

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут"

ВІСНИК

НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
"ХПІ"

Серія: Інформатика та моделювання

№ 13 (1338) 2019

Збірник наукових праць

Видання засновано у 1961 році

Харків
НТУ "ХПІ", 2019

Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2019. – № 13 (1338). – 191 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. Жиликов, 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. Гамзаєв, 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);

Badur Tchunashvili, Dr., Prof (Georgia);

Javad Khamisabadi, Dr., (Iran).

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ "ХПІ"

Протокол № 07 від 05.07.2019 р.

ISSN 2079-0031 (Print)

ISSN 2411-0558 (Online)

© Національний технічний університет "ХПІ", 2019

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, SUPrimo 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:** IBRIS – 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

УДК 517.956.6

DOI: 10.20998/2411-0558.2019.13.01

А. А. АБДУЛЛАЕВ, асс. кафедры "Высшая математика",
Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации
сельского хозяйства, Ташкент

О ЕДИНСТВЕННОСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ТИПА ФРАНКЛЯ ДЛЯ УРАВНЕНИЯ ЭЛЛИПТИКО-ГИПЕРБОЛИЧЕСКОГО ТИПА ВТОРОГО РОДА

Одной из главных задач гидро и газовой динамики является разработка математических моделей стационарных процессов, описываемых уравнениями смешанного типа.

В данной работе изучается задача определения течения внутри плоскопараллельного симметричного сопла Лавалья заданной формы (прямая задача теории сопла Лавалья), т.е. для уравнения, где линия вырождения является характеристикой. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: задачи гидро и газовой динамики; сопло Лавалья; уравнения смешанного типа; уравнения эллипτικο-гиперболического типа.

Постановка проблемы. Благодаря новым приложениям уравнений смешанного типа теория краевых задач получила новый импульс развития. Особенно важную роль в приложениях занимают краевые задачи для эллипτικο-гиперболических уравнений (например, [1 – 4]). Задача Франкля и ее аналоги для смешанных эллипτικο-гиперболических уравнений, а также 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 изучаются течения внутри плоскопараллельного симметричного сопла Лавалья заданной формы, т.е. аналог задачи Франкля с краевым условием Пуанкаре для уравнения эллипτικο-гиперболического типа второго рода, где линия вырождения тоже является характеристикой.

Анализ литературы. В [1] доказана однозначная разрешимость задачи Трикоми и показано ее применение к решению прямой задачи теории сопла Лавалья. В [2] получено решение нелокальной краевой задачи для уравнения эллиптического типа второго рода. В [3] рассмотрена задача Пуанкаре-Трикоми для уравнения смешанного типа второго рода. В работе [4] доказана однозначная разрешимость задачи для уравнения третьего порядка смешанного типа второго рода, в [5] доказана однозначная разрешимость нелокальной краевой задачи с конормальной производной для уравнения смешанного эллипτικο-

гиперболического типа. В работах [6 – 8] приведены некоторые приложения уравнений смешанного типа теории краевых задач.

Цель статьи – доказать единственность решения задачи типа Франкля для уравнения эллиптико-гиперболического типа второго рода.

Рассмотрим область D , изображенную на рисунке, где AC и BC – характеристики уравнения (1), а Γ – спрямляемая Жорданова кривая. Ф.И. Франкль показал, что для обеспечения существования и единственности в области D решения $u(x,y)$ уравнения

$$\operatorname{sign} y |y|^m \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0, \quad (1)$$

при $-1 < m < -2$ уже недостаточно подчинить функцию $u(x,y)$ краевым условиям

$$u|_{\Gamma} = \varphi(s), \quad u|_{AC} = \psi(x),$$

а следует, сверх того, на отрезке AB линии перехода вместо обычного требования непрерывности $u_y(x, +0) = u_y(x, -0)$ ввести предположение (условие разрывности Франкля)

$$\frac{\partial u(x, +0)}{\partial y} = - \frac{\partial u(x, -0)}{\partial y}.$$

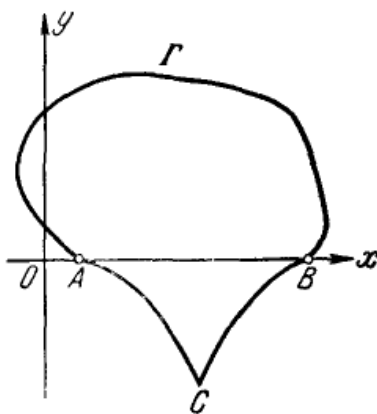


Рис. Область D решения $u(x,y)$ уравнения (1)

Этот результат обобщаем для значений $m \in (-2; -1)$ причём единственность доказываем тем же методом, а существование решения с помощью представления обобщенного решения [2 – 4] класса R_2 уравнения (1) для значений $-2 < m < -1$.

Теорема единственности.

Докажем теорему единственности в классе функций, удовлетворяющих условиям:

$$1) u(x, y) \in C^{(2)}(D^+ \cup D^-);$$

2) интегралы

$$\int_A^B u(x, 0) u_y(x, 0) dx, \quad \iint_{D^+} (y^m u_x^2 + u_y^2) dx dy,$$

и

$$\iint_{D^-} [(-y)^m u_x^2 - u_y^2] dx dy, \quad \int_C^B (-y)^{\frac{m-2}{2}} u^2 du$$

существуют, а к интегралам

$$\iint_{D^+} u(y^m u_{xx} + u_{yy}) dx dy, \quad \iint_{D^-} u[(-y)^m u_{xx} - u_{yy}] dx dy$$

можно применить формулу Грина;

$$3) (-y)^{\frac{m}{2}} u^2(B) = 0.$$

Положим

$$\frac{\partial u(x, +0)}{\partial y} = -\frac{\partial u(x, -0)}{\partial y} = v(x).$$

Покажем предварительно, что если $u(x, y)$ есть решение уравнения (1), обращающееся в нуль на характеристике AC , то

$$\int_0^1 \tau(x) v(x) dx \geq 0. \quad (2)$$

В самом деле, для области D^- нижней полуплоскости справедливо равенство $(-1 < m < -2)$

$$\begin{aligned}
0 &= \iint_{D^-} u[(-y)^m u_{xx} - u_{yy}] dx dy = \\
&= \int_{AC} \int_{BA} u[(-y)^m u_x dx + u_y dy] + \iint_{D^-} [u_y^2 - (-y)^m u_x^2] dx dy.
\end{aligned}$$

Отсюда, учитывая, что $u|_{AC} = 0$, получим

$$\int_0^1 \tau(x) \nu(x) dx = - \iint_{D^-} [u_y^2 - (-y)^m u_x^2] dx dy - \int_C^B u[(-y)^m u_x dx + u_y dy]. \quad (3)$$

На характеристике CB имеем $dx = (-y)^{\frac{m}{2}} dy$. Тогда

$$\begin{aligned}
\int_C^B u[(-y)^m u_x dx + u_y dy] &= \int_C^B (-y)^{\frac{m}{2}} u(u_x dx + u_y dy) = \int_C^B (-y)^{\frac{m}{2}} u du = \\
&= \frac{1}{2} (-y)^{\frac{m}{2}} u^2(B) + \frac{m}{4} \int_C^B (-y)^{\frac{m-2}{2}} u^2 du
\end{aligned}$$

или, в силу (3),

$$\int_C^B u[(-y)^m u_x dx + u_y dy] = \frac{m}{4} \int_C^B (-y)^{\frac{m-2}{2}} u^2 du \leq 0. \quad (4)$$

Покажем, что первый интеграл в правой части равенства (3) не положителен. Для этого перейдем в плоскость характеристических координат

$$\xi = x - \frac{2}{m+2} (-y)^{\frac{m+2}{2}}, \quad \eta = x + \frac{2}{m+2} (-y)^{\frac{m+2}{2}}.$$

Имеем

$$\iint_{D^-} [u_y^2 - (-y)^m u_x^2] dx dy = -2 \iint_{\Delta AB'C'} (-y)^{\frac{m}{2}} u_\xi u_\eta d\xi d\eta \quad (5)$$

В гиперболической полуплоскости уравнение (1) принимает вид [5]

$$\frac{\partial^2 u}{\partial \xi \partial \eta} - \frac{\beta}{\eta - \xi} \left(\frac{\partial u}{\partial \eta} - \frac{\partial u}{\partial \xi} \right) = 0, \quad (6)$$

где $\beta = \frac{m}{2(m+2)}$.

Из (6) имеем

$$u_{\xi}u_{\eta} = u_{\eta}^2 - \frac{\eta - \xi}{\beta} u_{\eta}u_{\xi\eta}. \quad (7)$$

Подставив (7) в (5), получим

$$\iint_{D^-} [u_y^2 - (-y)^m u_x^2] dx dy = -2 \left(\frac{m+2}{4} \right)^{\frac{m}{m+2}} \left[\iint_{\Delta AB'C'} (\eta - \xi)^{\frac{m}{m+2}} u_{\eta}^2 d\xi d\eta - \right. \\ \left. - \frac{1}{\beta} \iint_{\Delta AB'C'} (\eta - \xi)^{\frac{2(m+1)}{m+2}} u_{\eta} u_{\xi\eta} d\xi d\eta \right]$$

или, интегрируя по частям последний интеграл, имеем

$$\iint_{D^-} [u_y^2 - (-y)^m u_x^2] dx dy = \frac{2(m+2)}{m} \left(\frac{m+2}{4} \right)^{\frac{m}{m+2}} \iint_{\Delta AB'C'} (\eta - \xi)^{\frac{m}{m+2}} u_{\eta}^2 d\xi d\eta \leq 0. \quad (8)$$

Учитывая (4) и (8), из (3) получаем (2).

Теперь нетрудно доказать теорему единственности. Пусть $u(x, y)$ – решение уравнения (1), равное нулю на кривой Γ и на характеристике AC . Тогда

$$0 = \iint_{D^-} u(y^m u_{xx} + u_{yy}) dx dy = - \iint_{D^+} (y^m u_x^2 + u_y^2) dx dy - \int_0^1 \tau(x) v(x) dx - \\ - \int_{\Gamma} u[y^m u_x \cos(nx) + u_y \cos(ny)] ds$$

и так как $u|_{\Gamma} = 0$, то получим

$$\iint_{D^+} (y^m u_x^2 + u_y^2) dx dy + \int_0^1 \tau(x) v(x) dx = 0. \quad (9)$$

Поскольку $u = 0$ на характеристике AC , то имеет место (2), а тогда из (9) легко заключаем, что $u \equiv 0$ в $D^+(y > 0)$. В силу единственности решения задачи Коши для уравнения (1) [2] получаем, что $u \equiv 0$ в $D^-(y < 0)$.

Таким образом, $u \equiv 0$ в D , что и требовалось доказать.

Выводы: Таким образом, в статье получены новые математические результаты, состоящие в доказательстве единственности решения задачи

типа Франкля с краевым условием Пуанкаре для уравнения эллиптического-гиперболического типа второго рода, которое используется для моделирования стационарных процессов течения внутри плоскопараллельного симметричного сопла Лаваля заданной формы. Полученный результат может использоваться и при моделировании других газовых и гидродинамических процессов.

Список литературы:

1. Франкль Ф.И. Обобщение задачи Трикоми и его применение к решению прямой задачи теории сопла Лаваля / Ф.И. Франкль // Матем. сб. – 1961. – Т. 54. – № 2. – С. 225-236.
2. 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 // NANOSYSTEMS: PHYSICS, CHEMISTRY, MATHEMATICS. – 2018. – 9 (3). – P. 307-318.
3. Мамадалиев Н.К. О разрешимости задачи Пуанкаре-Трикоми для уравнения смешанного типа второго рода / Н.К. Мамадалиев, А.А. Абдуллаев // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – 2013. – № 19. – С. 81-86.
4. Салахитдинов М.С. О единственности решения задачи для одного уравнения третьего порядка смешанного типа второго рода / М.С. Салахитдинов, А.А. Абдуллаев // Доклады Адыгской (Черкесской) Международной Академии Наук. – 2011. – Т. 13. – № 2. – С. 9-11.
5. Абдуллаев А.А. Об одной краевой задаче для уравнения смешанного типа второго рода / А.А. Абдуллаев, Н.М. Сафарбаева // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ", 2018. – № 42 (1318). – С. 5-11.
6. Khudayarov B.A. Numerical simulation of nonlinear oscillations of a viscoelastic pipeline with fluid / B.A. Khudayarov, F.Zh. Turayev // Вестн. Томского. гос. университета. Математика и механика. – 2016. – 5 (43). – С. 90-98.
7. Khudayarov B.A. Nonlinear supersonic flutter for the viscoelastic orthotropic cylindrical shells in supersonic flow / B.A. Khudayarov, F.Zh. Turaev // Aerospace Science and Technology. – 2019. – 84. – P. 120-130.
8. Khudayarov B.A. Mathematical Simulation of Nonlinear Oscillations of Viscoelastic Pipelines Conveying Fluid / B.A. Khudayarov, F.Zh. Turaev // Applied Mathematical Modelling. – 2019. – 66. – P. 662-679.

References:

1. Frankl, F.I. (1961), "Generalization of the Tricomi problem and its application to the solution of the direct problem of the theory of a Laval nozzle", *Mat. compilation*, Vol. 54, No. 2, pp. 225-236.
2. 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", *NANOSYSTEMS: PHYSICS, CHEMISTRY, MATHEMATICS*, No. 9 (3), pp. 307-318.
3. Mamadaliev, N.K., and Abdullayev, A.A. (2013), "On the solvability of the Poincaré-Tricomi problem for a mixed-type equation of the second kind", *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Computer Science and Modeling*, No. 19, pp. 81-86.
4. Salakhitdinov, M.S., and Abdullayev, A.A. (2011), "On the uniqueness of the solution of the problem for a single third-order equation of mixed type of the second kind", *Reports of the Adyghe (Circassian) International Academy of Sciences*, Vol. 13, No 2, pp. 9-11.

