1960), "Sampling inspection as a minimum loss problem". *Ann.Math.Statis.*, Vol. 31, No. 2.
9. Strange, K. (1964), "Die Berechnung wirtschaftlicher plane für messende Prüfung" *Metrika*, Vol. 8, No. 1, pp. 48-82.
10. Hald, A. (1965), "Bayesian single sampling plans for discrete prior distributions" *Mat. Fys. Skr. Dan.Vid. Selsk*, Vol.3, No. 2, pp. 1-88.
11. Grodzensky, S.Ya. (2017), *Quality control*, Textbook, Avenue, Moscow, 226 p.
12. Yudin, S.V., Protasyev, V.E., Podkopaev, R.Yu., and Yudin A.S. (2018), "The method of calculating information plans for statistical reception control based on the Bayesian approach", *Modern high technologies*, No. 11, pp. 90-94.

Статью представил доктор техн. наук, проф. Б.А. Худаяров, зав. кафедры "Высшая математика", Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства, Ташкент.

Поступила (received) 22.10.2018

Vahobov Valijon Vahobovich, PhD
Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers
Higher mathematics,
Str. Kari Niyaziy, 39, Tashkent, Uzbekistan, 100000,
Tel: +99890 975-22-93, e-mail:
ORCID ID: 0000-0002-4542-1230

УДК 519.6

Про вибір параметрів мінімаксного плану послідовного приймального контролю / Вахобов В.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2018. – № 42 (1318). – С. 131 – 137.

Оцінка якості готової промислової чи сільськогосподарської продукції, наприклад, довжина або діаметр виготовленої деталі, схожість зерна, довжина волокна бавовни і інші чинники дослідження проводяться методами статистичного приймального контролю (СБК). СПК дає можливість, з одного боку, здійснити поточний контроль виробничого процесу, своєчасно запобігати випуск неякісних виробів, з іншого боку, дозволяє з найменшими витратами проводити приймання готової продукції. Останнє досягається за допомогою вибору планів СПК. У даній роботі розглядається питання про вибір параметрів послідовного контролю, що мінімізує максимальні втрати. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: оцінка якості; статистичний приймальний контроль; поточний контроль; виробничий процес.

УДК 519.6

О выборе параметров минимаксного плана последовательного приёмочного контроля / Вахобов В.В. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2018. – № 42 (1318). – С. 131 – 137.

Оценка качества готовой промышленной или сельскохозяйственной продукции, например, длина или диаметр изготовленной детали, всхожесть зерна, длина волокна хлопка и другие факторы исследования проводятся методами статистического приемочного контроля (СПК). СПК дает возможность, с одной стороны, осуществить текущий контроль производственного процесса, своевременно предотвратить выпуск некачественных изделий, с другой стороны, позволяет с наименьшими затратами проводить приемку выпускаемой готовой продукции. Последнее достигается с помощью выбора планов СПК. В данной работе рассматривается вопрос о выборе параметров последовательного контроля, минимизирующего максимальные потери. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: оценка качества; статистический приемочный контроль; текущий контроль; производственный процесс.

UDC 519.6

On the choice of the parameters of the minimax plan of the sequential acceptance control / Vakhobov V.V. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2018. – № 42 (1318). – P. 131 – 137.

The quality assessment of finished industrial or agricultural products, for example, the length or diameter of the manufactured part, grain germination, cotton fiber length, and other factors, are carried out by statistical acceptance control (SEC) methods. SEC provides an opportunity, on the one hand, to carry out current control of the production process, timely preventing the release of low-quality products, on the other hand, allows for the lowest cost to carry out the acceptance of manufactured finished products. The latter is achieved by selecting the SEC plans. In this paper, the question of choosing the parameters of sequential control minimizing the maximum loss is considered. Refs.: 10 titles..

Keywords: quality assessment; statistical acceptance control; current control; production process.

УДК 004.416.6

DOI: 10.20998/2411-0558.2018.42.07

М. В. ДЕРКАЧ, ст. викл., СНУ ім. В. Даля, Сєверодонецьк,
І. С. СКАРГА-БАНДУРОВА, д-р техн. наук, доц., зав.каф., СНУ
ім. В. Даля, Сєверодонецьк,
В. О. ХИШЕВ, магістр, СНУ ім. В. Даля, Сєверодонецьк

НАЛАШТУВАННЯ МОДЕЛІ ПРОГНОЗУВАННЯ ЧАСУ ПРИБУТТЯ ГРОМАДСЬКОГО ТРАНСПОРТУ НА ЗУПИНКИ МІСТА

Стаття присвячена питанню створення IoT-системи для прогнозування та інформування пасажирів про час прибуття транспортних засобів на зупинки міста. Розробка являє собою інтеграцію обчислювальних і комунікаційних систем, спрямованих на полегшення взаємодії між фізичними об'єктами через мережу Інтернет. Наведена базова модель для прогнозування часу прибуття транспортного засобу вздовж маршруту та варіант її налаштування для покращення прогнозу. Наведено результати порівняння практичного застосування моделей в режимі реального часу для тролейбусного парку міста Сєверодонецьк. Визначено загальне відхилення розрахунків прогнозу від дійсного часу прибуття тролейбуса на контрольні точки (зупинки). Іл.: 2. Табл.: 2. Бібліогр.: 14 назв.

Ключові слова: прогнозування; час прибуття; транспортний засіб; модель; контрольна точка.

Постановка проблеми. Сучасна тенденція розвитку міста призводить до збільшення кількості транспортних засобів. У зв'язку з чим зростають вимоги до безпеки і зручності пасажирів, якості послуг і комфорту пересування. Для розв'язання таких проблем останні десятиліття застосовуються інтелектуальні транспортні системи [2], що включають комп'ютерні технології, технології зв'язку, системи позиціонування та автоматизації, різноманітні засоби управління транспортними системами, архітектура яких створює основу ефективного впровадження широкого спектра послуг для користувача. Гнучкість вибору між різними функціями дає тим, хто їх впроваджує, можливість вибору певної технології, що задовольняє місцевим, регіональним або національним потребам. У сфері громадського транспорту використовуються новітні технології, такі як системи автоматичного збору інформації про кількість пасажирів на борту та зупинках, визначення місцеперебування транспортного засобу (ТЗ), ідентифікація автомобіля, тощо [3]. Розробляються апаратно-програмні комплекси, призначені для інформування про час прибуття громадського транспорту на зупинки міста. Такі системи ефективно працюють у багатьох країнах світу таких, як Канада [4], Китай [5, 6], Індія, Швеція, Чехія, Румунія [7],

Пакистан та інші. Більшість з них, для прогнозу часу прибуття транспортного засобу використовують моделі, засновані на середніх показниках руху; регресивні моделі; моделі машинного навчання на основі штучних нейронних мереж і методу опорних векторів; моделі на основі фільтра Калмана та динамічні моделі.

В Україні впровадження таких систем все ще знаходиться на стадії розвитку. Реалізовано тестові проекти в Києві, Одесі, Львові, Дніпрі та Харкові, що являють собою спеціалізовані системи автоматизованого управління і контролю за роботою транспорту, диспетчерського управління і надання городянам інформації про рух транспорту. Однак, в містах середнього та малого розміру зі змішаним трафіком, або декількома транзитними маршрутами, що проходять уздовж одного сегменту дороги, такі системи відсутні.

Крім того, попри те, що останні технології значно покращили рівень надійності транзиту, все ще існує значний розрив між запланованим часом та фактичним часом прибуття громадського транспорту. Час прибуття ТЗ на певну контрольну точку невизначений і важко передбачуваний, оскільки інші ТЗ впливають на загальну динаміку транспортної системи [8]. Тому у порівнянні з графіком, фактичний час прибуття ТЗ при зупинках може значно коливатися. Така ситуація викликає потребу в пошуку оптимальної моделі прогнозування та інформування пасажирів про час прибуття транспортних засобів на зупинки міста з використанням фактичних даних про рух з акцентом на простоту рішення та мінімальні витрати.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для вирішення задачі прогнозування в роботі [9] запропонований алгоритм, що поєднує дані про місцеперебування в режимі реального часу з приймачів системи глобального позиціонування з середньою швидкістю руху на окремих сегментах маршруту з урахуванням історичної швидкості руху. Схема прогнозування прибуття транспортного засобу у роботі [10] базується на розташуванні в реальному часі ближнього автобуса та відповідному залишковому запланованому часу пересування. Запропонований у [11] підхід поєднує аналіз кластеризації та фільтр Калмана з загальною моделлю сегментів маршрутів, щоб отримати більш точні прогнози часу прибуття. Метод [12] являє собою гібридну схему, яка поєднує в собі нейронну мережу, яка виводить правила рішення з історичних даних з фільтром Калмана, який запобігає розрахункам прогнозування за допомогою поточних вимірювань GPS. Модель для прогнозування часу прибуття [13] використовує метод К-найближчих сусідів, регресію ядра та набір функцій. Разом з тим, питання покращення результатів прогнозування все ще залишається відкритим. Так, в [14] авторами було

запропоновано базову модель для прогнозування часу прибуття транспортного засобу на основі середніх показників, однак вимога отримання кращих прогнозів ставить задачу перевірити роботу моделі на даних, отриманих в режимі реального часу та здійснити її налаштування шляхом урахування фактичного часу перебування транспортного засобу на певних контрольних точках.

Метою статті є висвітлення результатів практичного застосування моделей прогнозування, порівняння базової та перенастроюваної моделей та оцінка загального відхилення розрахунків прогнозу від дійсного часу прибуття тролейбуса на контрольні точки.

Основний зміст роботи. Як тестовий майданчик, обрано тролейбусні маршрути міста Сєвєродонецьк. На даний момент весь тролейбусний парк міста оснащений GPS-датчиками. Тролейбусні перевезення в місті здійснюються за чотирма маршрутами загальною протяжністю 91,5 км, за якими в робочі дні курсують 27 транспортних засобів. За день виконується близько 300 оборотних рейсів. Протяжність контактної мережі становить 54,5 км. Для реалізації системи прогнозування, виконано наступні кроки:

1. Забезпечено віддалений доступ до глобальної системи позиціонування для отримання просторових та тимчасових координат транспортного засобу.

2. Зібрано тестовий набір даних від датчиків про місцеперебування та швидкість руху усіх тролейбусів міста, який збережено в базі даних.

3. Обчислено прогноз часу прибуття транспортних засобів, закріплених за маршрутами міста для зазначених тролейбусних зупинок.

4. Для відображення на інформаційному табло часу прибуття тролейбуса на зупинку міста береться прогноз найближчого транспортного засобу.

Для розрахунку прогнозу часу прибуття використовується Wialon, в якості системи спостереження GPS, що дозволяє контролювати такі параметри, як швидкість руху, напругу, температуру і багато іншого. Вхідними змінними є швидкість і місце розташування ТЗ. Ці змінні використовуються:

1) для оцінки відстані, що залишилося пройти транспортному засобу до прибуття на необхідну зупинку по формулам гаверсинусів:

$$d = \Delta\sigma \cdot R, \quad (1)$$

де d – відстань між двома точками; R – радіус Землі; $\Delta\sigma$ – кутова різниця,

$$\Delta\sigma = 2 \arcsin \left\{ \sqrt{\sin^2 \left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} \right) + \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \sin^2 \left(\frac{\Delta\lambda}{2} \right)} \right\}, \quad (2)$$

де $\varphi_1, \lambda_1; \varphi_2, \lambda_2$ – широта та довгота двох точок відповідно; $\Delta\lambda$ – різниця координат за довжиною; $\Delta\sigma$ – кутова різниця;

2) для отримання показника середньої швидкості руху транспортного засобу:

$$s = \frac{\sum_{i=1}^n s_i}{n}. \quad (3)$$

Вихідною змінною є час прибуття на контрольну точку якщо пересування починається в нульовий момент часу.

$$T_{pr} = \frac{d}{s}, \quad (4)$$

де T_{pr} – прогнозний час прибуття транспортного засобу; d – відстань між двома точками; s – усереднена швидкість руху транспорту.

Фактично, це представлення базової моделі (рис. 1, а) отримання прогнозу часу прибуття ТЗ, згідно з якою можливо здійснювати розрахунок за формулами (1) – (4), як для окремих сегментів (рис. 2, а), так і вздовж усього маршруту (рис. 2, б).

Для базової моделі на реальних даних було проведено розрахунок прогнозного часу прибуття ТЗ для існуючого маршруту міста, отримані результати показали, що відхилення від фактичного часу перебування ТЗ на зупинці складає понад 7%. Що є непоганим результатом, але точність прогнозу, може бути покращена. Тому запропоновано провести настроювання моделі (рис. 1, б), а саме, отримувати прогноз тільки на ділянці дороги, яку транспортний засіб подолає, здійснюючи рух після перебування на контрольній точці (рис. 2, б).

У такому випадку, час прибуття T_{pr} складається з реального часу відправлення T_{rt} транспортного засобу з зупинки та отриманого по базовій моделі прогнозного часу T_{pr} :

$$T_{pr} = T_{rt} + T_{pr}. \quad (5)$$

Для отримання порівняльних результатів на тих самих даних було проведено розрахунок часу прибуття тролейбусів на зупинки міста з використанням перенастроюваної моделі (рис. 1 б). Для використання такої моделі обчислення середньої швидкості проводилось для кожного сегменту окремо, без урахування середньої швидкості попередніх сегментів.

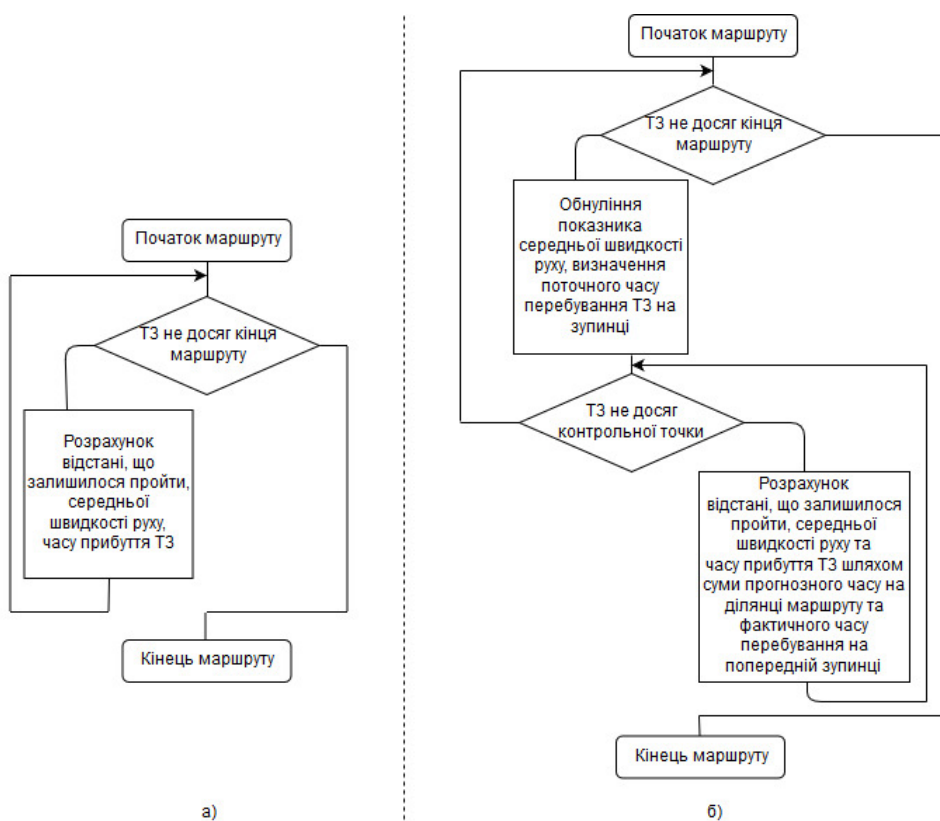


Рис. 1. Моделі прогнозу часу прибуття ТЗ: а) базова, б) після налаштування

Тому у табл. 1 показані основні характеристики кожного сегменту наявного маршруту міста. Маршрут складається з початкової, двох контрольних та кінцевої точки, тобто з трьох дорожніх сегментів.

Таблиця 1

Характеристики сегментів маршруту

Номер сегменту	Довжина, м	Швидкість руху тролейбуса, м/с
1	4294	5,57
2	1987	4,06
3	1228	3,77

З отриманих результатів (табл. 2) можливо зробити висновок, що дійсно, налаштування моделі прогнозування часу прибуття

транспортного засобу, дає менше відхилення від фактичного часу прибуття транспортного засобу, а саме цей показник складає 4,47%.

Такий результат можна пояснити тим, що прогноз отримується завдяки складанню фактичного часу відправлення з попередньої зупинки з часом, отриманим по базовій моделі, на шляху, що залишилось подолати транспортному засобу, тим самим не враховуючи швидкість руху ТЗ на попередньому сегменті (рис. 2).

Таблиця 2

Результати порівняння базової та моделі після настроювання

Назва моделі для прогнозу часу прибуття	Базова модель		Модель після настроювання		Час прибуття ТЗ через, с
	Прогноз, с	Відхилення, %	Прогноз, с	Відхилення, %	
Сегмент 1	771	5,98	771	5,98	820
Сегмент 2	489	5,78	533	2,7	519
Сегмент 3	326	9,44	377	4,72	360
Загальне відхилення %	7,07		4,47		

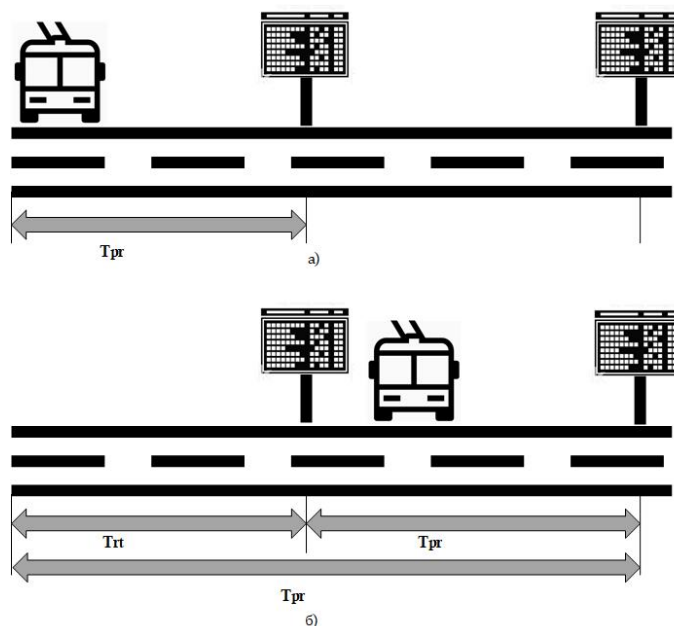


Рис. 2. Схема отримання прогнозу часу прибуття:

а) для окремих сегментів, б) вздовж усього маршруту

T_m – час перебування транспортного засобу на зупинках; T_{pr} – прогнозний час руху транспортного засобу

Висновок. В роботі представлено модель, на основі середніх показників, проведено настроювання базової моделі, перевірено роботу двох моделей на даних в режимі реального часу, отримано результат, де відхилення моделі після настроювання на 2,6% менше у порівнянні з відхиленням базової моделі від фактичного часу перебування ТЗ на зупинці міста. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації маршрутів і реструктуризації графіку руху. Наступним кроком буде оцінка роботи моделі для довгих маршрутів. Іншим завданням на майбутнє є реалізація системи обліку та урахування кількості пасажирів в середині транспортних засобів та на зупинках міста.