-
5. Abdullayev, A.A., and Safarbaeva, N.M. (2018), "On a boundary value problem for a mixed type equation of the second kind", *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Computer Science and Modeling*, Kharkov, NTU "KhPI", No. 42 (1318), pp. 5-11.
 6. Khudayarov, B.A., and Turayev, F.ZH. (2016), "Numerical simulation of nonlinear oscillations of a viscoelastic pipeline with fluid", *Bulletin of the Tomsk State Univ. Matematika i mekhanika*, No 5 (43), pp. 90-98.
 7. Khudayarov, B.A. and Turayev, F.Zh. (2019), "Nonlinear supersonic flutter for the viscoelastic orthotropic cylindrical shells in supersonic flow", *Aerospace Science and Technology*, 84, pp. 120-130.
 8. Khudayarov, B.A. and Turayev, F.Zh. (2019), "Mathematical Simulation of Nonlinear Oscillations of Viscoelastic Pipelines Conveying Fluid", *Applied Mathematical Modelling*, 66, pp. 662-679.

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

Поступила (received) 15.05.2019

Повторно 28.05.2019

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

УДК 517.956.6

Про єдиність рішення задачі типу Франкля для рівняння еліптико-гіперболічного типу другого роду / Абдуллаєв А.А. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2019. – № 13 (1338). – С. 5 – 12.

Однією з головних задач гідро і газової динаміки є розробка математичних моделей стаціонарних процесів, які описуються рівняннями змішаного типу.

У даній роботі вивчається задача визначення течії всередині плоскопаралельного симетричного сопла Лавалю заданої форми (пряма задача теорії сопла Лавалю), тобто для рівняння, де лінія виродження є характеристикою. Бібліогр.: 8 назв.

Ключові слова: задачі гідро і газової динаміки; сопло Лавалю; рівняння змішаного типу; рівняння еліптико-гіперболічного типу.

УДК 517.956.6

О единственности решения задачи типа Франкля для уравнения эллиптико-гиперболического типа второго рода / Абдуллаев А.А. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2019. – № 13 (1338). – С. 5 – 12.

Одной из главных задач гидро и газовой динамики является разработка математических моделей стационарных процессов, описываемых уравнениями смешанного типа.

В данной работе изучается задача определения течения внутри плоскопаралельного симметричного сопла Лавалю заданной формы (прямая задача теории сопла Лавалю), т.е. для уравнения, где линия вырождения является характеристикой. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: задачи гидро и газовой динамики; сопло Лавалю; уравнения смешанного типа; уравнения эллиптико-гиперболического типа.

UDC 517.956.6

On the uniqueness of the solution of a Frankl-type problem for an equation of the elliptic-hyperbolic type of the second kind / Abdullaev AA. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2019. – №.13 (1338). – P. 5 – 12.

One of the main tasks of hydro and gas dynamics is the development of mathematical models of stationary processes described by equations of mixed type.

In this paper, we study the problem of determining the flow inside a plane-parallel symmetric Laval nozzle of a given shape (the direct problem of the theory of a Laval nozzle), i.e. for the equation, where the line of degeneration is characteristic. Refs.: 8 titles.

Keywords: hydro and gas dynamics problems; Laval nozzle; equations of mixed type; equations of elliptic-hyperbolic type.

УДК.591.6

DOI: 10.20998/2411-0558.2019.13.02

М. АТАМИРЗАЕВ, канд. физ.-мат. наук, доц. ТИИМСХ, Ташкент,
Н. ЮЛДАШЕВ, канд. физ.-мат. наук, доц. ТИИМСХ, Ташкент

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУЙ РЕАГИРУЮЩИХ ГАЗОВ

В данной работе приводятся модифицированные модели для вычисления турбулентной эффективной вязкости, метод расчета и некоторые численные результаты исследования трехмерных турбулентных струй реагирующих газов, истекающих из сопла прямоугольной формы и распространяющихся в затопленном (спутном) потоке воздуха при диффузионном горении. Ил.: 4. Библиогр.: 18 назв.

Ключевые слова: турбулентные струи; вязкость; сопло; реагирующие газы; эффективная вязкость.

Постановка проблемы и анализ литературы. Основным инструментом исследования газодинамики, тепломассообмена турбулентных струйных течений многокомпонентных газовых смесей является математическое моделирование, которое в отличие от физического эксперимента нередко экономически эффективнее и часто является единственно возможным методом исследований. В общем случае моделирование турбулентных струйных течений реагирующих газовых смесей основано на общепринятой системе связанных уравнений в частных производных, выражающих законы сохранения массы, импульса, энергии и вещества [1 – 4].

В работах [5 – 10] приведены, в основном, результаты экспериментальных и теоретико-численных расчетов, посвященных исследованиям истечения воздуха, вытекающего из сопла прямоугольной формы.

В тоже время, проблема математического моделирования трехмерных струйных течений реагирующих газовых смесей до настоящего времени остается в механике одной из самых сложных [11 – 18]. Сложность рассматриваемой проблемы связана, с одной стороны, с незавершенностью теории турбулентности, а с другой, специфическими особенностями турбулентных течений при наличии химических реакций.

Целью работы является численное исследование истечения трёхмерной турбулентной струи газов из сопла прямоугольной формы.

Постановка задачи. Рассмотрим реагирующую струю, вытекающую из сопла прямоугольной формы и распространяющуюся в спутном (затопленном) потоке воздуха. В качестве начала координат декартовой системы выберем центр начального сечения струи: ось OX

© М. Атамирзаяев, Н. Юлдашев, 2019

направлена вдоль струи, а оси OY и OZ параллельны сторонам сопла, размером $2a$ и $2b$ соответственно. Предположим, что течение симметрично относительно оси OX и плоскостей YOX , ZOX , которые образуют границы области интегрирования и позволяют рассматривать только одну четверть прямоугольной струи.

Такое течение описывается следующей параболизированной системой уравнений [1, 3, 4, 9, 10]:

$$\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{1}{L} \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{1}{L} \frac{\partial v}{\partial y} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{L^2} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right), \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{1}{L} \frac{\partial v}{\partial y} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} = & -\frac{\partial P}{L \partial y} + \frac{4}{3L^2} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \\ & - \frac{2}{3L} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{1}{L} \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial y} \right), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\partial w}{\partial x} + \rho v \frac{1}{L} \frac{\partial w}{\partial y} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} = & -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{4}{3} \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{1}{L^2} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) - \\ & - \frac{2}{3L} \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{1}{L} \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\partial H}{\partial x} + \rho v \frac{\partial H}{L \partial y} + \rho w \frac{\partial H}{\partial z} = & \frac{1}{L^2 \text{Pr}_T} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{1}{\text{Pr}_T} \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial H}{\partial z} \right) + \\ & + \left(1 - \frac{1}{\text{Pr}_T} \right) \left[\frac{1}{L^2} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu u \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \right. \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu u \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu u \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{1}{L^2} \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu w \frac{\partial w}{\partial y} \right) \left. \right] + \\ & + \left(\frac{4}{3} - \frac{1}{\text{Pr}_T} \right) \left[\frac{1}{L^2} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu v \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu w \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] - \\ & - \frac{1}{L} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{2}{3} \mu v \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{1}{L} \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu v \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{1}{L} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu w \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{1}{L} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{2}{3} \mu w \frac{\partial v}{\partial y} \right), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\rho u \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} + \rho v \frac{1}{L} \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} + \rho w \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} = \frac{1}{L^2 Sc_T} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} \right) + \frac{1}{Sc_T} \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} \right), \quad (6)$$

$$H = c_p + \frac{u^2 + v^2 + w^2}{2} + \sum_{i=1}^N c_i k_i^*, \quad (7)$$

$$H = \rho T \sum_{i=1}^N \frac{c_i}{M_i}. \quad (8)$$

Для вычисления эффективной турбулентной вязкости используем модифицированную алгебраическую модель, учитывающую молекулярный перенос, трехмерность и температурную неоднородность струи в виде

$$\mu = \mu_\lambda + \alpha \rho l^2 \sqrt{\left(\frac{\partial u}{L \partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{L \partial y} \right)^2} \cdot \left(\frac{T}{T^*} \right)^\alpha, \quad (9)$$

а также подключение уравнения кинетической и диссипации кинетической энергии турбулентности для вычисления турбулентной вязкости ("k-ε" модель), имеющего следующий вид:

$$\rho u \frac{\partial k}{\partial x} + \rho v \frac{\partial k}{L \partial y} + \rho w \frac{\partial k}{\partial z} = \frac{\partial}{L^2 \partial y} \left(\frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + G - \rho \epsilon, \quad (10)$$

$$\rho u \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + \rho v \frac{\partial \epsilon}{L \partial y} + \rho w \frac{\partial \epsilon}{\partial z} = \frac{\partial}{L^2 \partial y} \left(\frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right) + (C_1 G - C_2 \rho \epsilon) \frac{\epsilon}{k}, \quad (11)$$

где

$$G = \mu_T \left[\left(\frac{\partial u}{L \partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right], \quad \mu_T = \frac{C_\mu \rho k^2}{\epsilon}. \quad (12)$$

В уравнениях (1) – (12) u , v , w – составляющие скорости по осям x , y , z ; k , ϵ – кинетическая энергия турбулентности и ее диссипации; p , P , T – плотность, давление и температура смеси; R – универсальная газовая постоянная; Pr_T , Sc_T – турбулентное число Прандтля и Шмидта; μ – коэффициент динамической эффективной турбулентной вязкости; c_p – теплоемкость смеси при постоянном давлении; c_i , k_i^* – концентрация и теплота образования i -й компоненты; N – число компонентов смеси; α – эмпирическая постоянная Кармана; α – показатель, учитывающий

температурную неоднородность струи; $\mu_\lambda = \text{const} \cdot T^{0,64}$; l – длина пути перемешивания; $C_1, C_2, C_\mu, \sigma_k, \sigma_z$ – эмпирические константы "k-ε" модели турбулентности. Система уравнений (1) – (12) приведена в безразмерном виде, выбрав в качестве масштаба длин величину – b , для скоростей – u_2 , плотности – ρ_2 , давления – $\rho_2 u_2^2$, полная энтальпия и теплота образования i -й компоненты – u_2^2 , эффективной турбулентной вязкости – $b \rho_2 u_2^2$, теплоемкости при постоянном давлении – (R/M_1) , температуры – $u_2^2/(R/M_1)$, молекулярных весов – M_1 , кинетической энергии турбулентности и ее диссипации соответственно – u_2^2 и u_2^3/b , а также безразмерное входное сечение сопла в квадратную область с помощью формулы $y = \bar{y}/L$.

Уравнение концентрации (6) написано в форме консервативной функции Шваба-Зельдовича относительно массовой концентрации i -ых компонентов, позволяющее свести число уравнений с источниками до одного для четырех компонентной смеси. Предполагается, что реакция протекает в зоне соприкосновения горючего с окислителем, т.е. рассматривается диффузионное горение.

Функция $\bar{C}$ на срезе сопла равна 1, а в зоне воздуха 0.

Для данной постановки, системы уравнений (1) – (9) или (1) – (8), (10) – (12) можно решать с помощью следующих безразмерных краевых условий:

I. $x=0$:

- 1) $0 \leq y \leq 1, 0 \leq z \leq 1; u=1, v=0, w=0, H=H_2, P=P_2, \bar{C}=1,$
($k=k_2, \varepsilon=\varepsilon_2$).
- 2) $1 < y < y_{+\infty}, 1 < z < z_{+\infty}; u=u_1, v=0, w=0, H=H_1, P=P_1, \bar{C}=1,$
($k=k_1, \varepsilon=\varepsilon_1$).

II. $x>0$:

- 1) $z=0; 0 \leq y < y_{+\infty}; w=0, \frac{\partial f}{\partial z}=0,$
($f=u, v, H, \bar{C}, (k, \varepsilon)$). (13)
- 2) $y=0; 0 \leq z < z_{+\infty}; v=0, \frac{\partial f}{\partial y}=0, \left(f=u, w, H, \bar{C}, (k, \varepsilon) \right).$
- 3) $z \rightarrow z_{+\infty}, y \rightarrow y_{+\infty}, u=u_1, v=0, w=0, H=H_1, P=P_1, \bar{C}=0,$
($k=k_1, \varepsilon=\varepsilon_1$).

Здесь нижними индексами "1", "2" и "+∞" отмечены, соответственно, безразмерные величины окислителя и горючего на струе, а также в бесконечности.

Система уравнений (1) – (9) частично параболизирована, поэтому их эллиптические эффекты проявляются через поле давления и их эллиптические свойства, связанные с полем движения, сохраняются [2, 3]. При истечении дозвуковой свободной струи через сопло прямоугольного сечения в среду, градиентом давления в продольном направлении и малыми изменениями его в поперечной плоскости можно пренебречь, что иногда даёт возможность проведения расчетов, заданных давлением [1 – 3].

Метод решения и результаты вычислительных экспериментов. Для численного интегрирования системы уравнений с краевыми условиями (13) используем пространственную двухслойную десятиточечную конечно-разностную схему переменных направлений [6] с точностью до порядка $O(\Delta x, \Delta y^2, \Delta z^2)$.

Большинство решений трехмерных параболизированных уравнений, получено согласно методу с сегрегированием, предложенного в процедуре SIMPLE [2], и в несколько отличной формулировке, которая также приводит к уравнению Пуассона для обновления давления [1].

В данной работе приводится эффективный метод, подобный SIMPLE с прямым методом решается уравнение Пуассона для определения поправки к скоростям. Якобы лишнее уравнение неразрывности используется для расчета дисбаланса массы. В отличие от работ [2, 3] поправки приводятся по трем составляющим скоростям; найденные решения u , v , w в новой итерации выражаются как расчетные (u_p, v_p, w_p) и плюс поправочные (u_c, v_c, w_c) в виде

$$u = u_p + u_c, \quad v = v_p + v_c, \quad w = w_p + w_c. \quad (14)$$

Поправочные скорости определяются из уравнения неразрывности введением потенциала Q ,

$$\rho u_c = \frac{\partial Q}{\partial x}, \quad \rho v_c = \frac{\partial Q}{L \partial y}, \quad \rho w_c = \frac{\partial Q}{\partial z}, \quad (15)$$

который является решением уравнения Пуассона

$$\frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q}{L \partial y^2} + \frac{\partial^2 Q}{\partial z^2} = Q_p, \quad (16)$$

где Q_p – источниковый член.

Разностное уравнение (16) можно записать для потенциала Q в каждой точке сетки поперек потока в плоскости по i (нумерация i -сечений по оси Ox , j – по Oy , k – по Oz) и использовать трехдиагональную систему уравнений при следующих обоснованных допущениях:

1) $Q_{i-1,j,k}=0$, $Q_{i,j,k-1}=0$ – означает, что поправки к скорости в плоскости $(i-1)$ и в сечении $(k-1)$, в котором выполняется сохранение массы, уже получены.