Список літератури:

1. *Keramidas G.* Components and Services for IoT Platforms: Paving the Way for IoT Standards / *G. Keramidas, N. Voros, M. Hübner* (Eds) // Springer International Publishing Switzerland. – 2017. – 383 p.
2. *Biswas A.* Microsegmenting: An approach for precise distance calculation for GPS based ITS applications / *A. Biswas, G. Pilla, B. Tamma* // IEEE Recent Advances in Intelligent Computational Systems (RAICS). – 2013. – P. 327-332.
3. *Hua X.* Bus arrival time prediction using mixed multi-route arrival time data at previous stop / *X. Hua, W. Wang, Y. Wang, M. Ren* // Transport. – 2018. – Vol. 33 (2). – P. 543-554.
4. *Chung E.-H.* Expected time of arrival model for school bus transit using real-time global positioning system-based automatic vehicle location data / *E.-H. Chung, A. Shalaby* // Journal of Intelligent Transportation Systems. – 2007. – Vol. 11 (4). – P. 157-167.
5. *Bai C.* Dynamic Bus Travel Time Prediction Models on Road with Multiple Bus Routes [Електронний ресурс] / *C. Bai, Z.-R. Peng, Q.-C. Lu, J. Sun* // Computational Intelligence and Neuroscience. – 2015. – Режим доступу: [www. URL: <http://www.hindawi.com/journals/cin/2015/432389/>](http://www.hindawi.com/journals/cin/2015/432389/) – 21.09.2018 p.
6. *Hua X.* Bus arrival time prediction using mixed multi-route arrival time data at previous stop / *X. Hua, W. Wang, Y. Wang, M. Ren* // Transport. – 2018. – Vol. 33 (2). – P. 543-554.
7. *Covaciu D.* Data acquisition system based on GPS technology, for vehicle dynamics analysis / *D. Covaciu, I. Preda, G. Ciolan, O.-V. Câmpian* // Conference: CONAT 2010 – International Automotive Congress. – 2010. – Vol. 4006. – P. 31-36.
8. *Horning J.* Estimating Running Time and Demand for a Bus Rapid Transit Corridor / *J. Horning, A.M. El-Geneidy, J. Hourdos* // Report No CTS 09-24. – 2009. – 69 p.
9. *Sun D.* Predicting Bus Arrival Time on the Basis of Global Positioning System Data / *D. Sun, H. Luo, L. Fu, W. Liu, X. Liao, M. Zhao* // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. – 2007. – № 2034. – P. 62-72.
10. *Cats O.* Real-Time Bus Arrival Information System – An Empirical Evaluation / *O. Cats, G. Loutos* // Journal of Intelligent Transportation Systems. – 2016. – №. 20 (2). – P. 138-151.
11. *Sun F.* Real-time and Predictive Analytics for Smart Public Transportation Decision Support System / *F. Sun, Y. Pan, J. White, A. Dubey* // 2nd IEEE International Conference on Smart Computing (SMARTCOMP 2016). – 2016.
12. *Zaki M.* Online Bus Arrival Time Prediction Using Hybrid Neural Network and Kalman filter Techniques / *M. Zaki, I. Ashour, M. Zorkany, B. Hesham* // International Journal of Modern Engineering Research (IJMER). – 2013. – Vol. 3(4). – P. 2035-2041.
13. *Baker C.B.* Predicting Bus Arrivals Using One Bus Away Real-Time Data / *C.B. Baker, A.C. Nied* // Journal of Public Transportation. – 2014. – Vol. 18(1).

14. Скарґа-Бандурова І.С. Дослідження ефективності використання фільтру Калмана для прогнозування часу прибуття міського транспорту / І.С. Скарґа-Бандурова, М.В. Деркач // Вісник ХНТУ. – 2017. – № 4 (63). – С. 193-199.

References:

1. Keramidas, G., Voros, N., and Hübner, M. (Eds) (2017), *Components and Services for IoT Platforms: Paving the Way for IoT Standards*, Springer International Publishing, Switzerland, 383 p.
2. Biswas, A., Pilla, G., and Tamma, B. (2013), "Microsegmenting: An approach for precise distance calculation for GPS based ITS applications", *IEEE Recent Advances in Intelligent Computational Systems (RAICS)*, pp. 327-332.
3. Hua, X., Wang, W., Wang, Y., and Ren, M. (2018), "Bus Arrival Time Prediction Using Mixed Multi-Route Arrival Time Data at Previous Stop", *Transport*, Vol. 33 (2), pp. 543–554.
4. Chung, E.-H., and Shalaby, A. (2007), "Expected Time of Arrival Model for School Bus Transit Using Real-Time Global Positioning System-Based Automatic Vehicle Location Data", *Journal of Intelligent Transportation Systems*, Vol. 11 (4), pp. 157–167.
5. Bai, C., Peng, Z.-R., Lu, Q.-C., and Sun, J. (2015), "Dynamic Bus Travel Time Prediction Models on Road with Multiple Bus Routes", *Computational Intelligence and Neuroscience*, available at: <https://www.hindawi.com/journals/cin/2015/432389/> (Accessed 21 Sept 2018).
6. Hua, X., Wang, W., Wang, Y., and Ren, M. (2018), "Bus Arrival Time Prediction Using Mixed Multi-Route Arrival Time Data at Previous Stop", *Transport*, Vol. 33 (2), pp. 543–554.
7. Covaciu, D., Preda, I., Ciolan, G., and Câmpian, O.-V. (2010), "Data Acquisition System Based on GPS Technology, for Vehicle Dynamics Analysis", *Conference: CONAT 2010 - International Automotive Congress*, Vol. 4006, pp. 31-36.
8. Horning, J., El-Genaidy, A.M., and Hourdos, J. (2009), "Estimating Running Time and Demand for a Bus Rapid Transit Corridor", *Report No CTS 09-24*, 69 p.
9. Sun, D., Luo H., Fu, L., Liu, W., Liao, X., and Zhao, M. (2007), "Predicting Bus Arrival Time on the Basis of Global Positioning System Data", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2034, pp. 62–72.
10. Cats, O., and Loutos, G. (2016), "Real-Time Bus Arrival Information System – An Empirical Evaluation", *Journal of Intelligent Transportation Systems*, No. 20 (2), pp. 138-151.
11. Sun, F., Pan Y., White, J., and Dubey, A. (2016), "Real-time and Predictive Analytics for Smart Public Transportation Decision Support System", *2nd IEEE International Conference on Smart Computing (SMARTCOMP 2016)*.
12. Zaki, M., Ashour I., Zorkany M., and Hesham B. (2013), "Online Bus Arrival Time Prediction Using Hybrid Neural Network and Kalman filter Techniques", *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, Vol. 3(4), pp. 2035-2041.
13. Baker, C.B., and Nied, A.C. (2014), "Predicting Bus Arrivals Using One Bus Away Real-Time Data", *Journal of Public Transportation*, Vol. 18(1).
14. Skarga-Bandurova, I.S., and Derkach, M.V. (2017), "Investigation of the efficiency of using Kalman filter to predict the arrival time of local transport", *Herald KHNTU*, No. 4(63), pp. 193-199.

Статтю представив д.т.н., проф. Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" О.А. Серков

Надійшла (received) 11.10.2018

Derkach Maryna, senior lecturer

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University

59-a Central avenue, Severodonetsk, Luhansk region, Ukraine, 93400

tel./phone: (064) 522-89-97, e-mail: gln459@gmail.com

ORCID ID: 0000-0001-8977-2776

Skarga-Bandurova Inna, Dr. Sci. Tech., Assoc. Professor, Professor

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University

59-a Central avenue, Severodonetsk, Luhansk region, Ukraine, 93400

tel./phone: (064) 522-89-97, e-mail: skarga_bandurova@ukr.net

ORCID ID: 0000-0003-3458-8730

Hyshev Vlad, master

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University

59-a Central avenue, Severodonetsk, Luhansk region, Ukraine, 93400

tel./phone: (064) 522-89-97, e-mail: green.wrapper@gmail.com

ORCID ID: 0000-0003-4974-4687

УДК 004.416.6

Налаштування моделі прогнозування часу прибуття громадського транспорту на зупинки міста / Деркач М.В., Скарга-Бандурова І.С., Хишев В.О. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2018. – № 42 (1318). – С. 138 – 147.

Стаття присвячена питанню створення IoT-системи для прогнозування та інформування пасажирів про час прибуття транспортних засобів на зупинки міста. Розробка являє собою інтеграцію обчислювальних і комунікаційних систем, спрямованих на полегшення взаємодії між фізичними об'єктами через мережу Інтернет. Наведена базова модель для прогнозування часу прибуття транспортного засобу вздовж маршруту та варіант її настроювання для покращення прогнозу. Наведено результати порівняння практичного застосування моделей в режимі реального часу для тролейбусного парку міста Северодонецьк. Визначено загальне відхилення розрахунків прогнозу від дійсного часу прибуття тролейбуса на контрольні точки (зупинки). Іл.: 2. Табл.: 2. Бібліогр.: 14 назв.

Ключові слова: прогнозування; час прибуття; транспортний засіб; модель; контрольна точка.

УДК 004.416.6

Настройка модели прогнозирования времени прибытия общественного транспорта на остановки города / Деркач М.В., Скарга-Бандурова И.С., Хышев В.А. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2018. – № 42 (1318). – С. 138 – 147.

Статья посвящена вопросу создания IoT-системы для прогнозирования и информирования пассажиров о времени прибытия транспортных средств на остановки города. Приведена базовая модель для прогнозирования времени прибытия транспортного средства вдоль маршрута и вариант ее настройки для улучшения прогноза. Представлены результаты сравнения практического применения моделей в режиме реального времени для троллейбусного парка города Северодонецк. Определено общее отклонение расчетов прогноза от действительного времени прибытия троллейбуса на контрольные точки (остановки). Ил.: 2. Табл.: 2. Библиогр.: 14 назв.

Ключевые слова: прогнозирование; время прибытия; транспортное средство; модель; контрольная точка.

UDC 004.416.6

Model Adjustment to Improving Arrival Time Prediction of Public Transport on City Bus Stops / Derkach M.V., Skarga-Bandurova I.S., Hyshev V.O. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2018. – №.42 (1318). – P. 138 – 147.

The paper is devoted to the problems of the developing IoT-system for forecasting arrival time for public transport to the city bus stops. The development is an integration of computing and communication systems aimed at facilitating the interaction between physical objects through the Internet. The basic model and its modification are presented. The results of comparison these models after their of practical implementation for the trolleybus park in Severodonetsk city are presented. The general deviation of the forecast calculations from the actual time of arrival of the trolleybus to checkpoints (stops) is determined. Figs.: 2. Tabl.: 2. Refs.: 14 titles.

Keywords: prediction; arrival time; vehicle; model; checkpoint.

УДК 84.5.015.2

DOI: 10.20998/2411-0558.2018.42.09

В. Д. ДМИТРИЕНКО, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ",

С. Ю. ЛЕОНОВ, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ",

В. А. БРЕЧКО, ст. преп., НТУ "ХПИ"

ОСНОВНЫЕ СТРУКТУРЫ ДАННЫХ НА БАЗЕ АССОЦИАТИВНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Без основных структур данных: списков, магазинов, очередей, деревьев и т.д., невозможна разработка эффективных алгоритмов. Однако при моделировании ряда технологических процессов (например, при лезвийной обработке металлов) обычные структуры данных недостаточно соответствуют этим процессам и поэтому становятся неэффективными. В связи с этим предлагается новая структура данных на основе ассоциативных нейронных сетей, позволяющая более эффективно моделировать технологические процессы лезвийной обработки металлов. Ил.: 6. Библиогр.: 11 назв.

Ключевые слова: структура данных; технологический процесс; ассоциативные нейронные сети; лезвийная обработка металлов.

Постановка проблемы и анализ литературы. Одна из главных задач современных компьютеров – это хранение больших объемов информации в различных базах данных и быстрый поиск необходимой информации в этих базах. Компьютеры имеют адресную организацию памяти, а данные в типичных реляционных базах хранятся в виде таблиц, которые имеют три группы полей: наименований, данных и системные поля, обеспечивающие связь с главными и подчиненными таблицами.

Адресная организация памяти компьютера требует знания адреса, по которому находятся данные, и определенного времени для обращения процессора к ячейке памяти. При этом канал процессор-память имеет существенно меньшую производительность, чем процессор. Применение аппаратных средств ускорения доступа к данным пока не слишком помогает из-за больших объемов памяти. Перспективна аппаратная разработка ассоциативной памяти. Микросхемы этой памяти могут существенно повысить производительность обработки информации. Однако ассоциативная память (АП) большого объема в настоящее время является слишком дорогой. В связи с этим ускорение доступа к данным в настоящее время в основном обеспечивается с помощью программного обеспечения, с помощью которого тем или иным способом осуществляется ассоциативная обработка хранящихся данных. Примером такого программного средства может служить язык SQL для реляционных баз данных [1, 2]. Ассоциативная выборка с помощью команд языка SQL обеспечивается структурой его команд, в которых

указывается: непосредственно выполняемая команда, область выборки в базе данных, выдаваемые данные и условия их отбора из таблиц, а также условия связи между таблицами.

Еще один способ программного обеспечения для ассоциативной обработки данных – это программная реализация различных нейронных сетей.

Нейронные сети широко используются для организации ассоциативной памяти. Наиболее простой пример ассоциативной памяти на нейронных сетях – это гетероассоциативная память, состоящая из двух слоев нейронов: сенсорного и выходного с однонаправленными связями между ними. Если в сети число входных нейронов больше числа выходных, то сеть может использоваться в качестве гетероассоциативной памяти, если в сети число входных нейронов равно числу выходных, то сеть может использоваться как автоассоциативная память [3]. Недостаток такой памяти – невозможность осуществления двухстороннего восстановления ассоциаций из памяти.

Этого недостатка нет у известной двунаправленной ассоциативной памяти, разработанной на основе дискретных нейронных сетей АРТ-1, связанных между собой с помощью промежуточного слоя нейронов [4].

Недостатком этой сети является ее сложность, затрудняющая разработку нейронных сетей для запоминания более сложно организованных данных.

Более простой, но выполняющей те же функции, является нейронная сеть, получившая название двунаправленной ассоциативной памяти (ДАП), состоящая из двух сенсорных слоев элементов, нейроны которых связаны между собой парами взвешенных двунаправленных связей с соответствующими весовыми коэффициентами (рис. 1) [5, 6].

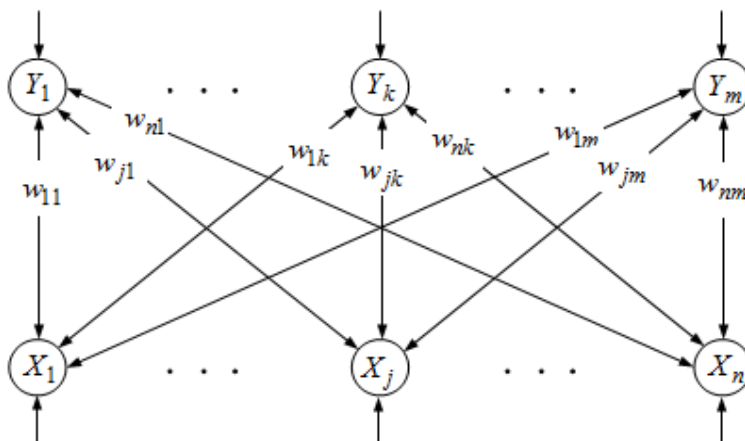


Рис. 1. Двунаправленная ассоциативная память

Изображения (или n -мерные либо m -мерные входные вектора) могут подаваться соответственно на входы X - или Y -элементов. При этом не предполагается подача изображений на оба слоя элементов одновременно. Если весовая матрица для сигналов, посылаемых из X -слоя элементов в Y -слой, есть

$$W = \begin{vmatrix} w_{11} & \dots & w_{1k} & \dots & w_{1m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{j1} & \dots & w_{jk} & \dots & w_{jm} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{n1} & \dots & w_{nk} & \dots & w_{nm} \end{vmatrix}, \quad (1)$$

то весовая матрица для сигналов от Y -элементов в X -слой имеет вид транспонированной матрицы W^T . Как X -слой, так и Y -слой элементов может быть входным и выходным.

Сеть способна запоминать пары ассоциированных друг с другом изображений $S^P = (s_1^P, \dots, s_n^P)$, $T^P = (t_1^P, \dots, t_m^P)$ из некоторых заданных множеств изображений $S = (S^1, \dots, S^P, \dots, S^L)$, $T = (T^1, \dots, T^P, \dots, T^L)$, L – число ассоциированных пар.

Существуют различные варианты ДАП, в том числе, бинарный, биполярный и непрерывный. Двоичные формы ДАП (бинарная и биполярная) тесно взаимосвязаны. Процесс обучения ДАП с бинарными нейронами состоит в предварительной настройке весов связей между X - и Y -нейронами (элементов матрицы $W = |w_{jk}|$) в соответствии с формулой

$$w_{jk} = \sum_{p=1}^L (2s_j^p - 1)(2t_k^p - 1), \quad j = \overline{1, n}, \quad k = \overline{1, m}, \quad (2)$$

или формулой для биполярных нейронов

$$w_{jk} = \sum_{p=1}^L s_j^p t_k^p, \quad j = \overline{1, n}, \quad k = \overline{1, m}. \quad (3)$$

Динамика двунаправленной ассоциативной памяти является итерационной. Процесс изменения выходных сигналов нейронов каждого слоя ДАП осуществляется синхронно в начале итерации, при этом сигналы посылаются из слоя в слой последовательно, а не одновременно

в обоих направлениях. При бинарных входных векторах выходные сигналы X - и Y -нейронов определяются функциями активации $f_p(U_{\text{вх.}p})$:

$$U_{\text{вых.}p}(t+1) = \begin{cases} 1, & \text{если } U_{\text{вх.}p}(t) > 0, \\ U_{\text{вых.}p}(t), & \text{если } U_{\text{вх.}p}(t) = 0, \\ 0, & \text{если } U_{\text{вх.}p}(t) < 0, \end{cases} \quad (4)$$

где $U_{\text{вых.}p}(t+1)$ – выходной сигнал p -го ($p = 1, \dots, n, n+1, \dots, n+m$) бинарного элемента в момент времени $t+1$; $U_{\text{вх.}p}(t)$ – входной сигнал p -го элемента в момент времени t .

По сравнению с известными нейронными сетями ДАП способна осуществлять двухстороннее восстановление ассоциаций из памяти сети. Однако у нее отсутствует возможность запоминания и восстановления из памяти цепочек ассоциаций между входными и выходными данными. Для обеспечения такой возможности необходима многослойная нейронная сеть, в которой скрытые слои нейронов обеспечивают запоминание цепочек ассоциаций. Цепочки ассоциаций, получаемые с помощью многослойных сетей ассоциативной памяти, можно рассматривать как специализированные списки данных, используемые при разработке алгоритмов моделирования технологических процессов лезвийной обработки металлических изделий [8]. Но для эффективного моделирования и запоминания технологических процессов необходимо не только эффективное представление списков, но и описание и других структур данных с помощью нейронных сетей.

Целью статьи в связи с этим является разработка основных структур данных на основе ассоциативных нейронных сетей для эффективного моделирования технологических процессов.

Нейронная сеть для запоминания цепочек ассоциаций получается из ДАП путем введения в ее структуру N (четное число) слоев нейронов, которые последовательно соединены друг с другом парами двунаправленных взвешенных связей (рис. 2).

Каждый нейрон ($Z_1^1, \dots, Z_{q1}^1, \dots, Z_{g1}^1$) первого из N слоев введенных в ДАП нейронов соединяется двунаправленными взвешенными связями с каждым нейроном ($X_1, \dots, X_i, \dots, X_n$) первого сенсорного слоя. Эти два слоя нейронов, при соответствующих весах связей между ними, фактически являются двунаправленной ассоциативной памятью (рис. 3),

которая при наличии изображения на входах нейронов X_i ($i = \overline{1, n}$) первого сенсорного слоя определяет ассоциативное изображение на выходах нейронов первого слоя Z^1 -элементов.

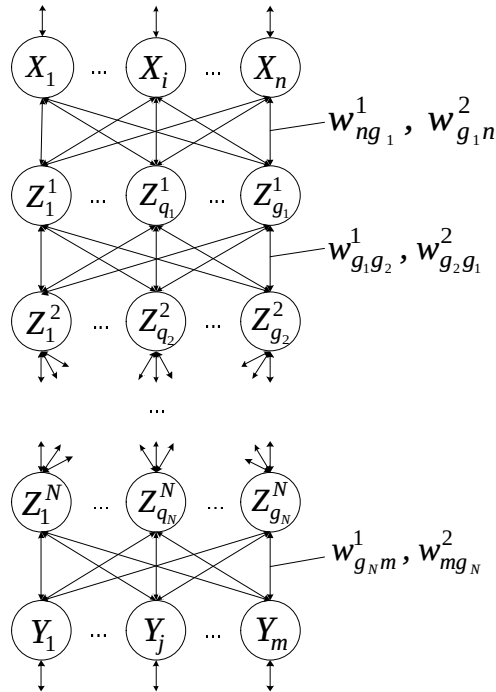


Рис. 2. Многослойная ассоциативная память

И наоборот, при наличии изображения, поступившего с выходов элементов Z^2 -слоя на входы нейронов Z^1 -слоя, определяет ассоциативное изображение на выходах элементов X -слоя. Поскольку каждый нейрон последнего из N слоев Z -нейронов соединяется двунаправленными взвешенными связями с каждым нейроном Y_j ($j = \overline{1, m}$) второго сенсорного слоя, то при соответствующих весах связей между нейронами этих слоев они также образуют двунаправленную ассоциативную память ДАП $_{(N/2)+1}$ (рис. 3), которая хранит в весах своих связей пары ассоциативных изображений, которые могут поступать соответственно на входы слоя Y -элементов или на входы слоя Z^N -элементов. Аналогичным образом блоки ДАП могут быть получены из нейронов слоев Z^2 и Z^3 , Z^4 и Z^5 (соответственно блоки

ДАП₂ и ДАП₃ на рис. 3). Таким образом, получается архитектура нейронной сети, состоящая из последовательно соединенных блоков ДАП, способная запоминать цепочки ассоциаций.

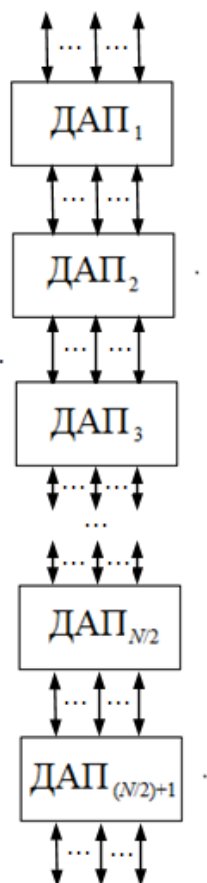


Рис. 3. Многослойная ассоциативная память в виде блоков ДАП

Разработанная сеть функционирует согласно двум алгоритмам: обучения и распознавания. Алгоритм обучения представляет собой процесс определения набора обучающих изображений и расчет матриц весов связей между слоями нейронов Y и Z^1 , Z^2 и Z^3 , ..., Z^N и Y по известным соотношения вида (2) и (3).

Алгоритм функционирования первого или последнего блока многослойной сети при подаче изображения соответственно на первый или второй сенсорные входы многослойной памяти ничем не отличается от алгоритма функционирования ДАП. Ассоциативные изображения, полученные на выходе первого или последнего блока ДАП служат

входными изображениями соответственно для второго или предпоследнего блока ДАП многослойной памяти и т.д.

Списки данных. Рассмотренные многослойные сети ассоциативной памяти фактически выполняют хранение списков ассоциаций. А список, как известно, является одним из основных типов данных, которые используются в различных алгоритмах обработки информации [9 – 11]. Список состоит из группы элементов (компонент, узлов), которые последовательно соединены между собой. Каждый элемент состоит из двух ячеек памяти, первая из которых содержит сам элемент, а вторая ячейка является указателем на следующий компонент списка (рис. 4).

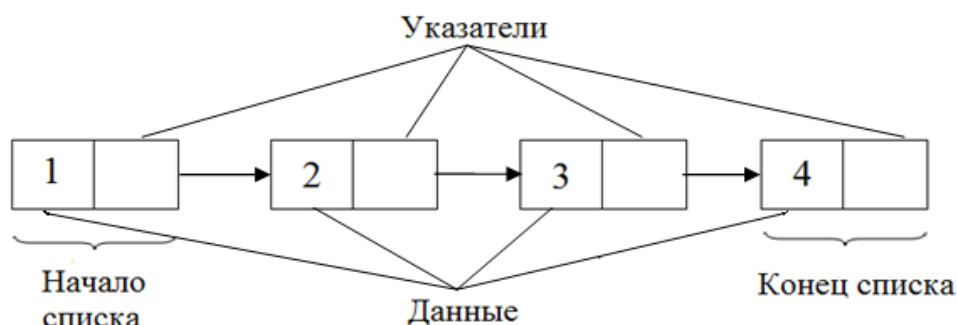


Рис. 4. Список со связями

Поскольку такие списки имеют только один указатель на следующий элемент, то они называются односвязными. Если каждый элемент списка имеет два указателя – один на следующий элемент, а другой – на предшествующий – то такие списки называются дважды связанными или двухсвязными. При этом списки предполагают возможность удаления и добавления новых элементов или их групп, сцепление (конкатенацию) двух списков или расцепление на два независимых списка.

Архитектура многослойной ассоциативной памяти в виде блоков ДАП позволяет легко выполнять все указанные операции. Например, при расцеплении двухсвязного списка между элементами ДАП₂ и ДАП₃, если первый элемент списка храниться в блоке ДАП₁ (рис. 3), первый список будет состоять только из блоков ДАП₁ и ДАП₂ и сигналы с выхода блока ДАП₂ не будут подаваться на входы блока ДАП₃. В блок ДАП₂ будет введен новый указатель на следующий блок ДАП. Второй список будет состоять из блоков ДАП₃, ..., ДАП_{N/2}, ДАП_{(N/2)+1} и на

входы блока $ДАП_3$ должны будут подаваться данные с блока, определенного новым указателем на предшествующий блок.

При добавлении нового элемента $ДАП_j$ в список, например, между элементами $ДАП_k$ и $ДАП_{k+1}$, когда рассматривается двухсвязный список и число выходов элемента $ДАП_k$ равно числу входов элемента $ДАП_j$, необходимо выполнить следующие действия:

1. В блоке $ДАП_k$ необходимо указатель на следующий блок $ДАП_{k+1}$ заменить на указатель на блок $ДАП_j$.
2. В блоке $ДАП_j$ установить указатель на предшествующий блок $ДАП_k$, а указатель на последующий блок должен указывать на блок $ДАП_{k+1}$.
3. В блоке $ДАП_{k+1}$ указатель на предшествующий блок должен быть заменен на указатель блока $ДАП_j$.

Стеки и очереди [9 – 11]. Специальный вид списка – стек или магазин. Элементы в стеке добавляются или удаляются на конце списка по принципу "последний вошел – первый вышел". Очередь – еще один специальный вид списка. В очереди элементы всегда добавляются с одного конца списка, а удаляются с другого.

Списки часто используются и для представления множеств [10].

Структуры данных в виде графов и деревьев, реализованные с помощью нейронных сетей.

Из архитектуры многослойной ассоциативной памяти (рис. 3) следует, что можно рассматривать не только цепочки последовательных ассоциаций, запоминаемых блоками $ДАП_1, ДАП_2, \dots, ДАП_{(N/2)+1}$, но и ассоциации между входами (изображениями) любых двух блоков многослойной сети (рис. 5), которая моделирует двунаправленный ориентированный граф. А графы (ориентированные, неориентированные и двунаправленные), как известно [9 – 11] являются одним из основных представлений структур данных. На рис. 5 представлена архитектура нейронной сети, моделирующая графовую структуру данных и ассоциативную память соответствующего вида для случая, когда многослойная ассоциативная память (рис. 3) содержит семь блоков $ДАП$.

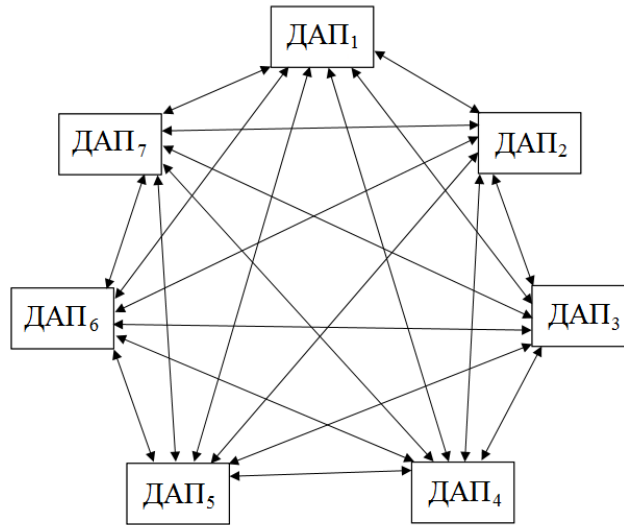


Рис. 5. Ассоциативная память, реализованная в виде двунаправленного графа

Частным, но очень важным видом ориентированных графов являются деревья [9 – 11].

Корневым деревом или просто деревом называется ориентированный ациклический граф, удовлетворяющий условиям:

- граф имеет единственный узел, который называется корнем, в который не входит ни одно ребро;
- в любой узел, за исключением корня, входит одно ребро;
- из корня к каждому узлу идет единственный путь.

Пусть $D = (V, E)$ – граф, являющийся деревом, здесь V – множество узлов дерева, E – множество ребер, задаваемых упорядоченными парами узлов дерева. Если $(v, w) \in E$, то узел v называют отцом узла w , а узел w называют сыном узла v . Если пара узлов (v, w) не определяет ребро дерева, но есть путь из узла v в узел w , то узел v является предком узла w , а узел w – его потомком.

При обработке данных наиболее часто применяются бинарные или двоичные упорядоченные деревья, то есть деревья, у которых множества сыновей каждого узла упорядочено (слева направо). При этом каждый узел имеет не более двух сыновей и не более одного левого и правого сына. На рис. 6 представлена нейронная сеть на блоках ДАП, моделирующая двоичное дерево.

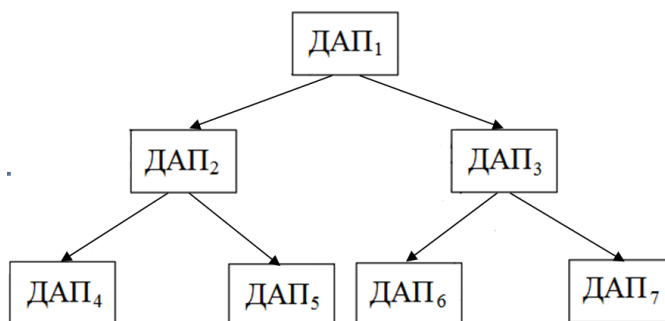


Рис. 6. Асоціативна пам'ять, реалізована в формі двоїчного дерева

Висновки. Для моделювання технологічних процесів вперше розроблена структура даних на основі асоціативних нейронних мереж, що дозволяє з допомогою нейронних мереж описати структури даних: списки, черги, графи і дерева. В наступних роботах передбачається подальше розвиток нейросетевого моделювання структур даних.

Список літератури:

1. Juba S. Learning Postgre SQL 10 / S. Juba, A. Volkov // Birmingham: PacktPublishing, 2017. – 488 P.
2. Конолли Т. Базы данных: проектирование, реализация и сопровождение. Теория и практика / Т. Конолли, К. Бегг. – М.: Диалектика – Вильямс, 2017. – 1440 с.
3. Fausett L. Fundamentals of Neural Networks. Architectures, Algorithms and Applications / L. Fausett. – New Jersey: PrenticeHallInt., Inc., 2006. – 483 p.
4. Патент на корисну модель МПК G06G 7/100. Пристрій двоспрямованої асоціативної пам'яті / В.Д. Дмитрієнко, О.Ю. Заковоротний; замовник та власник патенту Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут". – № 200605460, заявлено 19.05.2006; опубліковано 15.11.2006, бюл. 11.
5. Ямпольський Л.С. Нейротехнології та нейросистеми / Л.С. Ямпольський. – Монографія. – К.: "Дорадо – Друк", 2015. – 508 с.
6. Бодянский Е.В. Искусственные нейронные сети: Архитектуры, обучение, применения / Е.В. Бодянский, О.Г. Руденко. – Х.: ТЕЛТЕХ, 2004. – 372 с.
7. Chien W.T. The predictive model for machinability of 304 stainless steel / W.T. Chien, C.Y. Chou // Journal of Materials Processing Technology. – 2001. – № 118. – P. 442-447.
8. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования / И.П. Норенков. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 215 с.
9. Седжвик Р. Computer Science. Основы программирования на Java, ООП, алгоритмы и структуры данных / Р. Седжвик, К. Уэйн. – СПб: Питер, 2016. – 1072 с.
10. Ахо А.В. Структуры данных и алгоритмы / А.В. Ахо, Д.Э. Хопкрофт, Д.Д. Ульман. – М.: Диалектика – Вильямс, 2018. – 400 с.
11. Стивенс Р. Алгоритмы: теория и практическое применение / Р. Стивенс. – М.: Эксмо, 2016. – 544 с.

Bibliography:

1. Juba, S., and Volkov, A. *Learning PostgreSQL 10* (2017), Packt Publishing, Birmingham, 488 p.
2. Konolli, T. (2017), *Database Systems: design, implementation and maintenance. Theory and practice*, Dialektika-Vilyams, Moscow, 1440 p.
3. Fausett, L. (2006), *Fundamentals of Neural Networks. Architectures, Algorithms and Applications*, New Jersey: Prentice Hall Int., Inc., 483 p.
4. Patent on a useful model MPK G06G 7/100. Bi-directional associative memory device / Dmirtienko V.D., Zakovorotniy O.Yu.; customer and owner National technical university "Kharkiv polytechnic institute". – №200605460, stated 19.05.2006; published 15.11.2006, byul. 11.
5. Yampolskiy, L.S. (2015), *Neurotechnology and neurosystems*, Monograph, "Dorado – Druk", Kiev, 508 p.
6. Bodyanskiy, E.V. (2004), *Artificial neural networks: architecture, training, application*, TELETEH, Kharkov, 372 p.
7. Chien, W.T. (2001), "The predictive model for machinability of 304 stainless steel", *Journal of Materials Processing Technology*, No. 118, pp. 442-447.
8. Norenkov, I.P. (2000), *Fundamentals of automated design*, Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, Moscow, 215 p.
9. Sedzhvik, R., and Ueyn, K. (2016), *Computer Science. Java, OOP, algorithms and data structures*, Piter, SPb, 1072 p.
10. Aho, A.V., Hopcroft, D.E., and Ulman, D.D. (2018), *Data structures and algorithms*, Dialektika-Vilyams, Moscow, 400 p.
11. Stevens R. (2016), *Algorithms: theory and practice*, Eksmo, Moscow, 544 p.

*Статью представил д-р техн. наук, проф. НТУ "ХПИ",
А.Ю. Заковоротный*

Поступила (received) 21.10.2018

Dmitrienko Valerii, Dr. Tech. Sci., Professor
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Kirpichova, 2, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel.: (057) 707-61-98, e-mail: valdmitrienko@gmail.com
ORCID ID: 0000-0003-2523-595X

Leonov Sergey, Dr. Tech. Sci., Professor
National Technical University "Kharkiv Polytechnical Institute"
Str. Kirpichova, 2, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel.: (099) 911-911-3, e-mail: serleomail@gmail.com
ORCID ID 0000-0001-8139-0458

Brechko Veronika, Post Graduate Student
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Kirpichova, 2, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel. (066) 311-12-81, e-mail: nikabrechko@gmail.com
ORCID ID: 0000-0001-9578-2102

УДК 84.5.015.2

Основні структури даних на базі асоціативних нейронних мереж / Дмитрієнко В.Д., Леонов С.Ю., Бречко В.А. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2018. – № 42 (1318). – С. 148 – 159.

Без основних структур даних: списків, магазинів, черг, дерев і т.п., неможлива розробка ефективних алгоритмів. Однак при моделюванні ряду технологічних процесів (наприклад, при лезвійній обробці металів) звичайні структури даних недостатньо відповідають цим процесам і тому стають неефективними. У зв'язку з цим пропонується нова структура даних на основі асоціативних нейронних мереж, що дозволяє більш ефективно моделювати технологічні процеси лезвійної обробки металів. Ил.: 6. Библиогр.: 11 назв.

Ключові слова: структура даних; технологічний процес; асоціативні нейронні мережі; лезвійна обробка металів.

УДК 84.5.015.2

Основные структуры данных на базе ассоциативных нейронных сетей / Дмитриенко В.Д., Леонов С.Ю., Бречко В.А. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2018. – № 42 (1318). – С. 148 – 159.

Без основных структур данных: списков, магазинов, очередей, деревьев и т.д., невозможна разработка эффективных алгоритмов. Однако при моделировании ряда технологических процессов (например, при лезвийной обработке металлов) обычные структуры данных недостаточно соответствуют этим процессам и поэтому становятся неэффективными. В связи с этим предлагается новая структура данных на основе ассоциативных нейронных сетей, позволяющая более эффективно моделировать технологические процессы лезвийной обработки металлов. Ил.: 6. Библиогр.: 11.

Ключевые слова: структура данных; технологический процесс; ассоциативные нейронные сети; лезвийная обработка металлов.

UDC 84.5.015.2

Basic data structures based on associative neural networks / Dmitrienko V.D., Leonov S.Y., Brechko V.O. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2018. – №.42 (1318). – P. 148 – 159.

Without basic data structures: lists, stores, queues, trees, etc., the development of efficient algorithms is impossible. However, when modeling a number of technological processes (for example, blade metal processing), ordinary data structures do not correspond to these processes sufficiently and therefore become ineffective. In this regard, a new data structure based on associative neural networks, which makes it possible to more effectively model technological processes of blade metal processing, is proposed. Figs.: 6. Refs.: 11 titles.

Keywords: data structure; technological process; associative neural networks; blade metal processing.

УДК 004.89:004.4

DOI: 10.20998/2411-0558.2018.42.14

Г. А. САМИГУЛИНА, д-р техн. наук, зав. лаб. "Интеллектуальные системы управления и прогнозирования", Институт информационных и вычислительных технологий, Алматы, Казахстан,

Ж. С. ЛУКМАНОВА, докторант, Казахский национальный технический университет имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан

КОГНИТИВНАЯ SMART-ТЕХНОЛОГИЯ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ СОВРЕМЕННОМУ ОБОРУДОВАНИЮ ПРОМЫШЛЕННОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ

Статья посвящена современным направлениям дистанционного обучения инженерным специальностям для людей с ослабленным зрением. Разработана когнитивная Smart-технология для персонализированного качественного обучения в лабораториях коллективного пользования современному промышленному оборудованию фирмы Honeywell (с использованием платформы Experion PKS) применяемому в нефтегазовой отрасли с учетом психофизических характеристик обучающегося и особенностей зрения. Ил.: 3. Библиогр.: 25 назв.

Ключевые слова. дистанционное обучение; когнитивная Smart-технология; люди с ослабленным зрением; лаборатория коллективного пользования; психофизические характеристики обучающегося.

Постановка проблемы. За последние 50 лет благодаря развитию IT-технологий кардинально изменились условия обучения. С момента внедрения персональных компьютеров и Интернета наблюдается непрерывный рост инноваций в сфере образования [1]. Широкое развитие получило дистанционное обучение (ДО) [2], которое раскрывает широкий спектр возможностей и делает процесс обучения неограниченным во времени и пространстве. Внедрение высокотехнологичного оборудования в системах промышленной автоматизации приводит к необходимости развития новых образовательных технологий для подготовки профессиональных инженерных кадров. В настоящее время ДО в высших учебных заведениях для инженерных специальностей становится комплексным и сложным. Поэтому для решения этой проблемы необходимо применять интеллектуальные подходы и формировать Smart – среды обучения, которые предполагают применение когнитивного подхода при организации процесса обучения.

В последнее время вызывают интерес когнитивные Smart-технологии ДО для людей с ослабленным зрением [3]. Проблемы со зрением приводят к снижению эффективности учебного процесса и

© Г.А. Самигулина, Ж.С. Лукманова, 2018

требуют определенной коррекции поведения при изучении информации за компьютером [4]. В связи с особенностями восприятия зрительной информации различными психотипами людей (сангвиниками, холериками, меланхоликами, флегматиками) особенно актуальна подача учебной информации с учетом этих характеристик. Так как большое количество людей имеют проблемы со зрением, страдают близорукостью или дальностью, то очевидна перспективность данных исследований. Более того, создание систем ДО требует обработки больших объемов данных с использованием современных подходов искусственного интеллекта. Применение биоинспирированных методов позволяет существенно повысить качество обучения.