2) $Q_{i+1,j,k}=0$, $Q_{i,j,k+1}=0$ – означает, что поправки к скорости будут равны нулю, как и в плоскости $(i+1)$, так и в сечении $(k+1)$. Тем самым достигается их сходимость в этой плоскости и в сечении соответственно.

Наращивание расчетной области (расширение границы струи) по оси Oz и Oy проводилось по условию:

$$\max_{i,j,k} |F_{ijk} - F_{Bu}| > \delta, \text{ где } F = \{u, H\}, \text{ а } \delta - \text{малое число.}$$

Если это условие выполняется, то количество расчетных точек увеличивается на одну точку.

При неизобарическом случае, кроме соотношения (14) предположим, что истинное давление выражается как расчетное P_p и плюс поправочное, т.е. в виде

$$P = P_p + \beta P_c, \quad (17)$$

где β – коэффициент релаксации.

Далее предлагаемый метод имеет в своей основе, подобно как и в оригинальном подходе Патанкара и Сполдинга [2, 3], что поправки к скорости определяются поправками к давлению в соответствии с очень приближенным уравнением движения, но мы используем их по всем уравнениям движения, в которых продольные конвективные члены уравновешены членами с давлением. Дискретизируя левые части этих уравнений с учетом предположения, что в плоскости $(i-1)$ поправки к скорости равны 0, получим

$$u_c = -\frac{\Delta x}{\rho u} \frac{\partial P_c}{\partial x}, \quad v_c = -\frac{\Delta x}{L \rho u} \frac{\partial P_c}{\partial y}, \quad w_c = -\frac{\Delta x}{\rho u} \frac{\partial P_c}{\partial z}. \quad (18)$$

Учитывая, что поправленные скорости (14) должны удовлетворять уравнению неразрывности, получим уравнение Пуассона относительно P_c , и его можно легко решать в каждом сечении, если ввести некоторые обоснованные предположения подобные 1) и 2). В этом случае алгоритм расчета подобен вышеописанному, лишь с той разницей что после нахождения P_c вычисляются истинное значение давления и поправочные скорости по формулам (14).

Из профилей кинематического коэффициента турбулентной вязкости, приведенных в разных сечениях струи по осям OY и OZ (рис. 1), видно, что максимальное его значение наблюдается во фронте пламени, где температура имеет максимум, и это, в свою очередь, приводит к его возрастанию. $\mu_\lambda = 0$, $\alpha = 0$, где существует ядро струи, значение кинематического коэффициента вязкости равно нулю, а с удалением от среза сопла максимальное значение его перемещается к оси струи и изменение вдоль осей OY и OZ постепенно сглаживается.

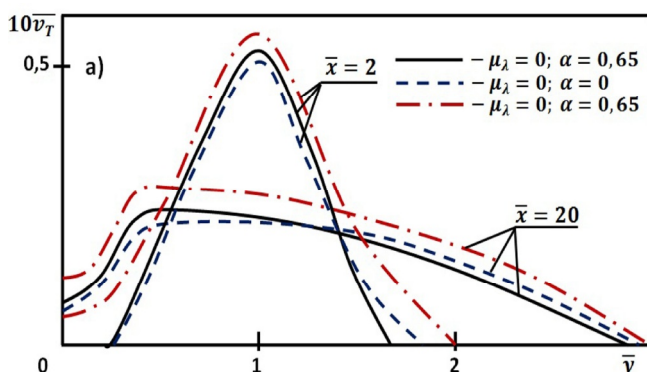


Рис. 1, а. Изменение кинематической вязкости при разных алгебраических моделях коэффициента турбулентности по оси y

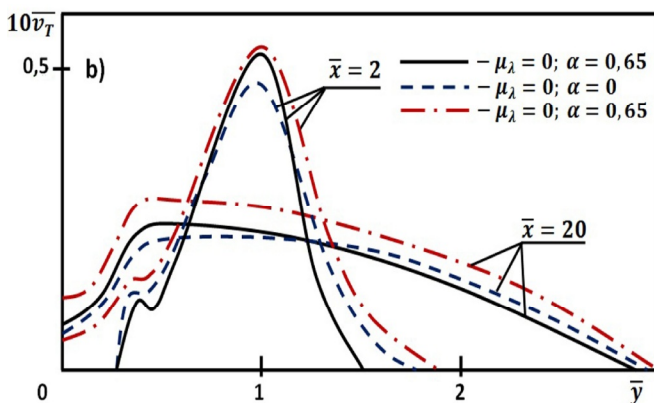


Рис. 1, б. Изменение кинематической вязкости при разных алгебраических моделях коэффициента турбулентности по оси z

Возрастание температуры топлива от 700 К до 1200 К приводит к увеличению длины диффузионного факела от $L_{\text{ф}}/2b = 24$ до 26,5 при температуре окислителя 300 К, и более нагретом окислителе ($T_1 = 500$ К, $T_2 = 1200$ К) безразмерная длина факела доходит до 27,5.

На рис. 2 изображены осевое изменение продольной скорости и потока импульса вдоль оси затопленного диффузионного факела при

разных исходных значениях температуры горючей струи и окислителя ($\text{---} \text{---} \text{---}$ – $T_2 = 700$ К; $\text{---} \text{---}$ – $T_2 = 900$ К; — – $T_2 = 1200$ К; $\text{---} \text{---}$ – $T_2 = 1200$ К, $T_1 = 500$ К). Судя по осевому изменению этих параметров можно сказать, что их поведение правильно отражает физику явления, т.е. увеличение исходного значения температуры приводит к медленному убыванию осевой скорости потока импульса. При небольших температурах горючей струи ($T_2 \leq 900$ К) на фронте пламени температура не превышает 1750 К.

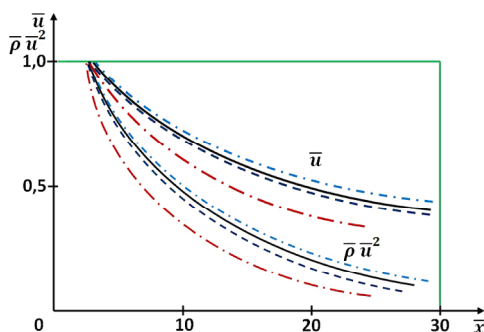


Рис. 2. Осевое изменение продольной скорости и потока импульса.

$\text{---} \text{---} \text{---}$ – $T_2=700$ К; $\text{---} \text{---}$ – $T_2=900$ К;
 — – $T_2=1200$ К; $\text{---} \text{---}$ – $T_2=500$ К

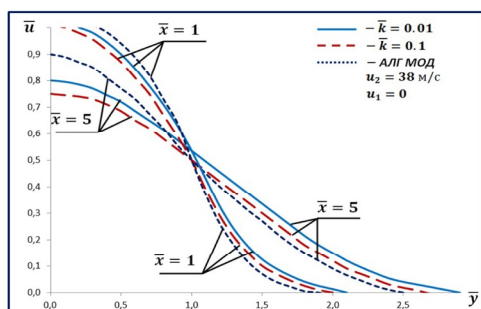


Рис. 3. Сравнение результатов в рамках алгебраической и "k-ε" модели турбулентности

На рис. 3 приведены сравнения профилей продольной скорости по оси OY в разных сечениях в продольном направлении, в рамках алгебраической и "k-ε" модели турбулентности. Незначительно отличающиеся результаты были получены при начальных значениях кинетической энергии турбулентности, составляющей 1% от исходной скорости модифицированных эмпирических констант "k-ε" модели турбулентности $C_1 = 1,3$ и $C_2 = 1,5$ вместо $C_1 = 1,4$ и $C_2 = 1,92$.

Выводы. На основе разработанного метода, исследовано влияние соотношения температуры горючей струи и окислителя, а также градиента давления на конфигурацию диффузионного факела. Достоверность полученных результатов обосновывается сравнением с экспериментальными работами других авторов.

Список литературы:

1. Оран Э. Численное моделирование реагирующих потоков / Э. Оран, Дж. Борис. – М.: Мир, 1990. – 660 с.
2. Патанкар С.В. Тепло- и массообмен в пограничных слоях / С.В. Патанкар, Д.Б. Сполдинг. – М.: Энергия, 1971. – 127 с.
3. Андерсон Д. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. В 2-х томах / Д. Андерсон, Дж. Таннехилл, Р. Плетчер. – М.: Мир, 1990. – 384 с.

4. Ходжиев С. Исследование трехмерных турбулентных струй реагирующих газов, истекающих в спутном (затопленном) потоке в воздухе при диффузном горении / С. Ходжиев // Узб. Журнал. Проблемы механики. – Ташкент, Фан. – 1993. – № 2. – С. 28-33.
5. Сфорца С. Исследование трехмерных вязких струй / Стейгер Сфорца, Л. Трентакосте // Ракетная техника и космонавтика. – 1966. – № 5. – С. 42-50.
6. Ларюшкин М.А. Некоторые закономерности влияния начального уровня турбулентности на развитие прямоугольной струи / М.А. Ларюшкин. – Тр. Московского энергетического института. – 1981. – № 524. – С. 26-30.
7. Кузов К. Аэродинамика струй, истекающих из прямоугольных сопел / К. Кузов // Промышленная теплотехника. – 1990. – Т. 12. – № 4. – С. 38-44.
8. Nikjoo M. Calculation of turbulent three-dimensional jet-induced flow in rectangular enclosures / M. Nikjoo, K.C. Karki, H.C. Mongia // AIAA pap-1990, n 0684-pl-10. РФЖ. – 1991. – № 1. – С. 144
9. Мак-Гирк Дж. Дж. Расчёт трёхмерных турбулентных свободных струй / Дж. Дж. Мак-Гирк, В. Родри // Турбулентные сдвиговые течения. – М.: Машиностроение, 1982. – Т. 1. – 288 с.
10. Агулыков А. Исследование структуры трехмерных турбулентных струй / А. Агулыков, К.Е. Джаугаитин, Л. Ярин // Изд. АН СССР. – МЖГ. – 1975. – № 6. – С. 13-21.
11. Липин Ю.В. Внутреннее течение газовых смесей / Ю.В. Липин, М.Х. Стрелец. – М.: Наука, 1989. – 368 с.
12. Вулис Л.А. Аэродинамика фалека / Л.А. Вулис, Л.П. Ярин. – Л: Энергия, 1978. – 216 с.
13. Туник Ю.В. Журнал. Механика жидкости и газа. "Численное моделирование детонационного горения водородовоздушных смесей в сопле Лавалья". Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт механики. – 2010. – № 2. – С. 107-114.
14. Khudayarov B.A. Numerical Study of the Dependence of the Critical Flutter Velocity and Time of a Plate on Rheological Parameters / B.A. Khudayarov // International Applied Mechanics – 2008. – Vol. 44. – № 6. – P. 676-682.
15. Khudayarov B.A. Numerical Analysis of Nonlinear Flutter of Viscoelastic Plates. International Applied Mechanics / B.A. Khudayarov. – 2005. – Vol. 41. – № 5. – P. 538-542.
16. Khudayarov B.A. Flutter of Viscoelastic Plate in a Supersonic Gas Flow / Khudayarov B.A. // International Applied Mechanics. – 2010. – Vol. 46. – № 4. – P. 455-460.
17. Khudayarov B.A. Mathematical Simulation of nonlinear oscillations of viscoelastic pipelines conveying fluid / B.A. Khudayarov, F.Zh. Turaev // Applied Mathematical Modeling. – 2019. – Vol. 66. – P. 662-679.
18. Khudayarov B.A. Nonlinear supersonic for the viscoelastic orthotropic cylindrical shells in supersonic flow / B.A. Khudayarov, F.Zh. Turaev // Aerospace Science and technology. – 2019. – Vol. 84. – P. 120-130.

References:

1. Oran, E., and Boris, J. (1990), *Numerical modeling of reacting flows: Trans. From English*, Moscow, Mir. – 660 p.
2. Patankar, S.V., and Spalding, D.B. (1967), *Heat transfer and heat transfer in boundary layers*, Moscow, Energy, 127 p.
3. Anderson, D., Tannehill, J., and Pletcher, R. (1990), *Computational fluid mechanics and heat transfer*, In. 2-Vol., Moscow, World, Vol. 2, 384 p.

4. Khodzhiyev, S. (1993), "Investigation of three-dimensional turbulent jets of reacting gases flowing in a tandem (submerged) stream in air with diffuse combustion", *Uzb. Magazine. Problems of mechanics*, Toshkent, Fan, No. 2., pp. 28-33.
5. Sforza, Steiger, and Trentakoste L. (1966), "Study of three-dimensional viscous jets", *Rocket technology and cosmonautics*, No. 5, pp. 42-50.
6. Larushkin, M.A. (1981), "Some patterns of the wagging of the initial level of turbulence on the development of a rectangular jet", *Works of Moscow Power Engineering Institute*, No. 524, pp. 26-30.
- 7 Kuzov, K. (1990), "Aerodynamics of jets flowing from rectangular nozzles", *Industrial Heat Engineering*, Vol. 12, No. 4, pp. 38-44.
8. Nikjoo, M., Karki K.C., and Mongia, N.S. (1991), "Calculation of turbulent three-dimensional jet-induced flow in rectangular enclosures", *AIAA pap-1990*, n 0684-pl-10. RFZh, No. 1, P. 144.
9. Mak-Guirk, J.J., and Rodi, V. (1982), *Calculation of three-dimensional turbulent free jets, Turbulent Shear Flows*, Moscow, Mechanical Engineering, Vol. 1, 288 p.
10. Agulykov, A., Dzhaugashtin, K.E, and Yarin, L. (1975), "Investigation of the structure of three-dimensional turbulent jets", *Edition of the USSR Academy of Sciences-MJK*, No. 6, pp. 13-21.
11. Lapin, Yu.V., and Strelets, M.Kh. (1989), *Internal flow of gas mixtures*, Moscow, Science, 368 p.
12. Vulis, L.A., and Yarin, L.P. (1978), *Aerodynamics of a faleka*, Leningrad, Energy, 216 p.
13. Yu. V. Tunik. (2010), "Numerical simulation of detonation combustion of hydrogen-air mixtures in a Laval nozzle". *Magazine Fluid and gas mechanics. Moscow State University. M.V. Lomonosov, Research Institute of Mechanics*, No. 2, pp. 107-114.
14. 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.
15. Khudayarov, B.A. (2005), "Numerical Analysis of Nonlinear Flutter of Viscoelastic Plates", *International Applied Mechanics*, Vol. 41, No. 5, pp. 538-542.
16. Khudayarov, B.A. (2010), "Flutter of Viscoelastic Plate in a Supersonic Gas Flow", *International Applied Mechanics*, Vol. 46, No. 4, pp. 455-460.
17. Khudayarov, B.A., and Turaev, F.Zh. (2019), "Mathematical Simulation of nonlinear oscillations of viscoelastic pipelines conveying fluid", *Applied Mathematical Modeling*, Vol. 66, pp. 662-679.
18. Khudayarov, B.A., and Turaev, F.Zh. (2019), "Nonlinear supersonic for the viscoelastic orthotropic cylindrical shells in supersonic flow", *Aerospace Science and technology*, Vol. 84, pp. 120-130.