Анализ литературы. Инновации онлайн-технологий и быстрое их распространение меняют среду обучения. Наиболее перспективным направлением в ДО является развитие интеллектуальных систем [5], которые успешно реализуются с помощью новейших информационных технологий. В работе [6] описаны современные подходы искусственного интеллекта и когнитивные технологии для улучшения традиционных методов преподавания в онлайн режиме. В статье [7] представлена модель интеллектуальной среды обучения (ИСО) для концепции конвергентного образования, которая подразумевает междисциплинарность или сферу сближения, например, технических и естественных наук. Модель обучения в Smart-среде – это модель конвергентного образования, которая определяет возможность использования универсального образовательного контента для обучения по различным направлениям и специальностям. Smart-технологии и перспективы развития интеллектуальных систем (ИС) представлены в статье [8]. Рассматриваются взаимодействия между физическими объектами (компьютерами), кибер-объектами (облачными сервисами), обществом (социальными сетями) и человеческим мышлением (познавательной способностью).

Когнитивные технологии нацелены на обеспечение глубокого восприятия учебной информации. В статье [9] анализируется эффективность применения Smart-технологии и информационно-методического обеспечения, разработанного на основе когнитивного подхода для определения уровня информационной компетентности и психологической готовности к обучению. В статье [10] представлено развитие Smart-среды обучения в университетах с помощью кибер-физических систем. В работе [11] описан комплекс информационно-коммуникационных средств для Smart-технологии, которые позволяют создавать условия для внедрения когнитивных методик. Интеллектуальная среда обучения определена в статье [12] как

физическая среда, которая обогащена цифровыми, контекстно-зависимыми и адаптивными устройствами для эффективного обучения. В исследовании [13] описана модель обучения учитывающая когнитивные способности учащихся, которая применяется для поддержки адаптивной среды обучения. Осуществляется оценка обучения на основе навыков мышления и полученных знаний.

В статье [14] отмечается, что хорошее зрение является главным условием процесса ДО. Разработка когнитивных подходов, нацеленных на улучшение восприятия информации ЛОЗ способствует ускорению процесса обучения. Актуально создание специализированных систем ДО для людей с ослабленным зрением. Исследования [15] посвящены разработке, специализированной мультиагентной системе дистанционного обучения для людей с ограниченными возможностями зрения на основе нейронных сетей и нейро-нечеткой логики. В статье [16] представлены исследования в области компьютерного зрения для коммуникации ЛОЗ с помощью применения эффективных мультимедийных решений.

Целью данной работы является разработка инновационной когнитивной Smart-технологии персонализированного дистанционного обучения инженерным специальностям нефтегазовой отрасли людей с ослабленным зрением в лабораториях коллективного пользования (ЛКП) на современном промышленном оборудовании фирмы Honeywell (с использованием платформы Experion PKS) на основе применения различных модифицированных алгоритмов искусственных иммунных систем и других подходов искусственного интеллекта, а также когнитивных визуальных технологий динамической подачи учебной информации в зависимости от психотипа обучающегося и особенностей зрения.

Разработка когнитивной Smart-технологии для ЛОЗ инженерным специальностям. В природе так устроено, что человек почти всю информацию получает через зрение. А окружающий мир представлен в цвете, который несет смысловую окраску [17]. Цвет характеризуется тремя качествами:

- цветовым тоном, который является основным признаком цвета и зависит от длины световой волны;
- насыщенностью, определяемой долей основного тона среди примесей другого цвета;
- яркостью, или светлотой, которая проявляется степенью близости к белому цвету (степень разведения белым цветом).

Для человека с нормальным зрением любой цвет, создаваемый предметом, может быть воспроизведён особым смешением трех основных цветов спектра: красным, зеленым и синим. Определенным соотношением этих цветов можно характеризовать любой цветовой оттенок. Такое наблюдение называется "трихроматическое зрение" [18]. По сравнению с людьми, обладающими здоровым зрением, ЛОЗ воспринимают окружающую среду совсем по-другому. Слабовидящие люди видят мир в более бледных тонах (преобладают серый или чёрно-белый). Цветоподача играет большую роль для усвоения информации ЛОЗ. При близорукости (миопии) желательно использовать более спокойные тона, такие как желтый, зеленый цвета, а при дальнорукости (гиперметропии) – ярко-желтый или оранжевый цвета [19, 20].

Применение когнитивного подхода позволяет обеспечить качественное персонализированное ДО в зависимости от типа центральной нервной системы обучающихся, психофизиологических особенностей восприятия и усвоения текущей информации, а также особенностей зрения [21]. В ДО психотип человека определяет темп психической деятельности, который существенно влияет на скорость и качество восприятия учебной информации. Рассматривается четыре психотипа обучающихся: сангвиник, холерик, меланхолик, флегматик. Каждый цвет особым образом воздействует на определенный психотип человека [22]. Некоторые цвета возбуждают, другие, напротив, успокаивают нервную систему. Цвета делятся на: возбуждающие, оживляющие, бодрящие и порождающие печально-беспокойное поведение. К первым относится красно-жёлтые, ко вторым – сине-фиолетовые. Промежуточное место занимает зелёный цвет, который способствует состоянию спокойной умиротворённости. Определенную роль в эмоциональном воздействии цветов играют ассоциации: голубой цвет ассоциируется с цветом голубого неба, зелёный – с зеленью, голубо-зелёный – с водой, оранжевый – с пламенем и т.д.

На рис. 1 приведена структурная схема когнитивной Smart-технологии ДО ЛОЗ.

Цвета производят определённое физиологическое воздействие на человеческий организм. Установлено [23] что при действии пурпурного, красного, оранжевого, жёлтого цветов учащается и углубляется дыхание и пульс, а при действии зелёного, голубого, синего и фиолетового цветов возникает обратное действие. Следовательно, первая группа цветов является возбуждающей, а вторая – успокаивающей.

После тестирования ЛОЗ по зрению и психотипу создается БД индивидуальных дескрипторов обучающихся. Обработка многомерных данных осуществляется на основе подхода искусственных иммунных

систем (ИИС). Далее формируются персонализированные когнитивно-визуальные цветосхемы (рис. 2). После подключения к ЛКП для работы с современным оборудованием промышленной автоматизации осуществляется динамическая подача обучающей информации.



Рис. 1. Когнитивная SMART-технология ДО для ЛЮЗ

На рис. 3 представлена модель ЛКП с оборудованием фирмы Honeywell для работы в нефтегазовой отрасли, которая имеет четырехуровневую архитектуру с централизованной системой управления (ЦСУ). В состав ЦСУ входят следующие основные устройства: сервер Experion PKS, автоматизированное рабочее место (АРМ) в ЛКП, Web-сервер, база данных (БД) реального времени и локальный сервер Experion PKS. Основная задача сервера заключается во взаимодействии с локальными серверами для приема и передачи оперативных данных и команд посредством распределенной системы управления (DSA). Сервер Experion PKS передает данные на АРМ ЛКП, где отображаются значения параметров и сообщений сигнализаций, также статистическая информация журналов и отчетов в реальном времени. Web-сервер предназначен для безопасной передачи данных с локальных серверов по распределенной системе управления (DSA). При дистанционном обучении для интеграции локального сервера Experion PKS создается БД для двустороннего взаимодействия с OPC сервером. Связь осуществляется с помощью настройки симулятора, которая связана с БД и автоматически синхронизируются между локальными

серверами и АРМ ЛКП. База данных позволяет объединить в единое информационное пространство сервер Experia PKS на базе технологии Fault Tolerant Ethernet (FTE) [24], которая является запатентованной технологией фирмы Honeywell.

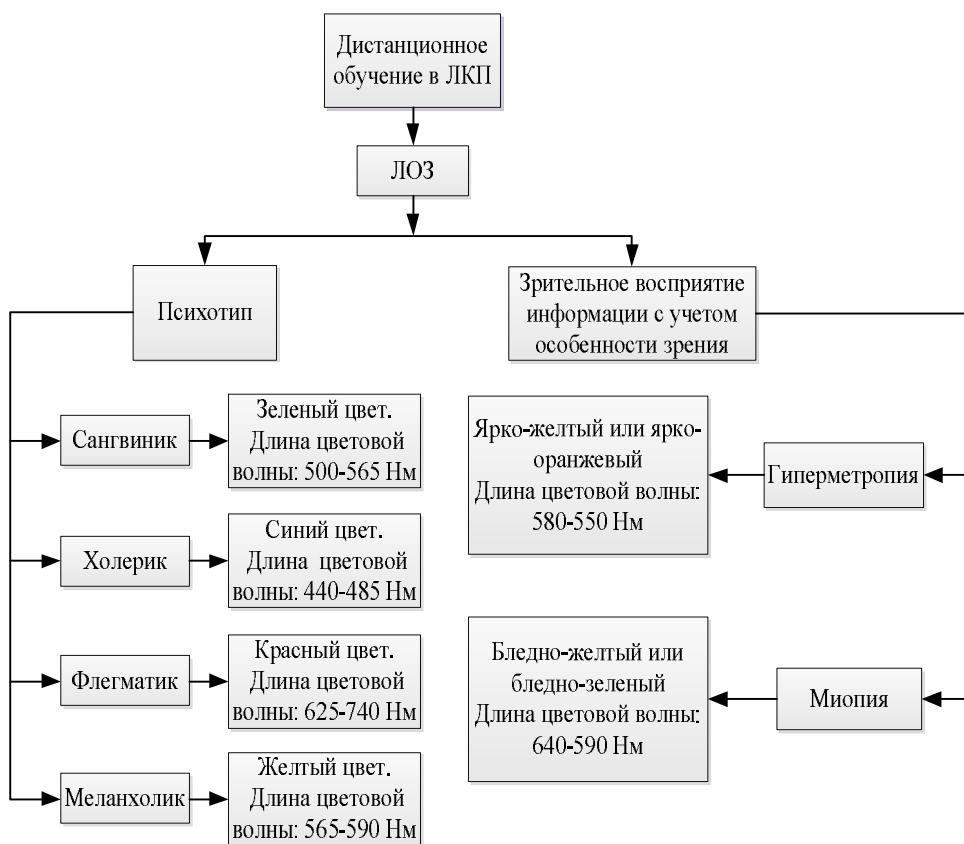


Рис. 2. Формирование когнитивно-визуальных цветосхем для когнитивной SMART-технологии ДО

Предлагаемая когнитивная Smart-технология может применяться при разработке мнемосхем для управления сложными техническими, технологическими процессами и осуществления информационной поддержки деятельности человека с учетом индивидуальных психофизиологических особенностей восприятия и осознания текущей информации.

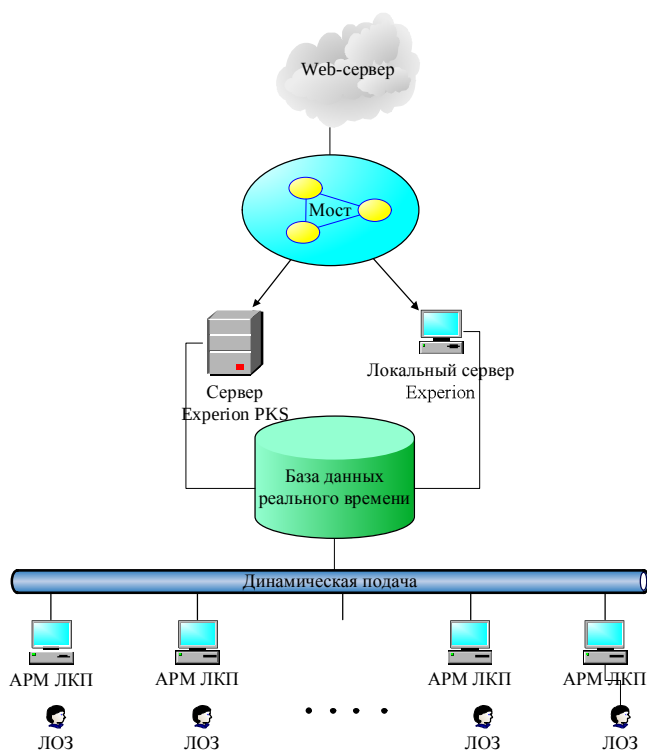


Рис. 3. Модель ЛКП с оборудованием фирмы Honeywell

Выводы. Разработанная инновационная когнитивная Smart-технология дистанционного обучения людей с ослабленным зрением инженерным специальностям на основе биоинспирированного подхода ИИС с использованием современных средств вычислительной техники, а также реального промышленного оборудования фирмы Honeywell являются актуальной и решает важную задачу подготовки высококвалифицированных инженерных кадров в нефтегазовой отрасли.

Работа выполняется по гранту Комитета Науки Министерства Образования и Науки Республики Казахстан (2018–2020 гг.), по теме "Разработка когнитивной Smart-технологии для интеллектуальных систем управления сложными объектами на основе подходов искусственного интеллекта".

Список литературы:

1. Spector J.M. Conceptualizing the emerging field of smart learning environments / J.M. Spector. Smart Learning Environments. – Springer. – 2014. – P. 1-10.
2. (Tony) Bates A.W. Teaching in a Digital Age / A.W. (Tony) Bates. Guidelines for designing teaching and learning. – April 2015. – P. 379-386.

3. Самигулина Г.А. Разработка когнитивной Smart-технологии для персонализированного дистанционного обучения людей с ослабленным зрением инженерным специальностям / Г.А. Самигулина, Ж.С. Лукманова. – Вестник КазНУТУ. № 5 (129). – 2018. – 48 с.
4. Florea C. Chapter 2 – Computer Vision for Cognition: An Eye Fo-cused Perspective / C. Florea, L. Florea, C. Vertan. – Academic Press., 2018, Computer Vision and Pattern Recognition. – P. 51-74.
5. Popova O. Intelligence Amplification in Distance Learning through the Binary Tree of Question-answer / O. Popova, B. Popov, V. Karandey / J. Procedia – Social and Behavioral Sciences: Elsevier, 2015. – №. 214. – P. 75- 85.
6. Yousif J.H. Artificial Intelligence in E-learning-Pedagogical and Cognitive Aspects / J.H. Yousif, D.K. Saini, H.S. Uraibi. – Proc. of the World Congress on Engineering. – London, U.K. – 2011. – № 2. – P. 452 - 457.
7. Finogeev A. Life-cycle management of educational programs and resources in a smart learning environment / A. Finogeev, A. Kravets, M.I. Deev, A. Bershadsky, L. Gamidullaeva. – Smart Learning Environments. – Springer. – December 2018.
8. Hong Liu. A review of the smart world / Liu Hong, Ning Huansheng, Mu Qitao, Zheng Yumei, Zengd Jing, T. Yang Laurence, Huang Runhe, Ma Jianhua. Future // Generation Computer Systems. – Elsevier. – 8 September 2017.
9. Matukhina D. Implementing Blended Learning Technology in Higher Professional Education / D. Matukhina, E. Zhitkovab // Procedia – Social and Behavioral Sciences. – Elsevier. – 2015. – № 206. – P. 183-188.
10. Lee J. Smart learning adoption in employees and HRD managers / J. Lee, H. Zo, H. Lee. Version of Record online. – British Educational Research Association. – 20 October 2014.
11. Koper R. Conditions for effective smart learning environments / R. Koper // Smart Learning Environments. – Springer. – 2014.
12. Lei Chi-Un. Developing a Smart Learning Environment in Universities Via Cyber-Physical Systems / Chi-Un Lei, Kaiyu Wan, Ka Lok Man // Procedia Computer Science. Elsevier. – 2013. – № 17. – P. 583-585.
13. Balasubramanian V. Learning style detection based on cognitive skills to support adaptive learning environment / V. Balasubramanian, S.A. Margret Anuncia // Ain Shams University. Production and hosting by Elsevier B.V. – 24 April 2016. – P. 1-13.
14. Bhowmick A. An insight into assistive technology for the visually impaired and blind people: state-of-the-art and future trends / A. Bhowmick, S.M. Hazarika // Journal on Multimodal User Interfaces. – 2017. – № 11 (2). – P. 149-172.
15. Samigulina G.A. Innovative intelligent technology of distance learning for visually impaired people / G.A. Samigulina, A.S. Shayakhmetova, A. Nyussupov // J. Open engineering. – 2017. – № 7. – P. 444-452.
16. Panchanathan S. Chapter 8 – Computer Vision for Augmentative and Alternative Communication / S. Panchanathan, M. Moore, H. Venkateswara, S. Chakraborty, T. McDaniel. Computer Vision and Pattern Recognition // Academic Press. – 2018. – P. 211-248.
17. Александров Ю.И. Психофизиология / Ю.И. Александров. Учебник для вузов. 4-е изд. СПб.: Питер, 2018. – 464 с.
18. Джадд Д. Цвет в науке и технике / Д. Джадд, Г. Вышецки. – М.: Мир. – 1978.
19. Белоскова К.В. Экспериментальное исследование порядка восприятия текстовой информации на экране дисплея / К.В. Белоскова, С.Л. Артеменков // PsyJournals. – 2010. – P. 230-234.

20. Klingberg T. Training and plasticity of working memory / T. Klingberg // *Trends in Cognitive Sciences*. – 2010. – № 14 (7). – P. 317-323.
21. Самигулина Г.А. Дистанционное обучение людей с ослабленным зрением на основе когнитивной SMART-технологии / Г.А. Самигулина, Ж.С. Лукманова // *Материалы XXV Всероссийского семинара "Нейроинформатика, ее приложения и анализ данных. NEU-2018"*. – Красноярск. – 2018. – С. 112-116.
22. Рубинштейн С.Л. Основы общей психологии / С.Л. Рубинштейн. – СПб.: Издательство Питер, 2002. – 720 с.
23. Ronnier Luo. Encyclopedia of Color Science and Technology / Luo Ronnier. // Springer Science+Business Media, New York. – 2016.
24. Парьев Г.В. Централизованная система управления технологическими объектами на базе единой операторной ООО "Лукойл-Волгограднефтепереработка" / Г.В. Парьев. // *Автоматизация в промышленности*. – 2015. – № 7. – С. 41-47.

References:

1. Spector, J.M. (2014), "Conceptualizing the emerging field of smart learning environments". *Smart Learning Environments*. Springer, pp. 1-10.
2. (Tony) Bates, A.W. (2015), "Teaching in a Digital Age". *Guidelines for designing teaching and learning*, pp. 379-386.
3. Samigulina, G.A., and Lukmanova (2018), "Development of cognitive smart – technology for distance learning of people with low vision in engineering specialties", *VESTNIK KazNRTU*, № 5 (129), 48 p.
4. Florea, C., Florea, L., and Vertan, C. (2018), "Chapter 2 – Computer Vision for Cognition: An Eye Fo-cused Perspective". *Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 51-74.
5. Popova, O., Popov, B., Karandey, V. (2015), "Intelligence Amplification in Distance Learning through the Binary Tree of Question-answer", *J. Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Elsevier, 214, pp. 75- 85.
6. Yousif, J.H., Saini, D.K. and Uraibi, H.S. (2011), "Artificial Intelligence in E-learning-Pedagogical and Cognitive Aspects". *Proc. of the World Congress on Engineering*, London, U.K., 2, pp. 452-457.
7. Finogeev, A., Kravets, A., Deev, M., Bershadsky, A., Gamidullaeva. (2018), "Life-cycle management of educational programs and resources in a smart learning environment", *Smart Learning Environments*, Springer, December.
8. Hong, Liu, Huansheng, Ning, Qitao, Mu, Yumei, Zheng, Jing Zengd, Laurence T. Yang, Runhe Huang, and Jianhua, Ma. (2017), "A review of the smart world", *Future Generation Computer Systems*, Elsevier, 8 September 2017.
9. Hwang Gwo-Jen. (2014), "Definition, framework and research issues of smart learning environments – a context-aware ubiquitous learning perspective", *Smart Learning Environments*, Springer.
10. Matukhina, D., and Zhitkovab, E. (2015), "Implementing Blended Learning Technology in Higher Professional Education", *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, Elsevier, 206, pp. 183 – 188.
11. Lee, Junghwan, Zo, Hangjung, and Lee, Hwansoo (2014), *Smart learning adoption in employees and HRD managers*. Version of Record online. British Educational Research Association.
12. Koper, R. (2014), "Conditions for effective smart learning environments", *Smart Learning Environments*, Springer.
13. Lei, Chi-Un, Wan, Kaiyu, Man, and Ka, Lok (2013), "Developing a Smart Learning Environment in Universities Via Cyber-Physical Systems". *Procedia Computer Science*, Elsevier, 17, pp. 583-585.

14. Balasubramanian, V., Margret, and Anouncia, S. (2016), *Learning style detection based on cognitive skills to support adaptive learning environment*. A.Ain Shams University. Production and hosting by Elsevier B.V., pp. 1-13
15. Bhowmick, A., and Hazarika, S.M. (2017), "An insight into assistive technology for the visually impaired and blind people: state-of-the-art and future trends". *Journal on Multimodal User Interfaces*, Vol. 11, pp. 149-172.
16. Samigulina, G.A., Shayakhmetova, A.S., and Nyussupov, A. (2017), "Innovative intelligent technology of distance learning for visually impaired people". *J. Open engineering*, No. 7, pp. 444-452.
17. Panchanathan, S., Moore, M., Venkateswara, H., Chakraborty, S., and McDaniel T. (2018), "Chapter 8 – Computer Vision for Augmentative and Alternative Communication". *Computer Vision and Pattern Recognition*. Academic Press., pp. 211-248.
18. Aleksandrov, Yu. I. (2018), *Psychophysiology*. Textbook for universities. 4, Peter, SPb., 464 p.
19. Judd, D., and Wyszeck, G. (1978). *Color in Business, Science, and Industry*. World, Moscow.
20. Beloskova, K.V., and Artemenkov, S.L. (2010), "Experimental study of the perception order of textual information on the display screen", *PsyJournals*, pp. 230-234.
21. Klingberg, T. (2010), "Training and plasticity of working memory", *Trends in Cognitive Sciences*, Vol. 14 (7), pp. 317-323.
22. Samigulina, G.A., and Lukmanova, Z.S. (2018), "Distance learning for people with low vision based on cognitive SMART technology". *Materials of the XXV All-Russian Seminar "Neuroinformatics, its applications and data analysis. NEU-2018"*. Krasnoyarsk, pp. 112-116.
23. Rubinstein, S.L. (2002), *Fundamentals of General psychology*. Publisher: Peter, 720 p.
24. Ronnier, Luo (2016), *Encyclopedia of Color Science and Technology*. Springer Science+Business Media, New York.
25. Pariev, G.V. (2015), "Centralized control system for technological object based on the United operator LLC "LUKOIL-Volgograd oil refining". *Automation in industry*, No. 7, pp. 41-47.

Статью представил д.т.н., проф. Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" С.Ю. Леонов

Поступила (received) 1.11.2018

Samigulina Galina, Dr. Sci. Tech
Institute of Information and Computing Technologies
Str. Pushkeen, 125, Almaty, Kazakhstan, 050010
Tel:+7(777) 244-43-67, e-mail: galinasamigulina@mail.ru
ORCID ID: 0000-0003-1798-9161

Lukmanova Zhanar, doctoral student
Kazakh national research technical university
named after K.I. Satpayev (Satbayev University)
Str. Satpayev, 22, Almaty, Kazakhstan, 050013,
Tel:+7(701)212-06-16, e-mail: azeshova@mail.ru
ORCID ID: 0000-0003-1798-9161

УДК 004.89:004.4

Когнітивна Smart-технологія дистанційного навчання сучасному обладнанню промислової автоматизації / Самігуліна Г.А., Лукманова Ж.С. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2018. – № 42 (1318). – С. 160 – 170.

Стаття присвячена сучасним напрямкам дистанційного навчання інженерних спеціальностей для людей з ослабленим зором. Розроблено когнітивна Smart-технологія для персоналізованого якісного навчання в лабораторіях колективного користування сучасного промислового обладнання фірми Honeywell (з використанням платформи Experion PKS) застосовується в нафтогазовій галузі з урахуванням психофізичних характеристик того, хто навчається і особливостей зору. Ил.: 3. Бібліогр.: 25 назв.

Ключові слова: дистанційне навчання; когнітивна Smart-технологія; люди з ослабленим зором; лабораторія колективного користування; психофізичні характеристики того, хто навчається.

УДК 004.89:004.4

Когнитивная Smart-технология дистанционного обучения современному оборудованию промышленной автоматизации / Самигулина Г.А., Лукманова Ж.С. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2018. – № 42 (1318). – С. 160 – 170.

Статья посвящена современным направлениям дистанционного обучения инженерным специальностям для людей с ослабленным зрением. Разработана когнитивная Smart-технология для персонализированного качественного обучения в лабораториях коллективного пользования современному промышленному оборудованию фирмы Honeywell (с использованием платформы Experion PKS) применяемому в нефтегазовой отрасли с учетом психофизических характеристик обучающегося и особенностей зрения. Ил.: 3. Библиогр.: 25 назв.

Ключевые слова. дистанционное обучение; когнитивная Smart-технология; люди с ослабленным зрением; лаборатория коллективного пользования; психофизические особенности обучающихся.

УДК 004.89:004.4

Cognitive Smart-technology in distance learning of the modern equipment of industrial automation / Samigulina G.A., Lukmanova Zh.S. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2018. – №.42 (1318). – P. 160 – 170.

The article is devoted to modern areas of distance learning engineering specialties for low vision people. Developed cognitive Smart-technology for personalized high-quality training in the laboratories of collective use of modern industrial equipment from Howellwell (using the Experion PKS platform) used in the oil and gas industry, taking into account the psychophysical characteristics of the student and the features of vision. Figs.: 3. Refs.: 25 titles.

Keywords: distance learning; cognitive Smart-technology; low vision people; shared laboratory; industrial automation equipment; psychophysical characteristics of students.

УДК 004.852

DOI: 10.20998/2411-0558.2018.42.17

А. Ю. ТІТОВА, канд. техн. наук, Державний університет телекомунікацій, Київ,

Д. Є. ІВАНОВ, д-р техн. наук, доц., ІПММ НАНУ, Слов'янськ

РОЗРОБКА МОДЕЛІ АНАЛІЗУ СКЛАДНИХ ДАНИХ НА ОСНОВІ КЛАСИФІКАЦІЇ MACHINE LEARNING

Виконано аналіз методів класифікації machine learning та визначені етапи обробки складних даних на основі бінарної класифікації. Розроблено модель аналізу складних даних на основі класифікації machine learning та проведено перевірку її адекватності з використанням різних засобів оцінки. Виконана класифікація даних на відповідність двом класам: корисної інформації та спаму. Лл.: 2. Бібліогр.: 11 назв.

Ключові слова: класифікація; складні дані; machine learning; засоби оцінки; бінарна класифікація; спам.

Постановка проблеми. Проблема аналізу даних складної структури є актуальною у сучасному світі інформаційних технологій для класифікації даних, прогнозування кількісних характеристик, виявлення нових закономірностей та інтерпретації даних. Сучасні методи класифікації та технології машинного навчання, які використовуються для аналізу та прогнозування [1, 2], дають високі показники точності, швидкодії, проте виявлення цінних даних, програмна реалізація та експериментальне впровадження результатів недостатньо висвітлені авторами. Для вирішення проблеми обробки даних складної структури слід розробити модель аналізу складних даних на основі класифікації machine learning та застосовувати прогресивні мови програмування для експериментального дослідження

Аналіз літератури. Сучасні програмні платформи та середовища розробки дозволяють реалізовувати моделі та методи різної складності для класифікації, прогнозування даних та розробки інформаційних технологій. Для класифікації зображень місцевості обрані чотири алгоритми класифікації, а саме: дерева рішень, наївний метод Байєса (NB), випадкові ліси та машини опорних векторів (SVM), останній показав потенціал у платформі Hadoop MapReduce та свою продуктивність [1]. Розроблено модель на основі програмного агента, що дозволяє класифікувати пацієнтів із захворюванням на цукровий діабет на групи та прогнозувати необхідну кількість медичних препаратів для конкретного випадку [2]. У дослідженнях [3 – 5] розглядаються методи NB та TAN, опорних векторів (SVM), k -найближчих сусідів, дерев

рішень для прогнозування кредитоспроможності фізичних осіб, для керування складними електромеханічними системами, нелінійними об'єктами, а також об'єктами зі стохастичними параметрами, в задачах класифікації текстових документів та обрані методи з достатніми показниками точності класифікації для відповідних задач. Проведено дослідження особливостей класифікації методів і технологій аналітики Великих даних та технологій business intelligence під час обробки діагностичної інформації для збереження конкурентоспроможності підприємств [6, 7].

Визначено основні переваги методів глибинного навчання над традиційними підходами до задач класифікації, для відокремлення ознак із супутникових даних [8]. Запропоновані підходи до моделювання кластеризації та класифікації функціональних, багатомірних даних, що містять неоднорідність, відсутність інформації та динамічну приховану структуру з декількох областей застосування [9].

Існуючі методи та моделі класифікації складних даних використовують математичний апарат для конкретної задачі та дають не значні показники точності, тому в даній роботі запропоновано розробити нову модель аналізу складних даних.

Мета дослідження – розробка моделі аналізу складних даних на основі класифікації machine learning для прогнозування кількісних характеристик, дійсних і придатних до подальшого використання даних.

Для досягнення даної мети необхідно вирішити наступні задачі:

- визначити етапи обробки складних даних на основі бінарної класифікації;
- виконати оцінку адекватності моделі аналізу складних даних різними засобами на конкретних прикладах.

Матеріали дослідження. Відомо, що класифікація є популярною задачею машинного навчання, та полягає у побудові моделей, що виконують віднесення обраного об'єкта до одного з декількох відомих класів [10]. Одним з головних недоліків методу дерев рішень для задач класифікації текстів є те, що "позитивні" і "негативні" розгалуження у вузлах мають однакову вагу. До переваг зазначеного методу слід віднести той факт, що побудоване дерево легко піддається аналізу. Результати класифікації текстів за допомогою методу опорних векторів є одними з найкращих, у порівнянні з іншими методами машинного навчання. Однак, швидкість навчання SVM одна з найнижчих. Для проведення дослідження обрано бінарну класифікацію.

Об'єктом даного дослідження є таблиця даних із електронних листів, що містять спам, котрий розміщений у різних комірках. Такі дані

розміщено у колекції наборів даних Центру машинного навчання та інтелектуальних систем Каліфорнійського університету (Center for Machine Learning and Intelligent Systems). Необхідно виконати класифікацію даних на відповідність двом класам, а саме корисній інформації та спаму.

Для цього слід виконати наступні етапи:

1. Завантажити файл даних для аналізу у середовище.
2. Розділити вихідні дані в співвідношенні 10:1 на навчальну і перевіірочну вибірки.
3. Використати логістичну регресійну модель для класифікації даних.
4. Виконати різними засобами оцінку якості моделі аналізу складних даних на конкретних прикладах.

Для бінарної класифікації табличних даних запропоновано використати логістичну регресійну модель, що дозволяє на основі отриманих остач від прогнозу, визначити кількість корисних даних та спаму для навчальної та перевіірочної вибірок.

Для оцінки адекватності моделі аналізу складних даних використано різні засоби, а саме кількісні показники прогнозу; ROC-криву для оцінки ймовірності спаму; графік щільності розподілу ймовірностей обох класів (спаму та корисної інформації).

Для розрахунку кількісних показників класифікації табличних даних на корисні та зі спамом отримано чутливість, специфічність та точність прогнозу.

Розрахувати чутливість (sensitivity), що визначає наскільки вдало виявлено дані зі спамом, необхідно за наступним виразом [11]

$$SE = TP / (TP + FN), \quad (1)$$

де TP – число даних з істинно позитивним результатом; FN – кількість даних з хибно негативним результатом прогнозу.

Для представлення ефективності класифікації, а саме відповідності правильного виявлення спаму від корисної інформації, необхідно обчислити специфічність (specificity) за наступним виразом:

$$SP = FP / (FP + TN), \quad (2)$$

де FP – число даних з хибно позитивним результатом прогнозу; TN – число даних з істинно негативним результатом.

Необхідно визначити загальну ймовірність прогнозу давати правильні результати, для цього розрахувати точність (accuracy) за виразом [11], що представлено далі:

$$AC = (TP + TN) / (TP + FP + FN + TN), \quad (3)$$

Після проведення експерименту отримано такі значення для кількісних показників прогнозу:

$$SE = 0.89; SP = 0.86; AC = 0.93.$$

Для оцінки якості прогнозу графоаналітичним методом та інтерпретації перерахованих показників необхідно застосувати ROC-аналіз. Побудовано ROC-криву (рис. 1) для бінарного відгуку (1 – спам, 0 – корисна інформація), де довільне значення даних на цьому діапазоні вважається класифікаційним порогом. Чим ближче крива до верхнього лівого кута, тим вище у моделі здатність до прогнозу.

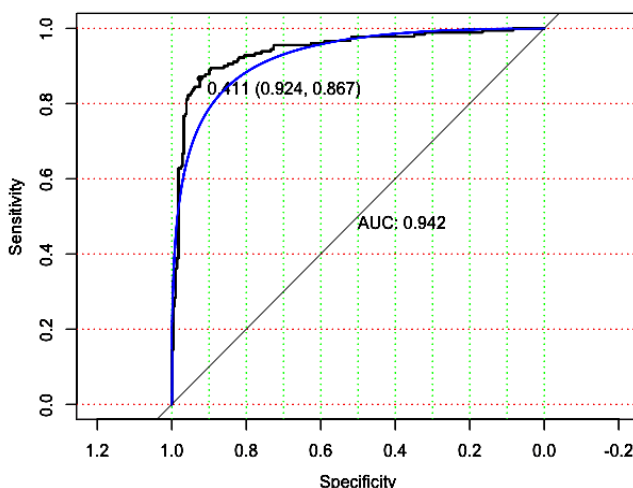


Рис. 1. ROC-крива оцінки класифікації моделі

Запропонована логістична регресійна модель дозволяє отримати прогноз класу кожного із набору складних даних та повернути оцінену ймовірність належності даних відповідному класу. При підборі оптимальних порогових значень класифікатора моделі проаналізовано графік щільності розподілу ймовірностей обох класів, котрий представлений на рис. 2.

Після проведення експерименту отримано такі результати показників прогнозу:

$$SE = 0.8864629; SP = 0.8645161; AC = 0.9324324.$$

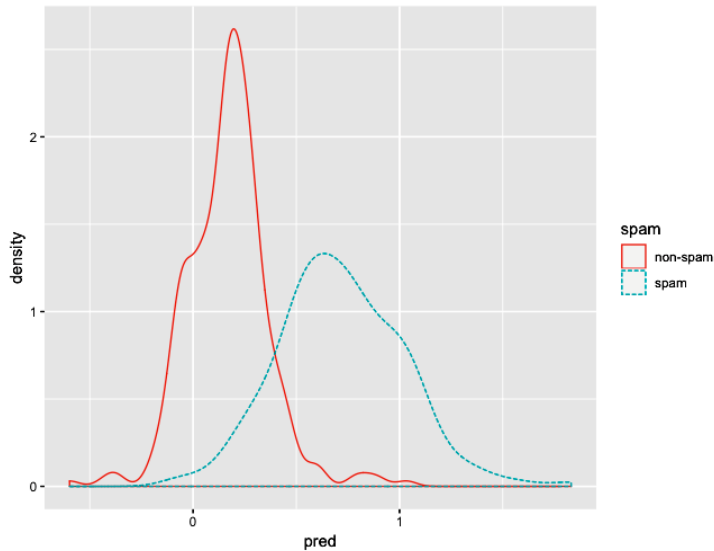


Рис. 2. Графік щільності розподілу ймовірностей появи даних двох класів

Як видно з рис. 2, кривими лініями показана умовна ймовірність прогнозу корисної інформації та спаму у тестовій вибірці складних даних, де на осі X відображено значення ймовірностей прогнозу, а на осі Y – щільність розподілу даних між двома класами.

Висновки. Під час дослідження проаналізовані методи класифікації machine learning, визначені етапи обробки складних даних на основі бінарної класифікації; розроблено модель аналізу складних даних, виконано експериментальні дослідження застосування моделі на конкретних прикладах. Отримані результати свідчать про можливість використання моделі.

Список літератури:

1. Айма V.A. Classification algorithms for big data analysis, a Map Reduce approach / V.A. Aima, R.S. Ferreira, P. Happ, D. Oliveira // The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2015. – Т. 40. – № 3. – Р. 17-21.
2. Alotaibi N.M. Agent-based big data classification / N.M. Alotaibi, M. Abdullah, H. Mosli // Journal of Fundamental and Applied Sciences. – 2018. – Vol. 10. – №. 4. – Р. 258-264.
3. Кириченко В.Е. Застосування наївного та дереводоповненого байєсівських класифікаторів для прогнозування кредитоспроможності фізичних осіб / В.Е. Кириченко, О.М. Терентьєв, Н.О. Свєзінська // System analysis and information technology: Proceedings of 18-th International conference SAIT 2016, Kyiv, Ukraine, May 30 – June 2, 2016. – NTUU "KPI", 2016. – С. 364-365.
4. Шеремет О.І. Метод опорних векторів (SVM) / О.І. Шеремет, О.В. Садовой // Математичне моделювання. Науковий журнал. Дніпродзержинськ: ДДТУ. – 2013 – № 1 (28). – С. 13-17.

5. Волосяк Ю.В. Методи класифікації текстових документів в задачах Text Mining / Ю.В. Волосяк // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2014. – №. 6. – С. 76-81.
6. Верес О.М. Класифікація методів аналізу Великих даних / О.М. Верес, Р.М. Оливко // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Інформаційні системи та мережі. – Львів :Видавництво Львівської політехніки, 2017. – № 872. – С. 84–92.
7. Титова А.Ю. Анализ технологий business intelligence при обработке диагностической информации / А.Ю. Титова // Материалы Регионального семинара Международного союза электросвязи для стран Европы и СНГ "Цифровое будущее на основе 4G/5G", г. Киев, 14-16 мая 2018. – 2018. – С. 84-85
8. Лавренюк М.С. Огляд методів машинного навчання для класифікації великих обсягів супутникових даних / М.С. Лавренюк, О.М. Новіков // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2018. – №. 1. – С. 52-71.
9. Chamroukhi F. Model-Based Clustering and Classification of Functional Data / F. Chamroukhi, H.D. Nguyen // Cornell University Library: Statistics-Machine Learning. – 2018. – 69 P; available at: <https://arxiv.org/abs/1803.00276v2> (accessed December 2018).
10. Шитиков В.К., Мاستицкий С. Э. Классификация, регрессия, алгоритмы Data Mining с использованием R [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://ranalytics.github.io/data-mining/index.html> (accessed December 2018).
11. Титова А.Ю. Методи та моделі інформаційної технології для автоматизованих систем переробки діагностичної інформації на основі термограм: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Київ. – 2017. – 23 с.

References:

1. Ayma, V.A., Ferreira, R.S., Happ, P., and Oliveira, D. (2015), "Classification algorithms for big data analysis, a Map Reduce approach", *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 40, No. 3, pp 17-21.
2. Alotaibi, N.M., Abdullah, M., and Mosli, H. (2018), "Agent-based big data classification", *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, Vol. 10, No. 4., pp. 258-264.
3. Kirichenko, V.E., Terentyev, O.M., and Svyazninskaya, N.O. (2016), "Application of naive and wood-based Bayesian classifiers for predicting the creditworthiness of individuals", *System analysis and information technology: Proceedings of 18-th International conference SAIT 2016*, NTUU "KPI", Kyiv, Ukraine, May 30 – June 2, 2016, pp. 364-365.
4. Sheremet, A.I., and Garden, A.V. (2013), "Support vector machine (SVM)", *Mathematical Modeling. Scientific. Journal. Dneprodzerzhinsk: DonSTU*, No. 1 (28), pp. 13-17.
5. Volosyuk Yu.V. (2014), "Methods of classification of text documents in tasks Text Mining", *Scientific notes Ukrainian Research Institute of Communications*, No. 6, pp. 76-81.
6. Veres. O.M., and Olivko, R.M. (2017), "Classification of methods for the big data analytics", *Proceedings of the National University "Lviv Polytechnic". Series: Information systems and networks*, Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniky, Lviv, No 872, pp. 84-92.
7. Titova A.Yu. (2018), "Analysis of business intelligence technologies in diagnostic information processing", *Proceedings of Regional Workshop of the International Telecommunication Union for Europe and CIS region "Digital Future Powered by 4G/5G"*, Kiev, May, 14-16, 2018, pp. 84-85
8. Lavreniuk, M., and Novikov, A. (2018), "Overview of machine learning to classify large volumes of satellite data", *System Research & Information Technologies*, No. 1, pp. 52-71.
9. Chamroukhi, F., and Nguyen, H.D. (2018), "Model-Based Clustering and Classification of Functional Data", *Cornell University Library: Statistics-Machine Learning*, 69 P, available at: <https://arxiv.org/abs/1803.00276v2> (accessed December 2018).