Статью представил доктор тех. наук, проф., зав. кафедры "Высшая математика" Ташкентского института инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства Б.А. Худаяров.

Надійшла (received) 11.10.2018

Atamirzaev Makhmudjan, PhD
Tashkent institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers Higher mathematics,
Str. Kari Niyazi, 39, Tashkent, Uzbekistan, 100000,
Tel: +99897 723-10-55, email: otamax99@mail.ru
ORCID ID:0000-0002-4542-1228

Yuldashev Nurilla, PhD

Tashkent institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers Higher mathematics,

Str. Kari Niyaziy, 39, Tashkent, Uzbekistan, 100000,

Tel: +998911658674, email:

ORCID ID: 0000-0002-4542-1229

УДК.591.6

Чисельне моделювання тривимірних турбулентних струменів реагуючих газів / Атамірзаєв М., Юлдашев Н. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2019. – № 13 (1338). – С. 13 – 24.

У даній роботі наводяться модифіковані моделі для обчислення турбулентної ефективної в'язкості, метод розрахунку та деякі чисельні результати дослідження тривимірних турбулентних струменів газів, що стікають з сопла прямокутної форми і поширюються в затопленому (спутному) потоці повітря при дифузійному горінні. Ил.: 4. Бібліогр.: 18 назв.

Ключові слова: турбулентні потоки; в'язкість; сопло; газів, що реагують, ефективна в'язкість.

УДК.591.6

Численное моделирование трехмерных турбулентных струй реагирующих газов / Атамирзаев М., Юлдашев Н. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2019. – № 13 (1338). – С. 13 – 24.

В данной работе приводятся модифицированные модели для вычисления турбулентной эффективной вязкости, метод расчета и некоторые численные результаты исследования трехмерных турбулентных струй реагирующих газов, истекающих из сопла прямоугольной формы и распространяющихся в затопленном (спутном) потоке воздуха при диффузионном горении. Ил.: 4. Библиогр.: 18 назв.

Ключевые слова: турбулентные струи; вязкость; сопло; реагирующие газы; эффективная вязкость.

UDC.591.6

Numerical simulation of three-dimensional turbulent jets of reacting gases / Atamirzaev M., Yuldashev N. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2019. – №.13 (1338). – P. 13 – 24.

This paper presents modified models for calculating turbulent effective viscosity, a calculation method and some numerical results of a study of three-dimensional turbulent jets of reacting gases flowing from a rectangular nozzle and propagating in a submerged (co-current) air flow during diffusion combustion. Figs.: 4. Refs.: 18 titles.

Keywords: turbulent jets; viscosity; nozzle; reacting gases; effective viscosity.

УДК 661.53:681.51

DOI: 10.20998/2411-0558.2019.13.03

А. К. БАБІЧЕНКО, канд. техн. наук, проф., НТУ "ХПІ",
М. О. ПОДУСТОВ, д-р техн. наук, зав. каф., НТУ "ХПІ",
Я. О. КРАВЧЕНКО, асп., НТУ "ХПІ",
Ю. А. БАБІЧЕНКО, канд. техн. наук, доц., УкрДУЗТ, Харків

ФОРМУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО МАСИВУ ІДЕНТИФІКАТОРА АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ БЛОКУ КОНДЕНСАЦІЇ ВИРОБНИЦТВА АМІАКУ ЗА НЕВИЗНАЧЕНОСТЕЙ

Створена алгоритмічна база для формування інформаційного масиву ідентифікатора адаптивної системи управління блоку вторинної конденсації виробництва аміаку, яка забезпечує відокремлення перехідних режимів в умовах невизначеностей та дозволяє виконати задачу ідентифікації процесів теплообміну нестационарних статичних технологічних об'єктів цього блоку. Іл.: 1. Бібліогр.: 8 назв.

Ключові слова: алгоритмічна база; інформаційний масив; ідентифікатор; адаптивна система управління; виробництво аміаку; невизначеності.

Постановка проблеми. Сучасні виробництва аміаку становлять собою складні великотоннажні енерготехнологічні комплекси і характеризуються широким застосуванням апаратів з повітряним і водяним охолодженням. Таке апаратне оформлення притаманне і для одного з основних блоків відділення синтезу, а саме вторинної конденсації, до складу якого входять конденсаційна колона і два випарники для охолодження циркуляційного газу (ЦГ). Враховуючи великотоннажність виробництва аміаку та існуюче апаратне оформлення блоку вторинної конденсації, зміна показників зовнішнього середовища зумовлює не тільки параметричну невизначеність у функціонуванні об'єкту, але і призводить до суттєвих економічних втрат внаслідок існуючих у виробничих умовах коливань температури охолодження ЦГ з -8°C до 4°C . Підвищення ж цієї температури навіть на 1°C призводить до зниження енергоефективності виробництва внаслідок збільшення річних витрат природного газу у додатковий паровий котел на 307,3 тис. нм^3 [1]. Тому мінімізація температурного режиму охолодження ЦГ у блоці вторинної конденсації за рахунок створення комп'ютерно-інтегрованих технологій управління становить актуальну проблему у загальному процесі підвищення енергоефективності виробництва аміаку.

Аналіз літератури. Згідно літературних джерел [2 – 4] створення такої комп'ютерно-інтегрованої технології в умовах невизначеностей

вимагає застосування адаптивної системи, основним елементом якої є ідентифікатор, в якому знаходиться математична модель, що безперервно уточнюється за поточною інформацією про стан об'єкта, зокрема, конденсаційної колони. Робота цього апарату відбувається в умовах сезонних та добових змін теплового навантаження. Останнє зумовлює параметричну невизначеність основного параметра зв'язку математичної моделі вищеперелічених апаратів, а саме коефіцієнта теплопередачі внаслідок утворення додаткового конденсаційного термічного опору [1]. Чисельна оцінка цієї невизначеності для таких лінійних за параметрами технологічних об'єктів найчастіше виконується із застосуванням методу стохастичної апроксимації [5, 6]. Однак цей процес ускладнюється двома обставинами.

Перша пов'язана з необхідністю обчислення теплових потоків [7], що ускладнюється, невизначеністю як величини концентрації аміаку у ЦГ, так і температури ЦГ на вході трубного простору колони, вимірювання яких на промисловому агрегаті не передбачено технологічним регламентом. При цьому алгоритм розрахунку цих невизначеностей за таких умов практично відсутній у періодичних виданнях.

Друга обставина обумовлена суттєвою інерційністю об'єкта внаслідок значної металоємності конденсаційної колони (понад 10 т), що за певних умов унеможливорює адаптацію параметра до його дійсного значення. За таких обставин виконання ідентифікації нестационарних статичних технологічних об'єктів, зокрема конденсаційної колони, з метою чисельної оцінки коефіцієнта теплопередачі вимагає створення алгоритмічної бази для відокремлення перехідних режимів.

Мета статті – створення алгоритмічної бази формування інформаційного масиву ідентифікатора конденсаційної колони блоку вторинної конденсації виробництва аміаку в умовах невизначеностей.

Промислова інформаційна система збору експериментальних даних. Збір експериментальних даних щодо реальних параметрів експлуатації блоку вторинної конденсації промислового агрегату синтезу серії АМ-1360 здійснювався за допомогою засобів мікропроцесорного інформаційно-керуючого комплексу TDC-3000 фірми "Honeywell", та частково лабораторних аналізів. Узагальнена схема блоку вторинної конденсації з основними точками контролю параметрів згідно технологічного регламенту наведена на рис. 1.

Відбір проб для лабораторних аналізів для визначення складу ЦГ (аміак, аргон, метан, азот, водень) на вході та виході конденсаційної колони здійснювався один раз за зміну. Тому частота збору усіх інших

даних по параметрам роботи блоку вторинної конденсації складала також один раз за зміну.

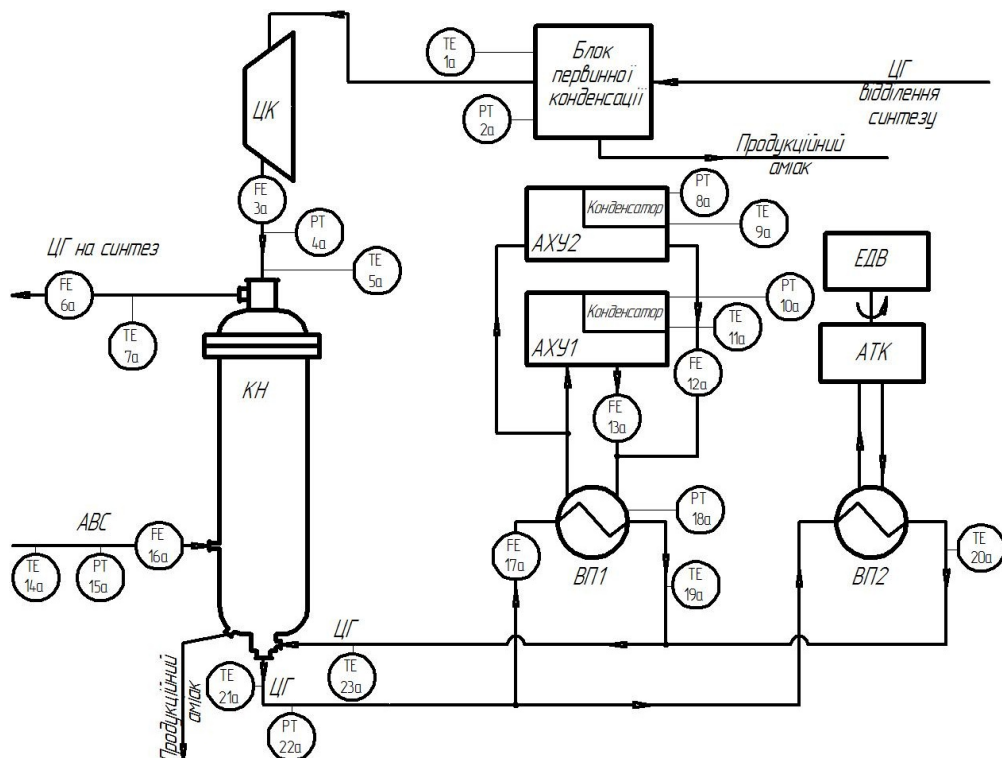


Рис. 1. Технологічна схема блоку вторинної конденсації з основними точками контролю параметрів за допомогою інформаційно-керуючого комплексу TDC-3000: ЦК – циркуляційний компресор; КН – конденсаційна колона; ВП1, ВП2 – випарники; АХУ1, АХУ2 – абсорбційно-холодильні установки; АТК – турбокомпресорний холодильний агрегат; ЕДВ – електродвигун.

При цьому аналізи передбачені цеховою лабораторією, які виконувались за допомогою хроматографа "Цвет-102", а вміст аміаку у ЦГ визначався аналітично за стандартною методикою [8].

Алгоритмічна база формування інформаційного масиву ідентифікатора. В процесі розробки алгоритму були використані рівняння математичного опису конденсаційної колони, що викладено в роботі [1]. Алгоритм містить два цикли збіжності. Перший формує режими, що забезпечують збіжність теплових потоків за рахунок теплообміну у сепараційній частині за рахунок теплообміну між ЦГ, шаром рідкого аміаку та *ABC* з метою визначення температури ЦГ на вході трубного простору конденсаційної колони. Другий цикл забезпечує

остаточне формування даних про вхідні і вихідні змінні об'єкта за умовної збіжності теплових потоків з боку трубного і міжтрубного простору теплообмінної частини конденсаційної колони. При цьому алгоритм включає такі основні функціональні блоки.

Блок 1. Виклик задачі до рішення через визначений проміжок часу або по команді оператора.

Блок 2. Відкриття файлу FORM, який обслуговує дану задачу.

Блок 3. Підпрограма читання необхідної інформації файлу DANI, де зберігається інформація про вхідні і вихідні змінні та конструктивні характеристики об'єкта, які отримані від інформаційно-керуючого комплексу TDC-3000.

Блоки 4 і 5. Завдання початкового наближення температури $\Theta_{TP}^C = \Theta_{TP}^B$ за визначенням теплових потоків Φ_{ABC} (Вт) та Φ'_{ABC} (Вт) від ABC до шару рідкого аміаку та ЦГ за рівняннями:

$$\Phi_{ABC} = M_{ABC} C_{ABC} (\Theta_{ABC}^C - \Theta_{TP}^C); \quad (1)$$

$$\Phi'_{ABC} = \Phi_{MTP}^C + \Phi_B^C; \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \Phi_{MTP}^C = & M_{MTP}^C C_{MTP}^C (\Theta_{TP}^C - \Theta_{TP}^B) + M_B^C r^C + \\ & + M_{ж}^{Ccp} C_{ж}^C (\Theta_{TP}^C - \Theta_{TP}^B); \end{aligned} \quad (3)$$

$$\Phi_B^C = G_B^C r^C; \quad (4)$$

$$G_B^C = V_{ABC} \frac{a_{NH_3}^C 0,771}{100 - a_{NH_3}^C}, \quad (5)$$

де Φ_{ABC} , Φ_B^C , Φ_{MTP}^C – кількість теплоти віддана ABC , випаровування за рахунок теплообміну у шарі рідкого аміаку та підігрів ЦГ; C_{ABC} , C_{MTP}^C , $C_{ж}^C$ – середні теплоємності відповідно ABC , газової фази ЦГ та рідкого аміаку у потоці ЦГ з випарника, кДж/(кг °С); M_{ABC} , M_{MTP}^C , M_B^C , $M_{ж}^{Ccp}$, G_B^C – масові витрати відповідно ABC , випареного аміаку в потоці ЦГ, рідкого аміаку в потоці ЦГ та випареного аміаку за рахунок теплообміну

у шарі рідкого аміаку, кг/с; V_{ABC} – об’ємна витрата ABC , $\text{м}^3/\text{с}$; Θ_{ABC}^C , Θ_{TP}^C , Θ_{TP}^B – температура відповідно ABC на вході колони, ЦГ на вході трубного простору теплообмінника колони та ЦГ на виході випарників, $^{\circ}\text{C}$; $a_{\text{NH}_3}^C$ – концентрація аміаку в потоці ЦГ на виході колони, % об.; r^C – теплота пароутворення аміаку, кДж/кг .

Блок 6. Оцінка похибки умови збіжності δ_1 та перехід у разі її виконання до другого циклу.

Блоки 7 і 8. Визначення теплових потоків з боку трубного Φ_{TP}^K (Вт) і міжтрубного Φ_{MTP}^K (Вт) простору теплообмінника конденсаційної колони за формулами:

$$\Phi_{TP}^K = M_{TP}^{\Gamma} C_{TP}^{\Pi} (\Theta_{TP}^K - \Theta_{TP}^C) + M_{\text{Ж}}^C (i_{\Pi}^K - i_{\text{Ж}}^C); \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Phi_{MTP}^K = & M_{MTP}^{\Gamma} C_{MTP}^{\Pi} (\Theta_{MTP}^K - \Theta_{MTP}^B) + M_{CK}^K r_{MTP} + \\ & + (M_{\text{Ж}}^K - 0,5 M_{CK}^K) C_{\text{Ж}}^{\Pi} (\Theta_{MTP}^K - \Theta_{MTP}^B), \end{aligned} \quad (7)$$

де M_{TP}^{Γ} , M_{MTP}^{Γ} – витрата газової фази ЦГ, кг/с ; M_{CK}^K , $M_{\text{Ж}}^K$, $M_{\text{Ж}}^C$ – витрати відповідно сконденсованого аміаку, рідкого аміаку на вході міжтрубного і трубного простору теплообмінника, кг/с ; i_{Π}^K , $i_{\text{Ж}}^C$ – ентальпія відповідно пару та рідкого аміаку на вході та виході трубного простору теплообмінника, кДж/кг ; $C_{\text{Ж}}^{\Pi}$, C_{MTP}^{Π} , C_{TP}^{Π} – середні теплоємності відповідно рідкого аміаку у міжтрубному просторі, газових фаз ЦГ міжтрубного і трубного простору теплообмінника, $\text{кДж/(кг } ^{\circ}\text{C)}$; r_{MTP} – теплота конденсації аміаку, кДж/кг ; Θ_{TP}^K , Θ_{MTP}^K , Θ_{MTP}^B – температура ЦГ відповідно на виході трубного простору, на вході та виході міжтрубного простору теплообмінника, $^{\circ}\text{C}$.

Блок 9. Оцінка похибки умови збіжності δ_2 , у разі виконання якої здійснюється перехід до розрахунку коефіцієнтів теплопередачі.

Блок 10. Виконання розрахунків теплового потоку Φ , коефіцієнтів теплопередачі за формулами прийнятими при проектуванні K_{Π} та дійсного коефіцієнта K_E [1]:

$$K_{\Pi} = \frac{1}{1/\alpha_{MTP} + R_T^{\Pi} + 1/\alpha_{TP}}; \quad (8)$$

$$K_E = \Phi / F \Delta \Theta_{CP}; \quad (9)$$

$$\alpha_{MTP} = 1,3 A \varepsilon_{\varphi} (W_{MTP})^{0,56} (d_{3OB})^{-0,44}; \quad (10)$$

$$\alpha_{TP} = A (W_{TP})^{0,8} (d_{BH})^{-0,2}, \quad (11)$$

де α_{TP} , α_{MTP} – коефіцієнти тепловіддачі з боку трубного та міжтрубного простору, Вт/(м² °С); R_T^{Π} – коефіцієнт термічного опору за проектом, м²°С/Вт; $\Delta \Theta_{CP}$ – середня різниця температур, °С; F – поверхня теплопередачі, м²; W_{TP} , W_{MTP} – вагова швидкість ЦГ у трубному та міжтрубному просторі на одиницю поверхні, кг/(м² с); ε_{φ} – поправочний коефіцієнт на кут атаки; d_{BH} , d_{3OB} – внутрішній та зовнішній діаметр теплообмінних труб, м; A – коефіцієнт, що враховує теплофізичні властивості ЦГ.

Блок 11. Формування масиву поточних даних STAB стабільних значень величин об'єкта щодо Φ_{ABC} , Φ , K_{Π} і K_E і друкування результатів.

Блок 12. Закриття файлу FORM та вихід із задачі.

Розроблена структура алгоритму дозволяє сформувати стабільний інформаційний масив поточних даних та відокремити перехідні режими. Це забезпечує можливість розрахунку дійсного коефіцієнта теплопередачі, а отже і конденсаційного термічного опору, величина якого в подальшому має бути визначена з використанням загальновідомого алгоритму стохастичної апроксимації за отриманим масивом експериментальних даних. Алгоритм реалізований в пакеті MATLAB і апробований на даних промислової експлуатації блоку вторинної конденсації агрегату синтезу аміаку Северодонецького об'єднання "Азот".

Висновки. За результатами досліджень створена алгоритмічна база для формування інформаційного масиву ідентифікатора адаптивної системи управління блоку вторинної конденсації виробництва аміаку, яка забезпечує відокремлення перехідних режимів в умовах невизначеностей. Це дозволяє в подальшому здійснити параметричну оцінку основного параметра зв'язку математичних моделей, а саме коефіцієнта теплопередачі, тобто виконати задачу ідентифікації процесів теплообміну

нестационарних статичних технологічних об'єктів блоку вторинної конденсації.

Алгоритм формування інформаційного масиву реалізовано в пакеті MATLAB і апробовано шляхом імітаційного моделювання за експериментальними даними промислової експлуатації діючих в Україні агрегатів синтезу аміаку серії АМ-1360.

Список літератури:

1. System analysis of the secondary condensation unit in the context of improving energy efficiency of ammonia production / A. Babichenko, V. Velma, J. Babichenko, Y. Kravchenko, I. Krasnikov // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2017. – Vol. 2. – Issue 6 (86). – P. 18-26.
2. Chen H.F. Optimal stochastic adaptive control with quadratic index / H.F. Chen, L. Guo // *Int. J. Contr.* – 1986. – Vol. 43. – № 3. – P. 869-881.
3. Banga J.R. Global optimization of chemical processes using stochastic algorithms / J.R. Banga, W.D. Seider // *State of the Art in Global Optimization: Computational Methods and Applications*. – 1996. – P. 563-583.
4. Chen H.F. Stochastic adaptive control for AR-MAX systems with unknown orders, time delay and coefficients / H.F. Chen, J.F. Zhang // *11-th IFAC World Congress, 1990. Preprints*. Vol. 4. – P. 81-86.
5. Ладанюк А.П. Іноваційні технології в управлінні складними біотехнологічними об'єктами агропромислового комплексу: монографія / А.П. Ладанюк, В.М. Решетюк, В.Д. Кушенько, Я.В. Смітюх. – К.: Центр учбової літератури, 2014. – 280 с.
6. Дьяконов В.П. MATLAB 6.0/6.1/6.5/6.5 + SP1 + Simulink 4/5. Обработка сигналов и изображений / В.П. Дьяконов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 592 с.
7. Технічна термодинаміка та теплопередача: навч. посіб. для студентів інж. спец. ден. та заоч. форм навчання / В.В. Малишев, В.В. Кретов, Т.М. Гладка; Відкритий міжнар. ун-т розвитку людини "Україна". – Київ : Університет "Україна", 2015. – 257 с.
8. Аналитический контроль производства в азотной промышленности. – М.: Госхимиздат, 1958. – Вып. 7. – 115 с.

References:

1. Babichenko, A., Velma, V., Babichenko, J., Kravchenko Y., and Krasnikov, I. (2017), "System analysis of the secondary condensation unit in the context of improving energy efficiency of ammonia production", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 2, Issue 6 (86), pp. 18-26.
2. Chen, H.F., and Guo, L. (1986), "Optimal stochastic adaptive control with quadratic index", *Int. J. Contr.*, Vol. 43, No. 3, pp. 869-881.
3. Banga, J.R., and Seider, W.D. (1996), "Global optimization of chemical processes using stochastic algorithms", *State of the Art in Global Optimization: Computational Methods and Applications*, pp. 563-583.
4. Chen, H.F., and Zhang, J.F. (1990), "Stochastic adaptive control for AR-MAX systems with unknown orders, time delay and coefficients", *11-th IFAC World Congress, Preprints*, Vol. 4, pp. 81-86.
5. Ladaniuk, A.P., Reshетиuk, V.M., Kyshenko, V.D., and Smitiukh, Y.V. (2014), *Innovative technologies in the management of agroindustrial complex difficult biotechnological objects*, Monograph, K.: Center of educational literature, 280 p.
6. Diakonov, V.P. (2004), *MATLAB 6.0/6.1/6.5/6.5 + SP1 + Simulink 4/5. Treatment of signals and images*, Moscow, Solon-press, 592 p.

7. Malyshev, V.V., Krietov, V.V., and Gladka, T.M. (2015), "Technical thermodynamics and heat transfer: train aid for the students of engineering specialities of daily and in absentia forms of studies", *An open international university of development of man is "Ukraine"*, Kyiv, University "Ukraine", 257 p.

8. *Analytical production control is in nitric industry* (1958), Moskow, Hoskhymyzdat, 115 p.

Статтю представив д-р техн. наук, проф. HTУ "ХПІ" Заковоротний О. Ю.

Надійшла (received) 10.05.2019

Babichenko Anatoliy, PhD Tech., Professor
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Курпичова, 2, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel.: +38 (057) 70-76-687, e-mail: babichenko_a_k@ukr.net
ORCID ID: 0000-0002-8649-9417

Podustov Mykhaylo, Dr.Sci.Tech., Professor
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Курпичова, 2, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel.: +38 (057) 70-76-687, e-mail: podustov@kpi.kharkov.ua
ORCID ID: 0000-0003-2119-1961

Kravchenko Yana, postgraduate student
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Курпичова, 2, Kharkiv, Ukraine, 61002
Tel.: +38 (057) 70-76-687, e-mail: kravchenko_y_o@ukr.net
ORCID ID: 0000-0002-6311-8060

Babichenko Juliya, PhD Tech.
Ukrainian State University of Railway Transport
Sq. Feierbakha, 7, Kharkiv, Ukraine, 61050
Tel.: (+38)097-43-90-126, e-mail: juliette-ua@ukr.net
ORCID ID: 0000-0002-5345-7595

УДК 661.53:681.51

Формування інформаційного масиву ідентифікатора адаптивної системи управління блоку конденсації виробництва аміаку за невизначеностей / Бабіченко А.К., Подустов М.О., Кравченко Я.О., Бабіченко Ю.А. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2019. – № 13 (1338). – С. 25 – 33.

Створена алгоритмічна база для формування інформаційного масиву ідентифікатора адаптивної системи управління блоку вторинної конденсації виробництва аміаку, яка забезпечує відокремлення перехідних режимів в умовах невизначеностей та дозволяє виконати задачу ідентифікації процесів теплообміну нестационарних статичних технологічних об'єктів цього блоку. Іл.: 1. Бібліогр.: 8 назв.

Ключові слова: алгоритмічна база; інформаційний масив; ідентифікатор; адаптивна система управління; виробництво аміаку; невизначеності.

УДК 661.53: 681.51

Формирование информационного массива идентификатора адаптивной системы управления блока конденсации производства аммиака при неопределенностях / Бабиченко А.К., Подустов М.А., Кравченко Я.О., Бабиченко Ю.А. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2019. – № 13 (1338). – С. 25 – 33.

Создана алгоритмическая база для формирования информационного массива идентификатора адаптивной системы управления блока вторичной конденсации производства аммиака, которая обеспечивает отделение переходных режимов в условиях неопределенности и позволяет выполнить задачу идентификации процессов теплообмена нестационарных статических технологических объектов этого блока. Ил.: 1. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: алгоритмическая база; информационный массив; идентификатор; адаптивная система управления; производство аммиака; неопределенность.

UDC 661.53: 681.51

Formation of the information array of the identifier of the adaptive control system of the ammonia production condensation unit with uncertainties / Babichenko A.K., Podustov M.O., Kravchenko Y.O., Babichenko Y.A. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2019. – №.13 (1338). – P. 25 – 33.

The created algorithmic base for the formation of an information array identifier of the adaptive control system of the block of secondary condensation of ammonia production, which provides for the separation of transient modes in conditions of uncertainty and allows you to perform the task of identifying heat transfer processes of non-stationary static technological objects of this block. Figs.: 1. Refs.: 8 titles.

Keywords: algorithmic base; information array; identifier; adaptive control system; ammonia production; uncertainties.

УДК 532.546: 519.6

DOI: 10.20998/2411-0558.2019.13.04

С. О. ГУСЕЙНЗАДЕ, Азербайджанский Государственный
Университет Нефти и Промышленности, г. Баку,

И. К. ГАДИМОВ, Азербайджанский Государственный Университет
Нефти и Промышленности, г. Баку

ОБ ОДНОЙ МОДЕЛИ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ СЛАБОСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В ТРУБОПРОВОДЕ

Рассматривается процесс нестационарного течения слабосжимаемой жидкости по трубопроводу, описываемый двумерной моделью в виде нелинейной системы дифференциальных уравнений в частных производных. Проводится осреднение модели по поперечному сечению трубопровода и предлагается зависимость напряжения трения на стенке трубопровода от скорости течения. В рамках полученной модели поставлена обратная задача по определению скорости течения на стенке трубопровода. Построен дискретный аналог поставленной задачи и предложен способ ее расщепления на простые разностные задачи относительно приближенных значений искомых функций. Библиогр.: 14 назв.

Ключевые слова: трубопровод; двумерная модель; напряжение трения на стенке трубопровода; разностная задача; обратная задача.