10. Shitikov, V.K., and Mastitsky, S.E. (2017), "Classification, regression, Data Mining algorithms using R", available at: <https://ranalytics.github.io/data-mining/index.html> (accessed December 2018).

11. Titova, A.Yu. (2017), *Methods and models of information technology for an automated system for processing diagnostic information on the basis of thermal images: Author's thesis.* Kiev, 23 p.

Статтю представив д-р техн. наук, проф. ДУТ Вишнівський В.В.

Надійшла (received) 06.11.2018

Titova Anastasiya, PhD Tech
State University of Telecommunications
Str. Solomenska, 7, Kyiv, Ukraine, 03110
Tel.: (095) 333-51-01, e-mail: a.titova.wk@gmail.com
ORCID ID: 0000-0002-4803-2090

Ivanov Dmitry, Dr.Sci.Tech, Ass. Professor
Institute of Applied Mathematics and Mechanics
Str. Gen. Batyuka, 19, Slavyansk, 84100
Tel: (063) 559-51-90, e-mail: dmitry.ivanov.iamm@gmail.com
ORCID ID: 0000-0001-9956-6589

УДК 004.852

Розробка моделі аналізу складних даних на основі класифікації machine learning / Тітова А.Ю., Іванов Д.Є. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2018. – № 42 (1318). – С. 171 – 178.

Виконано аналіз методів класифікації machine learning та визначені етапи обробки складних даних на основі бінарної класифікації. Розроблено модель аналізу складних даних на основі класифікації machine learning та проведено перевірку її адекватності з використанням різних засобів оцінки. Виконана класифікація даних на відповідність двом класам: корисної інформації та спаму. Ил.: 2, Бібліогр.: 11 назв.

Ключові слова: класифікація; складні дані; machine learning; засоби оцінки; бінарна класифікація; спам.

УДК 004.852

Разработка модели анализа сложных данных на основе классификации machine learning / Титова А.Ю., Иванов Д.Е. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2018. – № 42 (1318). – С. 171 – 178.

Выполнен анализ методов классификации machine learning и определены этапы обработки сложных данных на основе бинарной классификации. Разработана модель анализа сложных данных на основе классификации machine learning и проведена проверка ее адекватности с использованием различных средств оценки. Выполнена классификация данных на соответствие двум классам: полезной информации и спама. Ил.: 2, Библиогр.: 11 назв.

Ключевые слова: классификация; сложные данные; machine learning; средства оценки; бинарная классификация; спам/

УДК 004.852

Development of model analysis of a complex data based on machine learning classification / Titova A.Yu., Ivanov D.E. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2018. – № 42 (1318). – P. 171 – 178.

The analysis of methods of classification of machine learning and defined stages of processing of complex data on the basis of binary classification is performed. A model for analyzing complex data based on machine learning has been developed and a validation of its adequacy has been carried out using various means of evaluation. A classification of dyne has been performed to correspond to two classes: useful information and spam. Fig.: 2, Refs.: 11 titles.

Keywords: classification; complex data; machine learning; evaluation tools; binary classification; spam.

Информационные технологии

УДК 004.832.34+303.442.3

DOI: 10.20998/2411-0558.2018.42.02

Т. О. БІЛОБОРОДОВА, канд. техн. наук, ст. викл., СХУ

ім. В. Даля, Сєвєродонецьк

І. С. СКАРГА-БАНДУРОВА, д-р техн. наук, доц., зав.каф., СХУ

ім. В. Даля, Сєвєродонецьк

КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД ДО ОБРОБКИ РІЗНОРІДНИХ МЕДИЧНИХ ДАНИХ З ВІДСУТНІМИ ЗНАЧЕННЯМИ

Показана необхідність врахування змішаних наборів даних з відсутніми значеннями. Запропоновано узагальнений підхід до обробки різнорідних медичних даних з урахуванням типу даних, механізму їх відсутності. Проведене опрацювання трьох різних наборів даних з використанням запропонованого підходу та контрольної моделі. Надано порівняння ефективності опрацювання даних. Іл.: 2. Табл.: 2. Бібліогр.: 12 назв.

Ключові слова: різнорідні медичні дані, відсутні значення, обробка, контрольна модель.

Опис проблеми та аналіз літератури. За даними звіту про тенденції в галузі охорони здоров'я від Stanford Medicine [1] майбутнє охорони здоров'я залежить від ряду важливих тенденцій, серед яких виділяють прогнозування та профілактику захворюваності. У цьому контексті, якісний аналіз даних може потенційно поліпшити лікування пацієнтів, знайти невідомі фактори ризику захворювань або виявити супутні захворювання, зробити медичну діагностику більш точною, покращити управління витратами, тощо. Разом з тим, медичні дані є одними з найбільш складних в дослідженні типів даних [2].

В науковій літературі обговорення проблем медичних даних в основному фокусується на наявності помилок вимірювання, відсутніх значень, введення некоректних даних й т.і. Найбільш повний перелік основних недоліків медичних даних надано у [3]. Автори [4] розрізняють два типи проблем якості даних: неповні дані (відсутні та зсунені) і некоректні дані. В дослідженні [5] проблемами, що ускладнюють отримання якісних прогнозів станів пацієнтів реанімаційного відділення, визначені висока розмірність даних, їх незбалансованість та часова асинхронізація. В статті [6] також досліджуються дані пацієнтів реанімаційного відділення та основною проблемою якісного прогнозування майбутніх станів визначені відсутні дані. Проведений авторами [7] огляд провідних медичних журналів показав, що відсутні дані є звичайним явищем в рандомізованих дослідженнях з результатами, отриманими від пацієнтів. Відсутні значення також є загальною

проблемою в дослідженнях з поздовжніми, просторовими, багаторівневими або багатовимірними даними [8]. Іншою складністю медичних даних є їх різнорідність. Різнорідні медичні дані характеризуються неоднорідністю, незбалансованістю та зсувом значень в той чи інший бік відносно досліджуваної патології, що, власне і викликає труднощі для предиктивної аналітики. Для неоднорідних даних з відсутніми елементами можна практикувати різні підходи, але постійно є ризик застосування неефективної методики, що значно ускладнює отримання вагомих результатів [9]. Очевидно, що моделі, отримані при використанні даних незадовільної якості, будуть функціонувати неналежним чином. Таким чином, актуальною задачею є пошук підходу, який дозволить обирати найкращу модель для обробки різнорідних медичних даних, даних з відсутніми значеннями.

Метою роботи є розробка універсального підходу до обробки різнорідних даних з відсутніми значеннями та оцінка його ефективності.

Основна частина. Пропонований підхід до обробки різнорідних даних з відсутніми значеннями дозволяє врахувати механізми відсутності, тип і метод обробки і містить п'ять основних етапів (рис. 1).

На першому етапі проводиться якісна оцінка відсутніх даних. Визначаються типи змінних та механізм появи відсутніх значень. Другий етап містить кількісну оцінку відсутніх даних за результатами якої приймається рішення щодо відновлення даних або повного видалення наборів даних з відсутніми значеннями. На третьому етапі обирається метод обробки відсутніх даних. Детальний опис можливих стратегій надано у [10]. Четвертий етап містить перевірки зменшення набору даних після видалення спостережень або процедур оцінки чутливості після закінчення відновлення. На останньому етапі проводиться оцінка ефективності використаного методу обробки відсутніх даних з використанням формалізованих параметрів точності і мір ефективності відновлення відсутніх даних.

Набори даних. Для дослідження переваг запропонованого підходу до опрацювання відсутніх даних були використані три різних набори даних.

Перший набір містить 6 вхідних змінних (дані перебігу вагітності) та вихідну змінну (стан новонародженого). Набір містить 186 спостережень, з яких 81 з діагнозом "патологія".

Другий набір даних містить клінічні дані та дані мамограм. Набір містить 5 вхідних змінних: 1 кількісну та 4 порядкові, та вихідну змінну – відсутність або наявність злоякісного новоутворення молочної залози.



Рис. 1. Запропонована стратегія обробки різнорідних наборів даних з відсутніми значеннями

Таблиця 1

Інформація про досліджувані набори даних

Набір даних	Кількість спостережень	Кількість змінних	Типи змінних	Відсутні дані
Дані перебігу вагітності 12-38 тижнів вагітності	186	6	числові, порядкові, бінарні	так
Клінічні дані та результати мамограми пацієнток [11]	961	5	числові, порядкові, бінарні	так
Дані діагностики зображень одиночної протонної комп'ютерної томографії серця [12]	267	22	бінарні	ні

Третій набір містить дані діагностики зображень одиночної протонної комп'ютерної томографії серця (SPECT). Вихідна змінна поділяється на два класи: нормальні зображення і зображення з патологією. Дані складаються з оброблених зображень SPECT (пацієнтів). Дані були додатково оброблені для отримання 22 бінарних ознак зображення – вхідних змінних.

Процедура порівняння складалася з наступних етапів (рис. 2): перевірка набору даних на відсутні дані та, за необхідності, введення до 10% відсутніх значень для проведення дослідження, визначення механізму відсутності; визначення методу опрацювання відсутніх даних за запропонованою технологією та з використанням контрольної моделі; класифікація даних; оцінка результатів; порівняльний аналіз отриманих результатів.



Рис. 2. Процедура порівняння підходів до опрацювання різнорідних даних з відсутніми значеннями

В обраних наборах найбільший відсоток відсутніх даних спостерігається в наборі 1 (до 40%). Середній відсоток – в наборі 2 (понад 10%). Набір 3 не містив відсутні дані, отже, для експерименту, до нього штучно введено до 10% відсутніх значень. В якості контрольної моделі для обробки відсутніх значень використано модель відновлення медіаною прилеглих значень. Змінні, відновлення яких не відповідають відновленню медіаною прилеглих значень, залишені відсутніми.

В результаті використання контрольної та запропонованої в роботі моделей отримані два повних набори даних. Кожен з наборів випадковим чином розділено на навчальний набір (82%) та тестовий набір (18%). Класифікацію проведено з використанням алгоритму Random Tree. На підставі кількості помилок класифікації першого та другого роду, кількості істинно позитивних та істинно негативних спостережень розраховані коефіцієнт помилок класифікації та критерії ефективності класифікації для контрольної та розробленої моделі: чутливість, специфічність, точність.

Результати розрахунків критеріїв та коефіцієнту помилок класифікації для трьох досліджуваних наборів даних наведені в табл. 2. Найбільша розбіжність в параметрах якості отримана при відновленні набору даних 1, що містив велику кількість відсутніх значень.

Таблиця 2
Метрики якості для трьох наборів даних

Модель ^{набір}	CER (%)	Чутливість (%)	Специфічність (%)	Точність (%)
Контрольна ¹	45	62.5	52	54.54
Запропонована ¹	27	70	76.9	72.7
Контрольна ²	32	73.19	63.88	68.02
Запропонована ²	27	76.76	67.12	72.67
Контрольна ³	27	87.8	23	72.1
Запропонована ³	25	87.8	30	72.2

За результатами розрахунків, запропонований підхід дає достатньо високі значення показників чутливості, специфічності, точності та мінімальний коефіцієнт помилок класифікації, що є дуже цінним при відновленні відсутніх значень, та істотно покращує властивості даних, що використовуються в подальшому аналізі.

Висновки. Представлено узагальнений підхід до обробки різнорідних даних з відсутніми значеннями, який враховує множину типів відсутніх значень, множину механізмів відсутності даних та множину методів опрацювання даних з відсутніми значеннями.

Проведена оцінка ефективності показала, що даний підхід дає суттєве покращення показників чутливості, специфічності, точності та мінімальний коефіцієнт помилок класифікації. Варто відзначити, що для доведення ефективності запропонованої технології потрібно провести ще декілька серій експериментів з різними наборами даних та різними контрольними моделями. Подальші дослідження мають бути направлені на більш детальний підбір моделей опрацювання даних і організацію зворотного зв'язку між реальними, отриманими з інших клінічних джерел, і змодельованими результатами.

Список літератури:

1. School of Medicine: Stanford Medicine 2017 Health Trends Report Harnessing the Power of Data in Health, 2017. Режим доступу: <https://med.stanford.edu/content/dam/sm/sm-news/documents/StanfordMedicineHealthTrendsWhitePaper2017.pdf> (дата звернення 30.08.2018).
2. Аврун О.Г. Сучасні інтелектуальні технології функціональної медичної діагностики: монографія / О.Г. Аврун, С.В. Бодяньський, М.В. Калашник, В.В. Семенець, В.О. Філатов. – Харків: ХНУРЕ, 2018. – 236 с.
3. Esfandiari N. Knowledge discovery in medicine: Current issue and future trend / N. Esfandiari, M.R. Babavalian, A.M.E. Moghadam, V.K. Tabar // Expert Systems with Applications. – 2014. – Vol. 41 (9). – P. 4434-4463.
4. Wu X. Top 10 algorithms in data mining / X. Wu, V. Kumar, J.R. Quinlan, J. Ghosh, Q. Yang, H. Motoda, G.J. McLachlan, A. Ng, B. Liu, S.Y. Philip, Z.H. Zhou // Knowledge and information systems. – 2008. – Vol. 14 (1). – P. 1-37.
5. Liu J. Mortality prediction based on imbalanced high-dimensional ICU big data / J. Liu, X.X. Chen, L. Fang, J.X. Li, T. Yang, Q. Zhan, K. Tong, Z. Fang // Computers in Industry. – 2018. – Vol. 98. – P. 218-225.
6. Nagrebetsky A. Missing Data and ICU Mortality Prediction: Gone But Not to Be Forgotten. / A. Nagrebetsky, E.A. Bittner // Critical care medicine. – 2017. – Vol. 45 (12). – P. 2108-2109.
7. Scharfstein D. Final Report: Sensitivity Analysis Tools for Randomized Trials with Missing Data, 2017. – 112 p.
8. Ringham B.M. On the distribution of summary statistics for missing data / B.M. Ringham, S.M. Kreidler, K.E. Muller and D.H. Glueck // Communications in Statistics-Theory and Methods, 2018. – P. 1-17.
9. Magnani M. Techniques for dealing with missing data in knowledge discovery tasks. [Електронний ресурс] / Magnani M. // Режим доступу [www URL: http://magnanim. web. cs. unibo. it/index. html](http://www.magnanim.web.cs.unibo.it/index.html) (дата звернення 18.09.2018).
10. Skarga-Bandurova I. Strategy to Managing Mixed Datasets with Missing Items / I. Skarga-Bandurova, T. Biloborodova., Y. Dyachenko // International Conference on Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems. Springer, Cham. – 2018. – P. 608-620.
11. Elter M. The prediction of breast cancer biopsy outcomes using two CAD approaches that both emphasize an intelligible decision process / M. Elter, R. Schulz-Wendtland, T. Wittenberg // Medical Physics. – 2007. – Vol. 34 (11). – P. 4164-4172.
12. UCI Machine Learning Repository. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [www URL: https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/SPECT+Heart](http://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/SPECT+Heart) (дата звернення 30.07.2018).

References:

1. School of Medicine: Stanford Medicine 2017 Health Trends Report Harnessing the Power of Data in Health (2017), available at: <https://med.stanford.edu/content/dam/sm/sm-news/documents/StanfordMedicineHealthTrendsWhitePaper2017.pdf> (accessed 30 Aug 2018).
2. Avrunin, O.H., Bodianskyi, Ye.V., Kalashnyk, M.V., Semenets, V.V. and Filatov, V.O. (2018), *Suchasni intelektualni tekhnologii funktsionalnoi medychnoi diahnostryky*, KhNURE, Kharkiv, 236 p.
3. Esfandiari, N., Babavalian, M.R., Moghadam, A.M.E. and Tabar, V.K. (2014), "Knowledge discovery in medicine: Current issue and future trend", *Expert Systems with Applications*, Vol. 41 (9), pp. 4434-4463.
4. Wu, X., Kumar, V., Quinlan, J.R., Ghosh, J., Yang, Q., Motoda, H., McLachlan, G.J., Ng, A., Liu, B., Philip, S.Y. and Zhou, Z.H. (2008), "Top 10 algorithms in data mining", *Knowledge and information systems*, Vol. 14 (1), pp. 1-37.
5. Liu, J., Chen, X.X., Fang, L., Li, J.X., Yang, T., Zhan, Q., Tong, K. and Fang, Z. (2018), "Mortality prediction based on imbalanced high-dimensional ICU big data", *Computers in Industry*, Vol. 98, pp. 218-225.
6. Nagrebetsky, A. and Bittner, E.A. (2017), "Missing Data and ICU Mortality Prediction: Gone But Not to Be Forgotten", *Critical care medicine*, Vol. 45 (12), pp. 2108-2109.
7. Scharfstein, D. (2017), *Sensitivity Analysis Tools for Randomized Trials with Missing Data*, Final Report, 112 p.
8. Ringham, B.M., Kreidler, S.M., Muller, K.E. and Glueck, D.H. (2018), "On the distribution of summary statistics for missing data", *Communications in Statistics-Theory and Methods*, pp. 1-17.
9. Magnani, M. (2004), "Techniques for dealing with missing data in knowledge discovery tasks", available at: <http://magnanim.web.cs.unibo.it/index.html>, (accessed 18 Sept 2018).
10. Skarga-Bandurova, I., Biloborodova, T., and Dyachenko, Y. (2018), "Strategy to Managing Mixed Datasets with Missing Items", *Int. Conf. on Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems*, Springer, pp. 608-620.
11. Elter, M., Schulz-Wendland, R. and Wittenberg, T. (2007), "The prediction of breast cancer biopsy outcomes using two CAD approaches that both emphasize an intelligible decision process", *Medical Physics*, Vol. 34 (11), pp. 4164-4172.
12. UCI Machine Learning Repository, available at: <https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/SPECT+Heart> (accessed 30.07. 2018).

Статтю представив д.т.н., проф. Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" С.Ю. Леонов

Надійшла (received) 13.08.2018

Biloborodova Tetyana, senior lecturer
Volodymyr Dahl East Ukrainian National University
59-a Central avenue, Severodonetsk, Luhansk region, Ukraine, 93400
Tel: (064) 522-89-97, e-mail: beloborodova.t@gmail.com
ORCID ID: 0000-0001-7561-7484

Skarga-Bandurova Inna, Dr. Sci. Tech., Assoc. Professor, Professor
Volodymyr Dahl East Ukrainian National University
59-a Central avenue, Severodonetsk, Luhansk region, Ukraine, 93400
Tel: (064) 522-89-97, e-mail: skarga_bandurova@ukr.net
ORCID ID: 0000-0003-3458-8730

УДК 004.832.34+303.442.3

Комплексний підхід до обробки різномірних медичних даних з відсутніми значеннями / Білобородова Т.О., Скарга-Бандурова І.С. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2018. – № 42 (1318). – С. 180 – 187.

Показана необхідність врахування змішаних наборів даних з відсутніми значеннями. Запропоновано узагальнений підхід до обробки різномірних медичних даних з урахуванням типу даних, механізму їх відсутності. Проведене опрацювання трьох різних наборів даних з використанням запропонованого підходу та контрольної моделі. Надано порівняння ефективності опрацювання даних. Іл.: 2. Табл.: 2. Бібліогр.: 12 назв.

Ключові слова: різномірні медичні дані; відсутні значення; обробка; контрольна модель.

УДК 004.832.34+ 303.442.3

Комплексный подход к обработке разнородных медицинских данных с отсутствующими значениями / Белобородова Т.А., Скарга-Бандурова И.С. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2018. – № 42 (1318). – С. 180 – 187.

Показана необходимость учета смешанных наборов данных с отсутствующими значениями. Предложен обобщенный подход к обработке разнородных медицинских данных с учетом типа данных, механизма их отсутствия. Проведена обработка трех различных наборов данных с использованием предложенного подхода и контрольной модели. Предоставлено сравнения эффективности обработки данных. Ил.: 2. Табл.: 2. Библиогр.: 12 назв.