Постановка проблемы и анализ литературы. В настоящее время трубопроводный транспорт является наиболее эффективным средством транспортировки разнообразных жидкостей (воды, нефти, нефтепродуктов и др.). Обычно в практике проектирования трубопроводов используется допущение, согласно которому движение жидкостей рассматривается как стационарное и исходя из этого допущения, определяют расчетную пропускную способность, режим работы насосов и другие параметры потока. Однако, как показывает практика трубопроводного транспорта жидкостей, пуск или остановка трубопровода, включение или отключение перекачивающей станции, начало или прекращение отбора жидкости и другие технологические операции приводят к возникновению в трубопроводе нестационарного потока жидкостей. При этом для исследования нестационарного потока жидкостей в трубопроводах используют одномерную модель слабосжимаемой жидкости в виде системы линейных дифференциальных уравнений в частных производных относительно скорости течения и давления [1 – 3]. Эти уравнения выражают законы сохранения массы и изменения количества движения жидкости, текущей в трубопроводе. При выводе этих уравнений предполагается выполнение условия прилипания на стенке трубопровода. Однако необходимо

отметить, что проведенные многочисленные экспериментальные и численные исследования свидетельствуют о наличии условия скольжения на твердой стенке трубопровода [4 – 6]. Обычно рассматриваются три модели граничных условий на стенке трубопроводов: прилипание, проскальзывание по закону Навье и проскальзывание с предельным напряжением. Однако при исследовании течения жидкостей в трубопроводах практически невозможно определить, какое из этих граничных условий реализуется на стенке трубопровода.

В связи с этим для практики трубопроводного транспорта жидкостей важное значение имеют гидродинамические исследования нестационарных потоков в трубопроводах при неизвестном граничном условии на стенке трубопровода.

Постановка задачи. Пусть рассматривается процесс нестационарного течения слабосжимаемой вязкой жидкости в горизонтально расположенном трубопроводе с жесткими стенками. Предполагается, что ось Oz направлена вдоль оси трубопровода и поток направлен вдоль оси трубопровода. Считая течение слабосжимаемой вязкой жидкости осесимметричным, полную систему дифференциальных уравнений, описывающих данное течение можно представить в виде [3, 7]:

$$\rho_0 \frac{dv_z}{dt} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\tau) + \mu \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} - \frac{\partial p}{\partial z}, \quad \frac{\partial p}{\partial t} + \rho_0 c^2 \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial \varphi} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial \varphi} = 0, \quad (2)$$

$$0 < r < R, \quad 0 < z < l, \quad 0 < t \leq T,$$

где v_z – компонент скорости течения жидкости, направленный параллельно оси трубопровода; P – давление; $\rho_0 = \text{const}$ – плотность жидкости; μ – динамическая вязкость жидкости; c – скорость распространения звука в жидкости; l, R – длина и радиус трубопровода, $\tau = \mu \frac{\partial v_z}{\partial r}$ – напряжение трения; $\frac{dv_z}{dt} = \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z}$. Предполагается, что остальные компоненты скорости – v_r и v_φ равны нулю.

Из системы (1) следует, что v_z является функцией переменных r, z и t , а давление p не зависит от переменных r и φ , т.е.

$$v_z = v_z(r, z, t), \quad p = p(z, t).$$

Проводим процедуру осреднения уравнений системы (1). С этой целью обе части каждого уравнения умножим на $2\pi r$ и результат проинтегрируем на отрезке $[0, R]$ по переменной r , одновременно деля на площадь поперечного сечения трубопровода πR^2 . В результате будем иметь

$$\rho_0 \frac{du}{dt} = \frac{2}{R} \tau_w + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{\partial p}{\partial z}, \quad \frac{\partial p}{\partial t} + \rho_0 c^2 \frac{\partial u}{\partial z} = 0, \quad (3)$$

где $u(z, t) = 2\pi \int_0^R r v_z(r, z, t) dr / \pi R^2$ – средняя скорость по сечению

трубопровода, τ_w – напряжение трения на стенке трубопровода.

Известно, что для установления зависимости напряжения трения на стенке трубопровода от параметров течения пользуются гипотезой квазистационарности, т.е. предполагается, что напряжение трения, установленное для стационарного течения

$$\tau_w = -\lambda \frac{\rho_0 u^2}{8}, \quad (4)$$

сохраняется и для нестационарных [1 – 3], где λ – коэффициент гидравлического сопротивления. Данная формула применяется, как для турбулентного режима течения, так и ламинарного, различие заключается лишь в значениях коэффициента гидравлического сопротивления. Необходимо отметить, что формулу (4), а также явное выражение для коэффициента гидравлического сопротивления можно обосновать только лишь для стационарного ламинарного потока на основе одномерной модели течения несжимаемой жидкости по трубопроводу при использовании граничного условия прилипания на стенке трубопровода. Формулу (4) для ламинарного течения вязкой жидкости при условии прилипания на стенке трубопровода можно записать в виде [8]

$$\tau_w = -\frac{4\mu}{R} u. \quad (5)$$

Очевидно, что использование формулы (4) (или (5)) для описания напряжения трения на стенке трубопровода при условии не прилипания неправомерно. Для установления зависимости напряжения трения на стенке трубопровода от параметров потока при условии не прилипания используем подход, предложенный в [8]. В результате получим

$$\tau_w = -\frac{4\mu}{R}u + \frac{4\mu}{R}v_z|_{r=R}.$$

Предположим, что скорость течения жидкости на стенке трубопровода $v_z|_{r=R}$ зависит только от переменной t . Обозначив $f(t) = v_z|_{r=R}$, систему уравнений (3) запишем в виде

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{8\mu}{\rho_0 R^2}u + \frac{8\mu}{\rho_0 R^2}f(t) + \frac{\mu}{\rho_0} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \rho_0 c^2 \frac{\partial u}{\partial z} = 0.$$

Пусть состояние потока жидкости в трубопроводе в начальный момент времени $t = 0$ известно, т.е. для системы уравнений (6) известны следующие начальные условия

$$u(z, 0) = \phi(z), \quad (7)$$

$$p(z, 0) = \psi(z). \quad (8)$$

Предполагая, что на левом конце трубопровода обеспечивается подача жидкости в трубопровод, краевое условие при $z = 0$ можно представить в виде

$$u(0, t) = w_0(t). \quad (9)$$

А краевое условие на правом конце трубопровода $z = l$ представим в виде

$$u(l, t) = w_l(t). \quad (10)$$

Однако ввиду того, что кроме функций $u(z, t)$ и $p(z, t)$ неизвестным является также функция $f(t)$, для корректной постановки задачи, помимо условий (7) – (10), необходимо задавать дополнительное условие. Пусть дополнительное условие задано в виде

$$p(0, t) = \theta(t). \quad (11)$$

Таким образом, задача заключается в определении функций $u(z, t)$, $p(z, t)$ и $f(t)$, удовлетворяющих системе уравнений (6) и условиям (7) – (11). Поставленная задача относится к классу обратных задач, связанных с восстановлением зависимости правых частей параболических уравнений от времени [9 – 11]. Постановки и численные методы решения

обратных задач по восстановлению зависимости правых частей параболических уравнений от времени рассмотрены в [10 – 14].

Целью статьи является разработка нового численного метода решения задачи (6) – (11), основанного на построении дискретного аналога этой задачи и расщеплении ее на простые разностные задачи относительно приближенных значений неизвестных функций.

Метод решения. Построим дискретный аналог задачи (6) – (11). С этой целью сначала дискретизируем задачу по времени t . Введем равномерную разностную сетку в области $0 \leq t \leq T$ по переменной t

$\overline{t} = \{t_j = j\Delta t, j = \overline{0, m}\}$ с шагом $\Delta t = \frac{T}{m}$. Производные $\frac{\partial u(z, t)}{\partial t}$ и $\frac{\partial p(z, t)}{\partial t}$ в уравнениях системы (6) при $t_j, j = \overline{1, m}$ дискретизируем разностью "назад"

$$\left. \frac{\partial u(z, t)}{\partial t} \right|_{t=t_j} \approx \frac{u(z, t_j) - u(z, t_{j-1})}{\Delta t}, \quad \left. \frac{\partial p(z, t)}{\partial t} \right|_{t=t_j} \approx \frac{p(z, t_j) - p(z, t_{j-1})}{\Delta t}.$$

Используя явно-неявные схемы для аппроксимации операторов уравнений (6), запишем их в следующем виде

$$\begin{aligned} \frac{u^j(z) - u^{j-1}(z)}{\Delta t} + u^{j-1}(z) \frac{du^j(z)}{dz} &= -\frac{8\mu}{\rho_0 R^2} u^j(z) + \\ &+ \frac{8\mu}{\rho_0 R^2} f^j + \frac{\mu}{\rho_0} \frac{d^2 u^j(z)}{dz^2} - \frac{1}{\rho_0} \frac{dp^j(z)}{dz}, \\ \frac{p^j(z) - p^{j-1}(z)}{\Delta t} + \rho_0 c^2 \frac{du^j(z)}{dz} &= 0, \\ j &= 1, 2, \dots, m, \end{aligned}$$

$$u^0(z) = \phi(z), \quad p^0(z) = \psi(z),$$

где $u^j(z) \approx u(z, t_j)$, $p^j(z) \approx p(z, t_j)$, $f^j \approx f(t_j)$.

Из второго уравнения последней системы найдем $p^j(z)$

$$p^j(z) = p^{j-1}(z) - \rho_0 c^2 \Delta t \frac{du^j(z)}{dz}, \quad (12)$$

и полученное выражение подставим в первое уравнение системы. В результате будем иметь

$$\begin{aligned} \frac{u^j(z) - u^{j-1}(z)}{\Delta t} + u^{j-1}(z) \frac{du^j(z)}{dz} = -\sigma u^j(z) + \\ + \left(\frac{\mu}{\rho_0} + c^2 \Delta t \right) \frac{d^2 u^j(z)}{dz^2} - \frac{1}{\rho_0} \frac{dp^{j-1}(z)}{dz} + \sigma f^j, \end{aligned} \quad (13)$$

где $\sigma = \frac{8\mu}{\rho_0 R^2}$.

А краевые условия для уравнения (13) принимают вид

$$u^j(0) = w_0^j, \quad (14)$$

$$u^j(l) = w_l^j, \quad (15)$$

где $w_0^j = w_0(t_j)$, $w_l^j = w_l(t_j)$.

Очевидно, что условия (14) и (15) недостаточны для определения двух неизвестных – $u^j(x)$ и f^j , из уравнения (13). Запишем уравнение (12) при $z = 0$

$$p^j(0) = p^{j-1}(0) - \rho_0 c^2 \Delta t \frac{du^j(0)}{dz}.$$

Отсюда, учитывая краевое условие (11), получим дополнительное условие для уравнения (13)

$$\frac{du^j(0)}{dz} = -\frac{\theta^j - \theta^{j-1}}{\rho_0 c^2 \Delta t}, \quad (16)$$

где $\theta^j = \theta(t_j)$.

Теперь полученную задачу (12) – (16) дискретизируем по переменной z . С этой целью введем равномерную разностную сетку по переменной z в области $[0 < z < l]$

$$\overline{\omega}_z = \{z_i = i\Delta z, i = \overline{0, n}, \Delta z = l/n\}.$$

Дискретный аналог задачи (12) – (16) на сетке $\overline{\omega}_z$ представим в виде

$$\frac{u_i^j - u_i^{j-1}}{\Delta t} + u_i^{j-1} \frac{u_i^j - u_{i-1}^j}{\Delta z} = -\sigma u_i^j + \left(\frac{\mu}{\rho_0} + c^2 \Delta t \right) \frac{u_{i+1}^j - 2u_i^j + u_{i-1}^j}{\Delta z^2} -$$

$$- \frac{1}{\rho_0} \frac{p_i^{j-1} - p_{i-1}^{j-1}}{\Delta z} + \sigma f^j,$$

$$p_i^j = p_i^{j-1} - \rho_0 c^2 \Delta t \frac{u_i^j - u_{i-1}^j}{\Delta z},$$

$$\frac{u_1^j - u_0^j}{\Delta z} = - \frac{\theta^j - \theta^{j-1}}{\rho_0 c^2 \Delta t},$$

$$u_n^j = w_l^j,$$

$$u_0^j = w_0^j,$$

где $u_i^j \approx u(z_i, t_j)$, $p_i^j \approx p(z_i, t_j)$.

Полученную систему разностных уравнений преобразуем к виду

$$a_i u_{i-1}^j - d_i u_i^j + b_i u_{i+1}^j = \Delta t \Delta z (p_i^{j-1} - p_{i-1}^{j-1}) / \rho_0 - \Delta z^2 u_i^{j-1} - \Delta t \Delta z^2 \sigma f^j, \quad (17)$$

$$i = \overline{1, n-1},$$

$$u_0^j = u_1^j + \frac{\Delta z (\theta^j - \theta^{j-1})}{\rho_0 c^2 \Delta t}, \quad (18)$$

$$u_0^j = w_0^j, \quad (19)$$

$$u_n^j = w_l^j, \quad (20)$$

$$p_i^j = p_i^{j-1} - \rho_0 c^2 \Delta t \frac{u_i^j - u_{i-1}^j}{\Delta z}, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (21)$$

$$u_i^0 = \phi(z_i), \quad p_i^0 = \psi(z_i), \quad i = \overline{0, n}, \quad (22)$$

где $a_i = \Delta t \Delta z u_i^{j-1} + \Delta t (\mu / \rho_0 + c^2 \Delta t)$, $b_i = \Delta t (\mu / \rho_0 + c^2 \Delta t)$,

$$d_i = a_i + b_i + \Delta z^2 + \Delta t \Delta z^2 \sigma.$$

Разностная задача (17) – (22) представляет собой систему линейных алгебраических уравнений, в которой в качестве неизвестных выступают приближенные значения искомых функций $u(z, t)$, $p(z, t)$ и $f(t)$ во

внутренних узлах разностной сетки $\overline{\omega}_i \times \overline{\omega}_z$, т.е. $u_i^j, p_i^j, f^j, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}$.

Однако очевидно, что при каждом фиксированном значении $j, j = 1, 2, \dots, m$ разностную задачу (17) – (22) можно расщепить на две разностные задачи: первая задача (17) – (20) относительно переменных $u_i^j, f^j, i = \overline{1, n-1}$ и вторая задача (21) относительно переменных $p_i^j, i = \overline{1, n}$. Причем определив решение первой задачи, решение второй задачи можно найти по явной формуле.

Теперь предположим, что решение системы уравнений (17) – (20) при каждом фиксированном значении $j, j = 1, 2, \dots, m$ можно представить в виде

$$u_i^j = \alpha_i u_{i-1}^j + \beta_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (23)$$

где α_i, β_i – неизвестные пока коэффициенты. Запишем аналогичное выражение для u_{i+1}^j

$$u_{i+1}^j = \alpha_{i+1} u_i^j + \beta_{i+1}.$$

Подставляя выражение для u_{i+1}^j в уравнение (17), получим следующие нелинейные уравнения для определения коэффициентов α_i, β_i :

$$\alpha_i = \frac{a_i}{d_i - b_i \alpha_{i+1}}, \quad (24)$$

$$\beta_i = \frac{b_i}{d_i - b_i \alpha_{i+1}} \beta_{i+1} + \frac{\Delta z^2 u_i^{j-1} - \Delta t \Delta z (p_i^{j-1} - p_{i-1}^{j-1}) / \rho_0}{d_i - b_i \alpha_{i+1}} + \frac{\Delta t \Delta z^2 \sigma}{d_i - b_i \alpha_{i+1}} f^j, \quad (25)$$

$$i = n-1, n-2, \dots, 1.$$

Уравнения (24), (25) представляют собой нелинейные разностные уравнения первого порядка. Для решения этих уравнений необходимо задавать начальные значения коэффициентов α_i, β_i . Эти начальные значения находим из требования эквивалентности представления (23) при $i = n$, т.е. $u_n^j = \alpha_n u_{n-1}^j + \beta_n$, условию (20)

$$\alpha_n = 0,$$

$$\beta_n = w_l^j. \quad (26)$$

Таким образом, определив α_n , остальные значения коэффициентов α_i , $i = n-1, n-2, \dots, 1$ последовательно можно найти по формуле (24).

С целью разделения переменных в нелинейном уравнении для β_i , представим его в виде [14]

$$\beta_i = \xi_i + \eta_i f^j, \quad i = n-1, n-2, \dots, 1, \quad (27)$$

где ξ_i , η_i – неизвестные переменные.

Подставив соотношение (27) в уравнение (25), будем иметь

$$\begin{aligned} \xi_i + \eta_i f^j &= \frac{b_i}{d_i - b_i \alpha_{i+1}} \xi_{i+1} + \frac{b_i}{d_i - b_i \alpha_{i+1}} \eta_{i+1} f^j + \\ &+ \frac{\Delta z^2 u_i^{j-1} - \Delta t \Delta z (p_i^{j-1} - p_{i-1}^{j-1}) / \rho_0}{d_i - b_i \alpha_{i+1}} + \frac{\Delta t \Delta z^2 \sigma}{d_i - b_i \alpha_{i+1}} f^j \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} \left[\xi_i - \frac{b_i}{d_i - b_i \alpha_{i+1}} \xi_{i+1} - \frac{\Delta z^2 u_i^{j-1} - \Delta t \Delta z (p_i^{j-1} - p_{i-1}^{j-1}) / \rho_0}{d_i - b_i \alpha_{i+1}} \right] + \\ + f^j \left[\eta_i - \frac{b_i}{d_i - b_i \alpha_{i+1}} \eta_{i+1} - \frac{\Delta t \Delta z^2 \sigma}{d_i - b_i \alpha_{i+1}} \right] = 0. \end{aligned}$$

Соотношение (27) также подставим в (26) $\xi_n + \eta_n f^j = w_l^j$.

Из последних соотношений получим следующие разностные задачи для определения вспомогательных переменных ξ_i , η_i :

$$\xi_i - \frac{b_i}{d_i - b_i \alpha_{i+1}} \xi_{i+1} - \frac{\Delta z^2 u_i^{j-1} - \Delta t \Delta z (p_i^{j-1} - p_{i-1}^{j-1}) / \rho_0}{d_i - b_i \alpha_{i+1}} = 0, \quad (28)$$

$$i = n-1, n-2, \dots, 1,$$

$$\xi_n = w_l^j. \quad (29)$$

$$\eta_i - \frac{b_i}{d_i - b_i \alpha_{i+1}} \eta_{i+1} - \frac{\Delta t \Delta z^2 \sigma}{d_i - b_i \alpha_{i+1}} = 0, \quad i = n-1, n-2, \dots, 1, \quad (30)$$

$$\eta_n = 0. \quad (31)$$

Разностные задачи (28), (29) и (30), (31) представляют собой линейные разностные задачи первого порядка. Решения этих задач можно записать в явном виде. С этой целью уравнение (28) запишем в виде

$$\xi_i = s_i \xi_{i+1} + y_i,$$

$$\text{где } s_i = \frac{b_i}{d_i - b_i \alpha_{i+1}}, \quad y_i = \frac{\Delta z^2 u_i^{j-1} - \Delta t \Delta z (p_i^{j-1} - p_{i-1}^{j-1}) / \rho_0}{d_i - b_i \alpha_{i+1}}.$$

Подставив сюда выражение для ξ_{i+1}

$$\xi_{i+1} = s_{i+1} \xi_{i+2} + y_{i+1},$$

будем иметь

$$\xi_i = s_i s_{i+1} \xi_{i+2} + s_i y_{i+1} + y_i.$$

Далее, подставляя в последнее уравнение выражения для $\xi_{i+2}, \xi_{i+3}, \dots, \xi_{n-1}$, получим

$$\xi_i = \xi_n \prod_{k=i}^{n-1} s_k + \sum_{\substack{k=i+1 \\ k \leq n-1}}^{n-1} y_k \prod_{e=i}^{k-1} s_e + y_i, \quad i = n-1, n-2, \dots, 1.$$

Аналогично определяется решение разностной задачи (30), (31)

$$\eta_i = \eta_n \prod_{k=1}^{n-1} s_k + \sum_{\substack{k=i+1 \\ k \leq n-1}}^{n-1} v_k \prod_{e=i}^{k-1} s_e + v_i, \quad i = n-1, n-2, \dots, 1,$$

$$\text{где } v_i = \frac{\Delta t \Delta z^2 \sigma}{d_i - b_i \alpha_{i+1}}.$$

Учитывая представление (27) для коэффициентов β_i , решение системы уравнений (17) – (20) при каждом фиксированном значении j , $j = 1, 2, \dots, m$ можно представить в виде рекуррентного соотношения

$$u_i^j = \alpha_i u_{i-1}^j + \xi_i + \eta_i f^j, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (33)$$

В последнем соотношении принимая $i = 1$ и учитывая условия (18), (19), будем иметь

$$w_0^j - \frac{\Delta z (\theta^j - \theta^{j-1})}{\rho_0 c^2 \Delta t} = \alpha_1 w_0^j + \xi_1 + \eta_1 f^j.$$

Отсюда можно определить приближенное значение искомой функции $f(t)$ при $t = t_j$, т.е. f^j

$$f^j = \frac{w_0^j(1 - \alpha_1) - \xi_1 - \Delta z(\theta^j - \theta^{j-1})/\rho_0 c^2 \Delta t}{\eta_1}. \quad (34)$$

Таким образом, вычислительный алгоритм решения разностной задачи (17) – (22) по определению u_i^j , p_i^j , $i = \overline{0, n}$ и f^j при каждом фиксированном значении $j = 1, 2, \dots, m$, основан на решении двух линейных разностных задач первого порядка (28), (29) и (30), (31) относительно вспомогательных переменных ξ_i , η_i ; определении f^j из (34); использовании представления (33) для u_i^j и, наконец, определения p_i^j из (21).

Очевидно, что для применимости предложенного вычислительного алгоритма необходимо выполнение условия

$$\eta_1 = \sum_{k=2}^{n-1} v_k \prod_{e=1}^{k-1} s_e + v_1 \neq 0,$$

$$\text{где } s_i = \frac{b_i}{d_i - b_i \alpha_{i+1}}, \quad v_i = \frac{\Delta t \Delta z^2 \sigma}{d_i - b_i \alpha_{i+1}}, \quad a_i > 0, \quad b_i > 0, \quad d_i > a_i + b_i, \\ 0 < \alpha_{i+1} < 1, \quad i = \overline{1, n-1}.$$

Несложный анализ показывает, что

$$0 < s_i = \frac{b_i}{d_i - b_i \alpha_{i+1}} = \frac{b_i}{(d_i - a_i - b_i) + a_i + (1 - \alpha_{i+1})b_i} < 1, \quad v_i > 0, \quad i = \overline{1, n-1}.$$

Следовательно, η_1 не обращается в нуль и выполняется условие $\eta_1 > 0$.

Выводы. Предложены новая математическая модель процесса нестационарного течения слабосжимаемой жидкости по трубопроводу при неизвестном граничном условии на стенке трубопровода и метод ее численной реализации. Предложенный подход позволяет найти распределения скорости течения жидкости и давления в трубопроводе при каждом дискретном значении временной переменной.

Список литературы:

1. Чарный И.А. Неуставившееся движение реальной жидкости в трубах / И.А. Чарный. – М.: Недра, 1975.
2. Басниев К.С. Нефтегазовая гидромеханика / К.С. Басниев, Н.М. Дмитриев, Г.Д. Розенберг. – Москва – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2005.
3. Лурье М.В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа / М.В. Лурье. – М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2012. – 456 с.
4. Neto Chiara. Boundary slip in Newtonian liquids: a review of experimental studies / Chiara Neto, Evans, R. Drew, Elmar Bonaccorso, Hans-Jürgen Butt, Vincent S.J. Craig // Reports on Progress in Physics. – 2005. – Vol. 68. – Issue 12. – P. 2859-2897.
5. Lauga E. Microfluidics: the no-slip boundary condition in Handbook of Experimental Fluid Dynamics / E. Lauga, M.P. Brenner, H.A. Stone. – New York: Springer, 2006. – P. 1219-1240.
6. Гамзаев Х.М. Численный метод решения одной нелокальной задачи трубопроводного транспорта вязких жидкостей / Х.М. Гамзаев // Вестник ЮУрГУ. Серия "Математика. Механика. Физика". – 2017. – Т. 9. – № 2. – С. 5-12.
7. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.
8. Гамзаев Х.М. К определению коэффициента гидравлического сопротивления / Х.М. Гамзаев, К.Ф. Ширинов // Известия НАН Азербайджана, серия физико-технических и математических наук. – 1998. – Т. XVIII. – № 6. – С. 143-146.
9. Алифанов О.М. Экстремальные методы решения некорректных задач / О.М. Алифанов, Е.А. Артюхин, С.В. Румянцев. – М.: Наука, 1988.
10. Самарский А.А. Численные методы решения обратных задач математической физики / А.А. Самарский, П.Н. Вабищевич. – М.: Издательство ЛКИ, 2009. – 480 с.
11. Borukhov V.T. Identification of a time-dependent source term in nonlinear hyperbolic or parabolic heat equation / V.T. Borukhov, G.M. Zayats // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2015. – Vol. 91. – P. 1106-1113.
12. Вабищевич П.Н. Вычислительная идентификация правой части параболического уравнения / П.Н. Вабищевич, В.И. Васильев, М.В. Васильева // Журн. вычислит. математики и мат. физики. – 2015. – Т. 55. – № 6. – С. 1020-1027.
13. Deng Z.C. An inverse problem of identifying the source coefficient in a degenerate heat equation / Z.C. Deng, K. Qian, X.B. Rao, L. Yang, G.W. Luo // Inverse Problems in Science and Engineering. – 2015. – 23 (3). – P.498-517.
14. Gamzaev Kh.M. Numerical Solution of Combined Inverse Problem for Generalized Burgers Equation / Kh.M. Gamzaev // Journal of Mathematical Sciences. – 2017. – Vol. 221. – № 6. – P. 833-839.

References:

1. Charny, I.A. (1975), *Unsteady motion of a real fluid in pipes*, Moscow, Nedra.
2. Basniev, K.S., Dmitriev, N.M., and Rosenberg, G.D. (2005), *Oil and gas hydromechanics*, Moscow-Izhevsk, Institute of Computer Science.
3. Lurie, M.V. (2012), *Mathematical modeling of pipeline processes of oil, petroleum products and gas*, Moscow, RSU of Oil and Gas name by Gubkin, 456 p.
4. Neto, Chiara, Evans, Drew R. Bonaccorso, Elmar, Butt, Hans-Jürgen, Craig, and Vincent, S.J. (2005), "Boundary slip in Newtonian liquids: a review of experimental studies", *Reports on Progress in Physics*, Vol. 68, Issue 12, pp. 2859-2897.
5. Lauga, E., Brenner, M.P., Stone, H.A. (2006), *Microfluidics: the no-slip boundary condition in Handbook of Experimental Fluid Dynamics*. New York, Springer, pp. 1219-1240.

6. Hamzayev, Kh.M. (2017), "A numerical method for solving a single non-local problem of pipeline transport of viscous liquids", *Bulletin of SUSU. Series "Mathematics. Mechanics. Physics"*, Vol. 9, No. 2, pp. 5-12.
7. Loitsyansky, L.G. (2003), *Fluid and gas mechanics*, Moscow, Drofa, 840 p.
8. Hamzayev, H.M., and Shirinov, K.F. (1998), "On the determination of the coefficient of hydraulic resistance", *News of the National Academy of Sciences of Azerbaijan, a series of physico-technical and mathematical sciences*, Vol. XVIII, No. 6, pp. 143-146.
9. Alifanov, O.M., Artyukhin, E.A., and Rumyantsev, S.V. (1988), *Extreme methods for solving ill-posed problems*, Moscow, Science.
10. Samarskiy, A.A., Vabishchevich, P.N. (2009), *Numerical methods for solving inverse problems of mathematical physics*, Publishing House LKI, Moscow, 480 p.
11. Borukhov, V.T., Zayats G.M. (2015), "Identification of a time-dependent source term in nonlinear hyperbolic or parabolic heat equation", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 91, pp. 1106-1113.
12. Vabishchevich, P.N., Vasiliev, V.I., and Vasilyeva, M.V. (2015), "Computational Identification of the Right Part of a Parabolic Equation, Zh. will calculate", *Mathematics and mat. physics*, Vol. 55, No. 6, pp. 1020-1027.
13. Deng, Z.C., Qian, K., Rao, X.B., Yang, L. and Luo, G.W. (2015), "An inverse problem of identifying the source coefficient in a degenerate heat equation", *Inverse Problems in Science and Engineering*, 23 (3), pp. 498-517.
14. Gamzaev, Kh.M. (2017), "Numerical Solution of Combined Inverse Problem for Generalized Burgers Equation", *Journal of Mathematical Sciences*, Vol. 221, No. 6, March 28, pp. 833-839.