Ключевые слова: разнородные медицинские данные; отсутствующие значения; обработка; контрольная модель.

UDC 004.67:618.3

A Comprehensive Approach for Processing Heterogeneous Medical Data with Missing Values / Biloborodova T.O., Skarga-Bandurova I.S. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2018. – №.42 (1318). – P. 180 – 187.

The need to take into account mixed data sets with missing values is shown. A generalized approach to the processing of heterogeneous medical data is proposed, taking into account the type of data, the mechanism of their absence. Three different sets of data have been processed using the proposed approach and control model. The comparison of the efficiency of data processing is given. Figs.: 2. Tabl.: 2, Refs.: 12 titles.

Keywords: heterogeneous medical data; missing values; data processing; control model.

Д. О. ЗУБАРЕВ, магістр, СНУ ім. В. Даля, Сєверодонецьк,
І. С. СКАРГА-БАНДУРОВА, д-р техн. наук, доц., зав.каф., СНУ
ім. В. Даля, Сєверодонецьк

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ НАВЧАННЯ CNN ЗА ПРИНЦИПОМ "ВЧИТЕЛЬ-УЧЕНЬ" З ВИКОРИСТАННЯМ НЕПІДГОТОВЛЕНОГО IMAGE-DATASET

Штучні нейронні мережі з кожним роком розширюють спектр існуючих та потенційних сфер використання. Якість навчання штучних нейронних мереж є основою якості їх подальшого функціонування. Стаття присвячена аналізу ефективності навчання штучних нейронних мереж класу CNN для розпізнавання непідготовленого набору зображень (Image-Dataset) за принципом "вчитель-учень", де у ролі вчителя виступає попередньо навчена діюча штучна нейронна мережа CNN-1, що завдає алгоритм навчання, а учнем є непідготовлена штучна нейронна система CNN-2. Доведено, що CNN-1 є більш ефективною для пошуку великого спектра об'єктів на зображеннях, а CNN-2 найкраще працює для вузько направлених надточних пошуків завданих об'єктів. Іл.: 7. Бібліогр.: 22 назв.

Ключові слова: штучна нейронна мережа; CNN; зображення; Image-Dataset.

Опис проблеми. Штучні нейронні мережі та мережі нервових клітин живого організму – це обчислювальні системи з надвеликою кількістю паралельно функціонуючих процесорів з певною множиною зв'язків. Штучний аналог біологічних нейронних мереж є значно простішим, але здатен переймати деякі важливі ознаки функціонування мозку живої істоти: навчатися згідно з досвідом, знаходити корисні дані з надлишкової інформації, робити узагальнення, тощо. Сфери використання штучних нейронних мереж різноманітні: розпізнавання рукописних текстів, розпізнавання мовних команд, мовне введення тексту в комп'ютер, розпізнавання осіб, ідентифікація осіб за відбитками пальців, розпізнавання автомобільних номерів, асоціативний пошук інформації, фільтрація і блокування спаму, розпізнавання captcha, оптимізація режимів виробничого процесу та інші. Штучні нейронні мережі, з їх здатністю розпізнавати раціональне ядро із масиву ускладнених або недостовірних даних, можуть використовуватися для пошуку моделей та виявлення тенденцій, що занадто складні, щоб бути одразу поміченими людьми або комп'ютерною технікою. Підготовлену, тобто навчену, штучну нейронну мережу можна розглядати у якості

"експерта" по тим категоріям інформації, що були їй надані для аналізу. Така штучна нейронна мережа потім може бути використана для вивчення нових ситуацій, щоб відповісти на питання "що-якщо" при моделюванні тих чи інших теоретичних та прикладних гіпотез [1]. Властивістю нейронних мереж також є те, що вони можуть змінювати поведінку в залежності від навколишнього середовища. Навчена нейронна мережа є більш стійкою до деяких викривлень вхідних даних, що дає можливість коректно розпізнавати образи та закономірності.

Попри широке застосування, штучні нейронні мережі поки що не можуть гарантувати абсолютну точність, навіть при їх вірному функціонуванні [2]. Інша існуюча проблема полягає в тому, що штучні мережі часто дуже великі за глибиною і шириною і містять велику кількість параметрів [3]. Окрім того, ніхто не спроможний пояснити, яким саме чином вони вирішують задачі [2, 4]. Оскільки штучні нейронні мережі є дуже складними моделями, що враховують надзвичайно велику кількість різноманітних параметрів для моделювання складних відносин, котрі містяться у надвеликих об'ємах даних, здебільшого внутрішні представлення результатів є настільки складними, що їх навіть неможливо проаналізувати, окрім деяких найлегших задач, але аналіз таких даних немає великого сенсу. Це призвело до швидкозростаючої області досліджень з пошуку більш компактних та ефективних моделей.

Аналіз літератури. Згідно з [5] значне поліпшення продуктивності може бути досягнуте різними способами. Так, автори [6] пропонують збільшення тренувальних даних з різними типами варіацій – наприклад, з кількома видами шумів на різних рівнях штучної мережі замість використання попередньо очищених даних для навчання моделей. Для покращення роботи мереж, що використовуються для аналізу зображень та відео, ефективними способами покращення продуктивності є кластеризація [7] та сегментація [8, 9]. В роботі [5] запропоновано компактні моделі що формуються шляхом дистилляції знань або стиснення моделей. Технології поєднання різних функцій на входах, їх спільне використання та об'єднання різних архітектур розглядалися в роботі [10]. Компактні моделі або мережі учнів навчаються на виходах вчителів, використовуючи критерії навчання, що мінімізують різницю між розподілами учнів та вчителів. Ця технологія показала гарні результати в різних умовах – повністю керованому середовищі [11], напівкерованому середовищі [12], послідовному тренінгу [13], дозволяючи навчати мережі учнів працювати краще, ніж в умовах, коли аналогічні моделі тренувалися з нуля. Разом з тим, варто відзначити, що хоча ці методики ефективно використовуються для навчання, часто трапляється, що вони не можуть бути розгорнуті для обробки поточних

даних у режимі реального часу через обмеження, які вони становлять в термінах затримки та обчислень, особливо для непідготовлених систем [14]. Таким чином, з огляду на те, що якість підготовки штучних нейронних мереж є основою їх подальшого функціонування, удосконалення існуючих та пошук нових методик більш ефективного процесу їх навчання залишається досить актуальним завданням.

Мета. Аналіз ефективності навчання штучних нейронних мереж класу CNN розпізнаванню непідготовленого Image-Dataset за допомогою принципу "вчитель-учень", де у ролі вчителя виступає вже навчена діюча штучна нейронна мережа, що завдає алгоритм навчання, а учнем є непідготовлена штучна нейронна система.

Матеріали і результати дослідження. Існує велика кількість різних типів штучних нейронних мереж, котрі відрізняються принципами функціонування, в залежності від яких штучні нейронні мережі вирішують певну окреслену низку задач та проблем. Не вдаючись у типологізацію, для нашого дослідження візьмемо згорткову нейронну мережу (Convolutional Neural Network, або CNN), що використовується для ефективного розпізнавання зображень. Згорткова нейронна мережа – це спеціальна архітектура штучних нейронних мереж, яка використовує різновид багат шарових перцептронів, створений так, щоб вимагати використання мінімального обсягу попередньої обробки. Вона складається з шарів входу та виходу, а також з кількох прихованих шарів. Приховані шари складаються зі згорткових шарів, шарів нормалізації, повноз'єднаних шарів та агрегувальних шарів [6].

Перед початком практичного використання штучної нейронної мережі потрібно її навчити. Безпосередньо сам процес навчання полягає у налаштуванні її внутрішніх параметрів під конкретне завдання. Процес навчання здійснюється на навчальній вибірці. Навчальна вибірка включає вхідні значення і відповідні їм вихідні значення Dataset. В ході навчання нейронна мережа знаходить певні залежності вихідних полів від вхідних. Оскільки алгоритм роботи штучної нейронної системи є ітеративним, тобто таким, що повторюється, його кроки називаються епохами або циклами. Епоха – це одна ітерація в процесі навчання, що включає пред'явлення всіх прикладів з навчальної множини і, можливо, перевірку якості навчання на контрольному Dataset [15].

Інструментарій. В дослідженнях використовувалась мова програмування Python із залученням наступних модулів: os, re, argparse, cv2, numpy, time, math та бібліотека Keras [16]. Для визначення об'єктів на зображенні ми використовували наступні технології: OpenCV 3.4.3 [17], Deep neural network (DNN) module from OpenCV, Caffe prototxt file,

MobileNet SSD [18], Python script for downloads images from Google [19], Keras CNN.

Характеристики CNN-"вчитель" (далі CNN-1). В якості CNN-1 обрано глибоку нейронну мережу DNN з opencv. Надалі до неї було під'єднано вже навчену модель Caffe model від Tensorflow, яка визначає до 20 запрограмованих об'єктів на вхідному зображенні. Для виявлення об'єктів на зображенні, було об'єднано мереживну архітектуру MobileNet і структуру єдиного детектора (SSD), внаслідок чого отримано швидкий і ефективний метод глибокого навчання для виявлення об'єктів.

Характеристики CNN-"учень" (далі CNN-2). Для створення CNN-2 була використана бібліотека Keras. Процес побудови згорткової нейронної мережі відбувається в чотири етапи: згортка, об'єднання, оптимізація, повне об'єднання. Формула згортки (конволюції), що демонструє "рух" ядра w^l по вхідному зображенню або карті ознак y^{l-1} для CNN-2 виглядає наступним чином [20]:

$$x_{ij}^l = \sum_{a=-\infty}^{+\infty} \sum_{b=-\infty}^{+\infty} \omega_{ab}^l \cdot y_{(i-s-a)(j-s-b)}^{l-1} + b^l,$$

$$\forall i \in (0, \dots, N), \forall j \in (0, \dots, M),$$

де підрядкові індекси i, j, a, b – це індекси елементів в матрицях; s – величина кроку конволюції; ℓ та $\ell - 1$ – індекси шарів мережі; $x^{\ell-1}$ – вихід певної попередньої функції або вхідне зображення мережі; $y^{\ell-1}$ – це $x^{\ell-1}$ після проходження функції активації; w^l – ядро згортання; b^l – зміщення; x^l – результат операції конволюції. Операції проходять роздільно для кожного елемента i, j матриці мережі x^l розмірність якої N, M .

Графічне відображення побудованої CNN-2 представлено на рис. 1.

Вхідні дані для створення Image-Dataset:

– keyword – обов'язковий параметр. Ключове слово, за яким відбувається створення Image-Dataset та навчання CNN-2. Keyword має входити в діапазон допустимих елементів, тобто тих, що вміє розпізнавати CNN-1;

– limit – максимальна кількість результатів пошуку зображень;

– confidence – межа мінімального відсоткового відношення, при якому CNN-1 буде визначати – навчати чи ні CNN-2.

Формування Image-Dataset. Навчальна вибірка була поділена на два не тотожних типи Image-Dataset:

1) навчальний Image-Dataset-L1 та навчальний Image-Dataset-L2;

2) тестовий Image-Dataset-T, за допомогою яких відбувалося безпосереднє навчання CNN-2 та перевірка її адекватності.

До вибірки Image-Dataset-L1 увійшли відібрані CNN-1 та обрізані нею за допомогою сегментації, згідно з вказаними параметрами, зображення потрібного елементу у форматі .jpg у кількості 100 файлів, з яких перед початком навчання видалялись пошкоджені. В процесі сегментації зображення, що обробляється, розділяється на фрагменти за допомогою змінної маски, що може рухатися з довільним кроком від 1 пікселя до 32, в результаті чого підсумковий набір може містити різну кількість фрагментів [8, 21]. Кожен з отриманих фрагментів є зображенням, яке CNN може віднести до того чи іншого класу. Підсумкове зображення може бути перефарбоване відповідно до результатів розпізнавання, як показано на рис. 2. Як правило, якість сегментації залежить від якості навчання мережі.

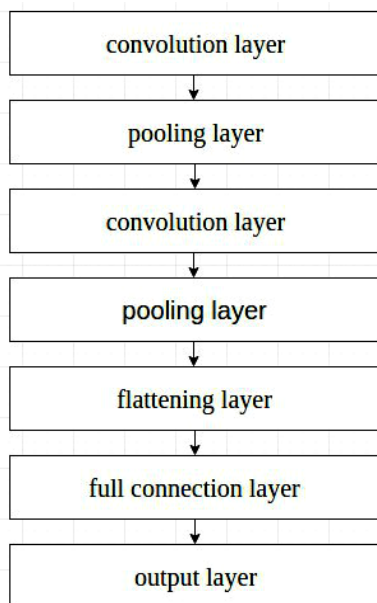
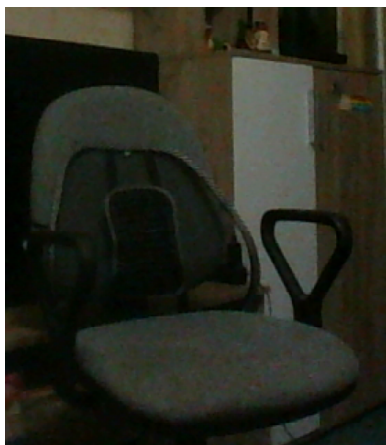


Рис. 1. Архітектура CNN-2

Сегментація завданого елемента відбувалася за допомогою алгоритму семантичної сегментації [21]. До вибірки Image-Dataset-L2 увійшли відібрані CNN-1 не обрізані зображення, що містили потрібний елемент, у форматі .jpg у кількості 100 файлів.

Кількість початкових зображень Image-Dataset-T у форматі .png становила 100. Пошкоджених та обрізаних файлів у цій вибірці не було. Кількість зображень з потрібним елементом становила 5.



a



б

Рис. 2 (а) – Початкове зображення, (б) – Результат сегментації зображення штучною нейронною мережею

Навчання CNN-2 за допомогою CNN-1 з використанням Image-Dataset-L1 та Image-Dataset-L2

Як було вказано вище, одна епоха являє собою один крок в навчанні штучної нейронної мережі. Тобто, коли CNN навчається на всіх навчальних зразках за один прохід, це означає, що одну епоху закінчено. Для отримання показових результатів процес навчання повинен складатися з кількох епох. Для навчання CNN-2 було обрано 25 епох в обох випадках. У результаті навчання CNN-2 за допомогою CNN-1 отримано наступні результати (рис. 3).

За 25 епох навчання CNN-2 з використанням Image-Dataset-L1 тривалість кожної коливалася від 117 до 160 секунд, при тривалості одного кроку 1 – 2 секунди; сума помилок, що розраховувалася згідно

[22], для кожного циклу становила від 0,2250 до 0,0406 на останньому циклі; точність розпізнавання коливалася від 93,41% на першому циклі до 99,16% на останньому циклі: Графічне представлення результатів навчання CNN-2 з використанням Image-Dataset-L1 надано на рис. 4 та рис. 5.

```

Epoch 1/25
82/82 ----- 126s 2s/step - loss: 0.2250 - acc: 0.9341
Epoch 2/25
82/82 ----- 124s 2s/step - loss: 0.2132 - acc: 0.9421
Epoch 3/25
82/82 ----- 122s 1s/step - loss: 0.1788 - acc: 0.9398
Epoch 4/25
82/82 ----- 121s 1s/step - loss: 0.1528 - acc: 0.9478
Epoch 5/25
82/82 ----- 119s 1s/step - loss: 0.1383 - acc: 0.9428
Epoch 6/25
82/82 ----- 117s 1s/step - loss: 0.1224 - acc: 0.9512
Epoch 7/25
82/82 ----- 118s 1s/step - loss: 0.1367 - acc: 0.9520
Epoch 8/25
82/82 ----- 120s 1s/step - loss: 0.0972 - acc: 0.9607
Epoch 9/25
82/82 ----- 122s 1s/step - loss: 0.1047 - acc: 0.9619
Epoch 10/25
82/82 ----- 123s 1s/step - loss: 0.0960 - acc: 0.9653
Epoch 11/25
82/82 ----- 120s 1s/step - loss: 0.0926 - acc: 0.9680
Epoch 12/25
82/82 ----- 123s 1s/step - loss: 0.0849 - acc: 0.9665
Epoch 13/25
82/82 ----- 126s 2s/step - loss: 0.0687 - acc: 0.9767
Epoch 14/25
82/82 ----- 122s 1s/step - loss: 0.0704 - acc: 0.9748
Epoch 15/25
82/82 ----- 121s 1s/step - loss: 0.0756 - acc: 0.9783
Epoch 16/25
82/82 ----- 126s 2s/step - loss: 0.0581 - acc: 0.9832
Epoch 17/25
82/82 ----- 131s 2s/step - loss: 0.0616 - acc: 0.9802
Epoch 18/25
82/82 ----- 129s 2s/step - loss: 0.0539 - acc: 0.9844
Epoch 19/25
82/82 ----- 141s 2s/step - loss: 0.0552 - acc: 0.9855
Epoch 20/25
82/82 ----- 131s 2s/step - loss: 0.0444 - acc: 0.9878
Epoch 21/25
82/82 ----- 148s 2s/step - loss: 0.0506 - acc: 0.9870
Epoch 22/25
82/82 ----- 160s 2s/step - loss: 0.0561 - acc: 0.9859
Epoch 23/25
82/82 ----- 160s 2s/step - loss: 0.0425 - acc: 0.9897
Epoch 24/25
82/82 ----- 157s 2s/step - loss: 0.0420 - acc: 0.9916
Epoch 25/25
82/82 ----- 130s 2s/step - loss: 0.0406 - acc: 0.9916

```

Рис. 3. Результати навчання CNN-2 з використанням Image-Dataset-L1

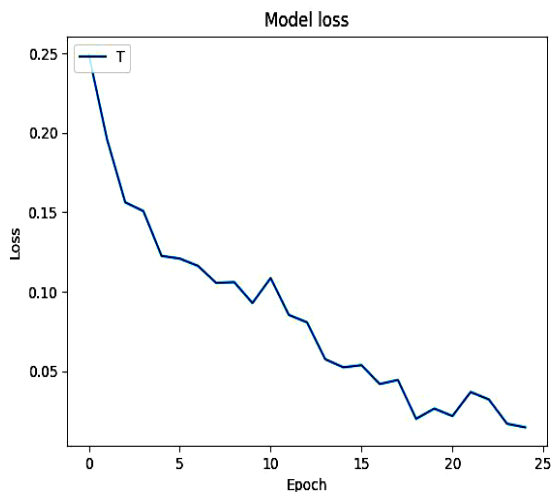


Рис. 4. Сума помилок для кожної епохи навчання з використанням Image-Dataset-L1

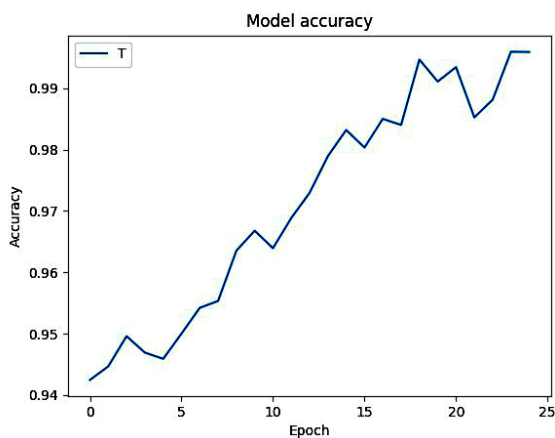


Рис. 5. Точність розпізнавання заданого об'єкта для кожної епохи з використанням Image-Dataset-L1

Навчання CNN-2 з використанням множини Image-Dataset-L2 пройшло з гіршими результатами за навчання з використанням множини Image-Dataset-L1, що видно з графіків на рис. 6 та рис. 7. Точність розпізнавання склала 71.39 % проти 99.16% у першому випадку.

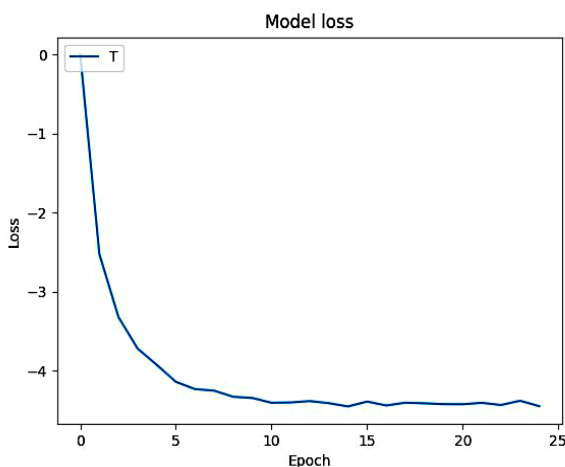


Рис. 6. Сума помилок для кожної епохи навчання з використанням Image-Dataset-L2

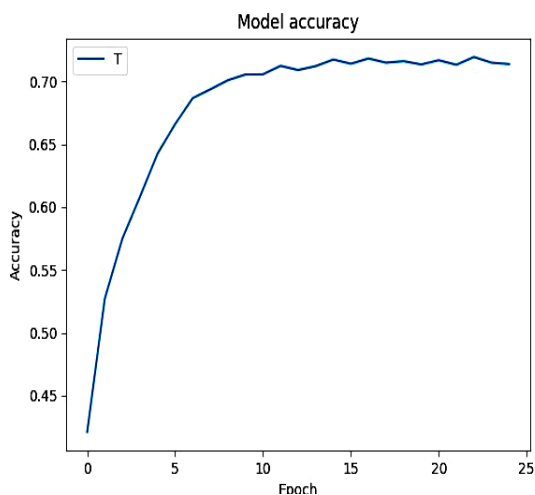


Рис. 7. Точність розпізнавання заданого об'єкта для кожної епохи з використанням Image-Dataset-L2

Тестування на адекватність роботи CNN-2 за допомогою Image-Dataset-T.

Заключним етапом дослідження було тестування навченої CNN-2 для випадків Image-Dataset-L1 та Image-Dataset-L2 за допомогою єдиного

для обох випадків Image-Dataset-T. Для випадку Image-Dataset-L1 навчена CNN-2 показала наступний результат:

```
File name: 2.jpg. Result: Chair
File name: s19UInvW0xj9VJG8kqIz3Q.png. Result: Chair
File name: tryumo-1-everest.jpg. Result: Chair
File name: 3.jpeg. Result: Chair
File name: shkaf-3-h-dvernij-nensi-roza.jpg. Result: Chair
File name: dakas-trymo-viktoriya_1-640x480.jpg. Result: Chair
File name: фв.jpg. Result: Chair
File name: 4.JPG. Result: Chair
Count chairs: 8
Count not chairs: 92
```

Тобто, CNN-2 визначила вірні п'ять зображень завданого елементу, проте зображення ще на трьох фото також класифікувала, як завданий елемент.

Для випадку Image-Dataset-L2 навчена CNN-2 показала наступний тестовий результат:

```
True elements: 44
False elements: 56
```

Незважаючи на те, що через надмірну кількість змінних параметрів мережі не можливо побачити внутрішній процес отримання остаточного результату, варто зазначити, що значний вплив на похибки справив невеликий обсяг Image-Dataset.

Висновки. У результаті проведених експериментів в рамках заявленої тематики було доведено, що CNN-1 є більш ефективною для пошуку великого спектру об'єктів на зображеннях, CNN-2 є ефективною для вузько направлених надточних пошуків завданих об'єктів. При подальшій розробці варто перевірити, які тестові результати видасть CNN-2, навчена з використанням Image-Dataset з великим об'ємом, а також спробувати синхронно навчити CNN-3, CNN-4 etc. за іншими не тотожними параметрами.

Список літератури:

1. *Raghava Sh.* Neural Network / *Sh. Raghava*, Amazon Digital Services LLC, 2016. – 105 p.
2. *Aggarwal, C.C.* Neural Networks and Deep Learning / *C.C. Aggarwal*. – Springer International Publishing, 2018. – 512 p.
3. *He K.* Deep residual learning for image recognition / *K. He, X. Zhang, S. Ren, J. Sun* // Proc. of IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016. – P. 770-778.
4. *Keinert J.* Design of Image Processing Embedded Systems Using Multidimensional Data Flow / *J. Keinert, J. Teich*, Springer, 2011. – 337 p.

5. *Fukuda T.* Efficient Knowledge Distillation from an Ensemble of Teachers / *T. Fukuda, M. Suzuki, G. Kurata, S. Thomas, J. Cui, B. Ramabhadran* // Proc. Interspeech 2017, August 20–24, Stockholm, Sweden, 2017. – P. 3697-3701.
6. *Aghdam H.H.* Guide to Convolutional Neural Networks: A Practical Application to Traffic-Sign Detection and Classification / *H.H. Aghdam, E.J. Heravi*, New York: Springer, USA, 2017. – 299 p.
7. *Madasamy B.* Improving classification Accuracy of Neural Network through Clustering Algorithms / *B. Madasamy, J. Tamilselvi* // International Journal of Computer Trends and Technology (IJCTT). – 2013. – Vol. 4, Issue 9. – Режим доступу: [www. URL: http://www.ijcttjournal.org/Volume4/issue-9/IJCTT-V4I9P151.pdf](http://www.ijcttjournal.org/Volume4/issue-9/IJCTT-V4I9P151.pdf), (accessed 15.10.2018).
8. *Advances in Image and Video Segmentation* / Zhang, Y.-J. (Ed.), IRM Press, 2006. – 473 p.
9. *Ngan K.N.* Video Segmentation and Its Applications / *K.N. Ngan, H. Li* (Eds.), Springer, 2011. – 179 p.
10. *Howard A.G.* Mobilenets: Efficient convolutional neural networks for mobile vision applications / *A.G. Howard, M. Zhu, Bo Chen, D. Kalenichenko, W. Wang, T. Weyand, M. Andreetto, and H. Adam* // arXiv: 1704.04861, 2017, (accessed 15.12.2018).
11. *Geras K.J.* Blending LSTMs into CNNs / *K.J. Geras, A.-R. Mohamed, R. Caruana*, et al // ICLR Workshop, 2016.
12. *Li J.* Learning small-size DNN with output-distribution-based criteria / *J. Li, R. Zhao, J.-T. Huang, and Y. Gong* // Proc. Interspeech. – 2014. – P. 1910–1914.
13. *Wong J.H.M.* Sequence student-teacher training of deep neural networks / *J.H.M Wong and M.J.F. Gales* // Proc. Interspeech. – 2016. – P. 2761–2765.
14. *Zhang C.* Understanding deep learning requires rethinking generalization / *C. Zhang, S. Bengio, M. Hardt, B. Recht and O. Vinyals* // Proc. of International Conference on Learning Representations. – 2017.
15. *Sewak M.* Practical Convolutional Neural Networks / *M. Sewak, K. Rezaul and P. Pujari*, Packt Publishing, 2018. – 218 p.
16. Keras Documentation [Електронний ресурс] – Режим доступу: [www. URL: https://keras.io/preprocessing/image/](https://keras.io/preprocessing/image/), accessed 21.09.2018, (accessed 21.09.2018).
17. Opensv [Електронний ресурс] – Режим доступу: URL: <https://github.com/opencv/opencv/tree/master/samples/dnn>, (accessed 21.09.2018).
18. MobileNet SSD [Електронний ресурс] – Режим доступу: [www. URL: https://github.com/chuanqi305/MobileNet-SSD](https://github.com/chuanqi305/MobileNet-SSD), (accessed 15.10.2018).
19. Python Script to download hundreds of images from 'Google Images' [Електронний ресурс] – Режим доступу: [www. URL: https://github.com/hardikvasa/google-images-download](https://github.com/hardikvasa/google-images-download), (accessed 21.09.2018).
20. *Калинин С.* Сверточная сеть на Python [Електронний ресурс] / *С. Калинин*. – Режим доступу: [www. URL: https://habr.com/company/ods/blog/344008/](https://habr.com/company/ods/blog/344008/), (accessed 21.09.2018).
21. *Advances in Image Segmentation* / P.-G.P. Ho (Ed.), InTech. – 2012. – 126 p.
22. *Changhau I.* Loss Functions in Neural Networks [Електронний ресурс] / *I. Changhau* – Режим доступу: [www. URL: https://isaacchanghau.github.io/post/loss_functions/](https://isaacchanghau.github.io/post/loss_functions/), (accessed 21.09.2018).

References:

1. Raghava, Sh. (2016), *Neural Network*, Amazon Digital Services LLC, 105 p.
2. Aggarwal, C.C. (2018), *Neural Networks and Deep Learning*, Springer International Publishing, 512 p.
3. He, K., Zhang, X., Ren, S. and Sun J. (2016), "Deep residual learning for image recognition", *Proc. of IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, P. 770-778.

4. Keinert, J., and Teich, J. (2011), *Design of Image Processing Embedded Systems Using Multidimensional Data Flow*, Springer, 337 p.
5. Fukuda, T., Suzuki, M., Kurata, G., Thomas, S., Cui, J. and Ramabhadran, B. (2017), "Efficient Knowledge Distillation from an Ensemble of Teachers", *Proc. Interspeech 2017*, August 20–24, Stockholm, Sweden, pp. 3697-3701.
6. Aghdam, H.H., and Heravi, E.J. (2017), *Guide to Convolutional Neural Networks: A Practical Application to Traffic-Sign Detection and Classification*, Springer, New York, USA, 299 p.
7. Madasamy, B., and Tamilselvi, J. (2013), "Improving classification Accuracy of Neural Network through Clustering Algorithms", *International Journal of Computer Trends and Technology (IJCTT)*, Vol. 4, Issue 9, available at: <http://www.ijcttjournal.org/Volume4/issue-9/IJCTT-V4I9P151.pdf>, (accessed 15 Oct 2018).
8. Zhang, Y.-J. (Ed.) (2006), *Advances in Image and Video Segmentation*, IRM Press, 473 p.
9. Ngan K.N., Li H. (Eds.) (2011), *Video Segmentation and Its Applications*, Springer, 179 p.
10. Howard, A.G., Zhu, M., Chen, Bo, Kalenichenko, D., Wang, W., Weyand, T., Andreetto, M. and Adam H. (2017), "Mobilenets: Efficient convolutional neural networks for mobile vision applications" *arXiv: 1704.04861*, (accessed 15 Oct 2018).
11. Geras, K.J., Mohamed, A.-R., Caruana, R., Urban, G., Wang, S., Aslan, O., Philipose, M., Richardson, M. and Sutton, C. (2016), "Blending LSTMs into CNNs", *ICLR Workshop*.
12. Li, J., Zhao, R., Huang, J.-T. and Gong, Y. (2014), "Learning small-size DNN with output-distribution-based criteria", *Proc. Interspeech 2014*, September, pp. 1910-1914.
13. Wong, J.H.M and Gales, M.J.F. (2016), "Sequence student-teacher training of deep neural networks", *Proc. Interspeech*, pp. 2761-2765.
14. Zhang, C., Bengio, S., Hardt, M., Recht, B. and Vinyals O. (2017), "Understanding deep learning requires rethinking generalization", *Proc. of International Conference on Learning Representations*.
15. Sewak, M., Rezaul, K. and Pujari, P. (2018), *Practical Convolutional Neural Networks*. Packt Publishing, 218 p.
16. Keras Documentation (2018), available at: <https://keras.io/preprocessing/image/>, (accessed 21 Oct 2018).
17. Opensv (2018), available at: <https://github.com/opencv/opencv/tree/master/samples/dnn>, (accessed 21 Sept 2018).
18. MobileNet SSD (2018), available at: <https://github.com/chuanqi305/MobileNet-SSD>, (Accessed 15 Oct 2018).
19. Python Script to download hundreds of images from 'Google Images' (2018), available at: <https://github.com/hardikvasa/google-images-download>, (accessed 21. Sept 2018).
20. Kalinin S. Svertochnaya set' na Python, available at: <https://habr.com/company/ods/blog/344008/> (accessed 21 Sept 2018).
21. Ho, P.-G.P. (Ed.) (2012), *Advances in Image Segmentation*, InTech, 126 p.
22. Changhau, I. (2017), "Loss Functions in Neural Networks", available at: https://isaacchanghau.github.io/post/loss_functions/ (accessed 21 Sept 2018).

Статтю представив д.т.н., проф. Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" О.П. Арсенева.

Надійшла (received) 16.11.2018

Zubarev Dmytro, master

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University

59-a Central avenue, Severodonetsk, Luhansk region, Ukraine, 93400

tel./phone: (064) 522-89-97, e-mail: dmytrozubarev@gmail.com

ORCID ID: 0000-0003-2933-9457

Skarga-Bandurova Inna, Dr. Sci. Tech., Professor

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University

59-a Central avenue, Severodonetsk, Luhansk region, Ukraine, 93400

tel./phone: (064) 522-89-97, e-mail: skarga_bandurova@ukr.net

ORCID ID: 0000-0003-3458-8730

УДК 004.932.1

Аналіз ефективності навчання CNN за принципом "вчитель-учень" з використанням непідготовленого Image-Dataset / Зубарєв Д.О., Скарґа-Бандурова І.С. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2018. – № 42 (1318). – С. 188 – 201.

Штучні нейронні мережі з кожним роком розширюють спектр існуючих та потенційних сфер використання. Якість навчання штучних нейронних мереж є основою якості їх подальшого функціонування. Стаття присвячена аналізу ефективності навчання штучних нейронних мереж класу CNN для розпізнавання непідготовленого набору зображень (Image-Dataset) за принципом "вчитель-учень", де у ролі вчителя виступає попередньо навчена діюча штучна нейронна мережа CNN-1, що завдає алгоритм навчання, а учнем є непідготовлена штучна нейронна система CNN-2. Доведено, що CNN-1 є більш ефективною для пошуку великого спектра об'єктів на зображеннях, а CNN-2 найкраще працює для вузько направлених надточних пошуків заданих об'єктів. Іл.: 7. Бібліогр.: 22 назв.

Ключові слова: штучна нейронна мережа; CNN; зображення; Image-Dataset.

УДК 004.932.1

Анализ эффективности обучения CNN по принципу "учитель-ученик" с использованием неподготовленных Image-Dataset / Зубарев Д.А., Скарґа-Бандурова И.С. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2018. – № 42 (1318). – С. 188 – 201.

Искусственные нейронные сети с каждым годом расширяют спектр существующих и потенциальных сфер использования. Качество обучения искусственных нейронных сетей является основой качества их дальнейшего функционирования. Статья посвящена анализу эффективности обучения искусственных нейронных сетей класса CNN для распознавания неподготовленного набора изображений (Image-Dataset) по принципу "учитель-ученик", где в роли учителя выступает предварительно обученная искусственная нейронная сеть CNN-1, которая задает алгоритм обучения, а учеником является неподготовленная искусственная нейронная система CNN-2. Доказано, что CNN-1 является более эффективной для поиска большого спектра объектов на изображениях, а CNN-2 лучше всего работает для узко направленных сверхточных поисков заданных объектов. Ил.: 7. Библиогр.: 22 назв.

Ключевые слова: искусственная нейронная сеть; CNN; изображения; Image-Dataset.

UDC 004.932.1

Analysis of the Efficiency of CNN Learning Based on Teacher-Student Training with Untrained Image Dataset / Zubarev D.O., Skarga-Bandurova I.S. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2018. – № 42 (1318). – P. 188 – 201.

Artificial neural networks expand the range of existing and potential spheres of use each year. The quality of training artificial neural networks is the basis of the quality of their further functioning. The article is devoted to the analysis of the effectiveness of the training of CNN class artificial neural networks for the recognition of an unprepared set of images (Image-Dataset) based on the principle of "teacher-student", in which the acting teacher of artificial neural network CNN-1 pre-trained, which causes the learning algorithm, and the pupil An untrained artificial neural system CNN-2. It is proved that CNN-1 is more effective to search for a large spectrum of objects in images, and CNN-2 works best for narrowly focused precise searches of objects. Figs.: 7. Refs.: 22 titles.

Keywords: artificial neural network; CNN; image; Image-Dataset.

ЗМІСТ

<i>Розміщення Вісника НТУ "ХПІ" серії "Інформатика та моделювання" в міжнародних наукометричних базах, репозитаріях та пошукових системах</i>	<i>3</i>
---	----------

Математические методы и модели

<i>Абдуллаев А.А., Сафарбаева Н.М. Об одной краевой задаче для уравнения смешанного типа второго рода</i>	<i>5</i>
<i>Дашкевич А.А. Снижение размерности данных на основе разбиения пространства на регулярную сетку</i>	<i>12</i>
<i>Дмитриенко В.Д., Заковоротный А.Ю., Мезенцев Н.В., Главчев Д.М. Исследование метода поиска функций преобразования нелинейных систем к эквивалентным линейным в геометрической теории управления</i>	<i>20</i>
<i>Мороз В.В., Кондратюк А.В. Варіаційні методи оцінки руху в задачах комп'ютерного зору</i>	<i>36</i>
<i>Павленко В.Д., Павленко С.В., Ломовой В.И. Вычислительные методы построения моделей Вольтерра нелинейных динамических систем в частотной области</i>	<i>48</i>
<i>Рахматуллаев А.Х., Хидоятова М.А. Некоторые свойства ковариантного функтора P: $comp \rightarrow comp$ вероятностных мер, действующего на категории стратифицируемых пространств</i>	<i>64</i>
<i>Сіряк Р.В., Скарга-Бандурова І.С. Модель обробки поточкових даних для розпізнавання окремих одиниць жестової мови</i>	<i>73</i>
<i>Tikhonov V.I., Tykhonova O.V. Cognitive tensor model of a system based on Von Neumann classes</i>	<i>82</i>
<i>Худаяров Б.А., Тураев Ф.Ж., Комилова Х.М. Численное моделирование колебаний трубы с потоком жидкости</i>	<i>98</i>

Компьютерная инженерия

<i>Гавриленко С.Ю., Челак В.В., Давыдов В.В. Разработка системы фиксации аномальных состояний компьютера</i>	<i>109</i>
--	------------

Автоматизация и компьютерно-интегрированные технологии

Бобух А.О., Переверзева А.М. Розробка алгоритму структурної ідентифікації технології виробництва кальцинованої соди	123
Вахобов В.В. О выборе параметров минимаксного плана последовательного приёмочного контроля	131
Деркач М.В., Скарга-Бандунова І.С., Хишев В.О. Налаштування моделі прогнозування часу прибуття громадського транспорту на зупинки міста	138
Дмитриенко В.Д., Леонов С.Ю., Бречко В.А. Моделирование многослойной, многонаправленной и древовидной ассоциативной памяти	148
Самигулина Г.А., Лукманова Ж.С. Когнитивная Smart-технология дистанционного обучения современному оборудованию промышленной автоматизации	160
Тітова А.Ю., Іванов Д.Є. Розробка моделі аналізу складних даних на основі класифікації machine learning	171

Информационные технологии

Білобородова Т.О., Скарга-Бандунова І.С. Комплексний підхід до обробки різномірних медичних даних з відсутніми значеннями	180
Зубарєв Д.О., Скарга-Бандунова І.С. Аналіз ефективності навчання CNN за принципом "вчитель-учень" з використанням непідготовленого image-dataset	188

НАУКОВЕ ВИДАННЯ
ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
"ХПІ"

Збірник наукових праць
Серія
Інформатика та моделювання
№ 42 (1318)

Науковий редактор д.т.н. Дмитрієнко В.Д.
Технічний редактор д.т.н. Леонов С.Ю.
Відповідальний за випуск к.т.н. Шайда В.П.

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 61002, Харків, вул. Кірпічова, 2, НТУ "ХПІ".
Кафедра обчислювальної техніки та програмування,
тел. (057) 7076198, E-mail: serleomail@gmail.com

Обл. вид. № 28 – 18

Підп. до друку 21.12.2018 р. Формат 70х100/16. Папір офсетний.
Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 9,8. Облік. вид. арк. 10,0.
Наклад 300 прим.
Ціна договірна

НТУ "ХПІ", 61002, Харків, вул. Кірпічова, 2,

Видавничий центр НТУ "ХПІ"
Свідоцтво ДК № 116 від 10.07.2000 р.

Виготовлено у ТОВ ВПП "Контраст".
Україна, 61166, м. Харків, пр. Науки, 40, оф. 221.
Св-во: ДК №1778 від 05.05.2004.