Статтю представив д.т.н., проф. кафедри "Общая и прикладная математика" Азербайджанского государственного университета нефти и промышленности Х.М. Гамзаев.

Поступила (received) 30.04.2019

Huseynzade Sevil Oktay gyzy, Dotcent,
Azerbaijan State University of Oil and Industry,
Department of General and Applied Mathematics
Azadlig Avenue, 20, AZ 1010 Baku
e-mail: sevilhuseynzade@gmail.com

Gadimov Ilgar Kamil oglu, dissertator,
Azerbaijan State University of Oil and Industry,
Department of General and Applied Mathematics
Azadlig Avenue, 20, AZ 1010 Baku,
e-mail: qadimovilqar@gmail.com

УДК 532.546: 519.6

Про одну модель нестационарної течії слабостисливої рідини в трубопроводі / Гусейнзаде С.О., Гадімов І.К. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2019. – № 13 (1338). – С. 34 – 47.

Розглядається процес нестационарної течії слабостисливої рідини по трубопроводу, що описується двовимірною моделлю у вигляді нелінійної системи диференціальних рівнянь у частинних похідних. Проводиться осереднення моделі за поперечним перерізом трубопроводу і пропонується залежність напруги тертя на стінці трубопроводу від швидкості течії. В рамках отриманої моделі поставлена зворотна задача по визначенню швидкості течії на стінці трубопроводу. Побудований дискретний аналог поставленої задачі і запропонований спосіб її розщеплення на прості різницеві задачі щодо наближених значень шуканих функцій. Бібліогр.: 14 назв.

Ключові слова: трубопровід; двовимірна модель; напруга тертя на стінці трубопроводу; різницева задача; зворотна задача.

УДК 532.546: 519.6

Об одной модели нестационарного течения слабосжимаемой жидкости в трубопроводе / Гусейнзаде С.О., Гадимов И.К. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2019. – № 13 (1338). – С. 34 – 47.

Рассматривается процесс нестационарного течения слабосжимаемой жидкости по трубопроводу, описываемый двумерной моделью в виде нелинейной системы дифференциальных уравнений в частных производных. Проводится усреднение модели по поперечному сечению трубопровода и предлагается зависимость напряжения трения на стенке трубопровода от скорости течения. В рамках полученной модели поставлена обратная задача по определению скорости течения на стенке трубопровода. Построен дискретный аналог поставленной задачи и предложен способ ее расщепления на простые разностные задачи относительно приближенных значений искомых функций. Библиогр.: 14 назв.

Ключевые слова: трубопровод; двумерная модель; напряжение трения на стенке трубопровода; разностная задача; обратная задача.

UDC 532.546: 519.6

About one model of non-stationary flows of a weakly compressible liquid in a pipeline / Huseynzade S.O., Gadimov I.K. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2019. – №.13 (1338). – P. 34 – 47.

The process of unsteady flow of a weakly compressible fluid through a pipeline, described by a two-dimensional model in the form of a nonlinear system of partial differential equations, is considered. The model is averaged over the cross section of the pipeline and the dependence of the friction stress on the pipe wall on the flow velocity is proposed. Within the framework of the model obtained, the inverse problem was posed to determine the flow velocity on the pipeline wall. A discrete analogue of the problem is constructed and a method for its splitting into simple difference problems with respect to the approximate values of the unknown functions is proposed. Refs.: 14 titles.

Keywords: pipeline; two-dimensional model; friction stress on the pipe wall; difference problem; inverse problem.

УДК:519.711.3

DOI: 10.20998/2411-0558.2019.13.05

А. Х. ТОЙИРОВ, PhD., Термезский государственный университет,
Термез,

Х. Ф. ХОЛТУРАЕВ, асс., Ташкентский институт инженеров
ирригации и механизации сельского хозяйства, Ташкент

О ПРОБЛЕМЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

В статье с использованием метода малых возмущений получены математические модели гидродинамической устойчивости для однофазных потоков. Для аппроксимаций уравнений устойчивости применяется спектрально-сеточный метод. Он объединяет в себе высокую точность спектрального метода неравномерных сеток и позволяет определить сразу все собственные значения рассматриваемой проблемы. Ил.: 1. Табл.: 1. Библиогр.: 11 назв.

Ключевые слова: гидродинамическая устойчивость; метод малых возмущений; аппроксимация уравнений устойчивости; спектрально-сеточный метод; метод неравномерных сеток.

Постановка проблемы и анализ литературы. Математические модели, характеризующие движение вязкой несжимаемой жидкости, описываются уравнениями Навье-Стокса [1 – 3]:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right), \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right), \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} &= 0,\end{aligned}\tag{1}$$

где u , v – продольная и поперечная компоненты скорости несжимаемой жидкости; p – давление, $Re = \rho UL/\mu$ – числа Рейнольдса; ρ – плотность; μ – вязкость жидкости; U и L – характерные масштабы скорости и длины соответственно.

Для исследования устойчивости решения системы (1) представим, как обычно, продольную компоненту скорости и давление в виде суперпозиции основного ламинарного течения $U(y)$ и малого возмущения:

$$\begin{aligned}
 u(x, y, t) &= U(y) + \tilde{u}(x, y, t), \\
 \vartheta(x, y, t) &= \tilde{\vartheta}(x, y, t), \\
 p(x, y, t) &= P(x, y) + \tilde{p}(x, y, t).
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Систему (1) записываем с учетом (2) и, оставляя в полученных уравнениях только члены первого порядка малости по возмущениям, имеем

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \tilde{u}}{\partial t} + U \frac{\partial \tilde{u}}{\partial x} + \tilde{\vartheta} \frac{dU}{dy} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x} &= \frac{1}{Re} \left(\frac{d^2 U}{dy^2} + \Delta \tilde{u} \right), \\
 \frac{\partial \tilde{\vartheta}}{\partial t} + U \frac{\partial \tilde{\vartheta}}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial \tilde{p}}{\partial y} &= \frac{1}{Re} \Delta \tilde{\vartheta}, \\
 \frac{\partial \tilde{u}}{\partial x} + \frac{\partial \tilde{\vartheta}}{\partial y} &= 0, \quad \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}.
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Если учитывать, что основное течение само по себе удовлетворяет уравнениям Навье-Стокса, т.е.

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{1}{Re} \frac{d^2 U}{dy^2}, \quad \frac{\partial P}{\partial y} = 0,$$

то система (3) принимает вид

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \tilde{u}}{\partial t} + U \frac{\partial \tilde{u}}{\partial x} + \tilde{\vartheta} \frac{dU}{dy} &= -\frac{\partial \tilde{p}}{\partial x} + \frac{1}{Re} \Delta \tilde{u}, \\
 \frac{\partial \tilde{\vartheta}}{\partial t} + U \frac{\partial \tilde{\vartheta}}{\partial x} &= -\frac{\partial \tilde{p}}{\partial y} + \frac{1}{Re} \Delta \tilde{\vartheta},
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

$$\frac{\partial \tilde{u}}{\partial x} + \frac{\partial \tilde{\vartheta}}{\partial y} = 0.
 \tag{5}$$

Вводим функцию тока для возмущающего движения в виде

$$\Psi(x, y, t) = \psi(y) \cdot e^{i(kx - \omega t)},
 \tag{6}$$

где $\psi(y) = \psi_r + i\psi_i$ – комплексная амплитуда возмущений; k – вещественная величина, связанная с длиной ℓ – волны возмущения соотношением $\ell = 2\pi/k$. Величина ω – комплексная, $\omega = \omega_r + i\omega_i$, где

ω_r – круговая частота отдельного колебания, а ω_i – коэффициент нарастания, т.е. величина, позволяющая судить, нарастает или затухает колебание. Если $\omega_i < 0$, то колебание затухает и ламинарное течение устойчиво, если же $\omega_i > 0$, то имеет место неустойчивость. Кроме величин k и ω целесообразно ввести также их отношение $\lambda = \omega / k = \lambda_r + i\lambda_i$. Величина λ_r представляет собой скорость распространения волн в направлении x (фазовая скорость), а λ_i опять является величиной, позволяющей судить о затухании или возрастании колебания.

Амплитуда $\psi(y)$ возмущающего движения принята зависящей только от переменной y потому, что основное течение также зависит только от y . Для функции тока (6) имеем

$$\tilde{u} = \frac{\partial \Psi}{\partial y} = \psi'(y)e^{i(kx - \omega t)}, \quad \tilde{v} = -\frac{\partial \Psi}{\partial x} = -ik\psi(y)e^{i(kx - \omega t)},$$

тем самым интегрируется уравнение неразрывности (5), а из системы (4) получаем проблему на собственные значения для уравнения Орра – Зоммерфельда [1, 4 – 8]:

$$\frac{1}{ikRe} D^2 \psi - \left((U(\eta) - \lambda)D + \frac{d^2 U}{d\eta^2} \right) \psi = 0, \quad (7)$$

$$\eta_0 < \eta < \eta_l,$$

$$\psi(\eta_0) = \frac{d\psi}{d\eta}(\eta_0) = 0, \quad \psi(\eta_l) = \frac{d\psi}{d\eta}(\eta_l) = 0 \quad (8)$$

с однородными краевыми условиями, которые означают требования непроницаемости и прилипания. Здесь $D = \frac{d^2}{d\eta^2} - k^2$ – дифференциальный оператор; $U(\eta)$ – профиль скорости основного течения; η – координата, направленная поперек основного течения; k – волновое число; Re – число Рейнольдса; $\psi(\eta)$ – амплитуды функции тока для возмущений; $\lambda = \lambda_r + i\lambda_i$ – собственные значения задачи, где λ_r – фазовая скорость волнового возмущения; λ_r – коэффициент нарастания. Если $\lambda_i > 0$, то течение неустойчиво, если $\lambda_i < 0$, то оно устойчиво. Если же $\lambda_i = 0$, то колебания нейтрально устойчивы.

В работах [1, 4 – 8] исследование методы нахождения собственных значений для уравнения Орра-Зоммерфельда. В работе [2] исследован эффективный метод решения уравнения Орра-Зоммерфельда. А в работах [3, 9 – 11] созданы математические модели задач о гидродинамической устойчивости однофазных потоков. Однако существующие методы численного моделирования гидродинамической устойчивости весьма трудоемки, что требует разработки новых методов для исследования гидродинамики и устойчивости.

Цель статьи – изложить новый спектрально-сеточный метод (ССМ) – эффективный математический аппарат для численного моделирования проблемы гидродинамической устойчивости. Он объединяет в себе высокую точность спектральных методов с экономичностью метода неравномерных сеток и позволяет определить сразу все собственные значения задачи.

ССМ предназначен для моделирования уравнения устойчивости однофазных гидродинамических систем, описываемых проблемой на собственные значения (7) – (8). Интервал интегрирования $[\eta_0, \eta_l]$ разобьем на сетку и получим N различных элементов:

$$[\eta_0, \eta_1], [\eta_1, \eta_2], \dots, [\eta_j, \eta_{j+1}], \dots, [\eta_{N-1}, \eta_N].$$

Дифференциальное уравнение (7) на каждом из этих элементов принимает вид

$$D^2\psi_j - ikRe[(U_j(\eta) - \lambda)D - U_j''(\eta)]\psi_j = 0, \quad j = 1, 2, \dots, N. \quad (9)$$

Краевые условия (8) записываются в точках η_0 и η_N :

$$\psi_1(\eta_0) = \frac{d\psi_1}{d\eta}(\eta_0) = 0, \quad \psi_N(\eta_N) = \frac{d\psi_N}{d\eta}(\eta_N) = 0. \quad (10)$$

Во внутренних узлах сетки потребуем непрерывность решения уравнения (9) и его производных до 3-го порядка:

$$\psi_j^{(t)}(\eta_j) = \psi_{j+1}^{(t)}(\eta_j), \quad t = 0, 1, 2, 3; \quad j = 1, 2, \dots, N-1, \quad (11)$$

где t указывает порядок производной.

Для представления решения уравнений (9) – (11) в виде ряда по полиномам Чебышева первого рода каждый элемент $[\eta_j, \eta_{j+1}]$ отображаем на интервал $[-1, 1]$. После этого преобразования уравнения (9) принимают вид

$$L_j \psi_j = \{D_j^2 - ik_j \operatorname{Re}_j[(U_j(o') - \lambda)D_j - U_j''(o')]\} \psi_j = 0, \quad (12)$$

$$j = 1, 2, \dots, N,$$

где

$$D_j = \frac{d^2}{dy_j^2} - k_j^2, \quad k_j = \frac{l_j}{2} k, \quad \operatorname{Re}_j = \frac{l_j}{2} \operatorname{Re}.$$

Из условий (10), (11) имеем

$$\begin{aligned} \psi_1(-1) &= 0, \quad \frac{d\psi_1}{dy}(-1) = 0, \\ l_j^{-t} \psi_j^{(t)}(+1) &= l_{j+1}^{-t} \psi_{j+1}^{(t)}(-1), \\ t &= 0, 1, 2, 3; \quad j = 1, 2, \dots, N-1, \\ \psi_N(+1) &= 0, \quad \frac{d\psi_N}{dy}(+1) = 0, \end{aligned} \quad (13)$$

через $l_j = \eta_j - \eta_{j-1}$ обозначена длина j -го элемента сетки.

Приближенное решение задачи (12) – (13) на каждом из элементов сетки ищем в виде

$$\begin{aligned} \psi_j(y) &= \sum_{n=0}^{p_j} a_n^{(j)} T_n(y), \\ U_j(y_e^j) &= \sum_{n=0}^{p_j} b_n^{(j)} T_n(y_e^j), \end{aligned} \quad (14)$$

$$y_e^j = \cos(\pi \cdot l/p_j), \quad l = 0, 1, 2, \dots, p_j; \quad j = 1, 2, \dots, N,$$

где $T_n(y)$ – полиномы Чебышева первого рода, y_l^j – их узлы, а p_j – количество полиномов, используемых для аппроксимации решения на j -м элементе.

Подставляя ряды (14) в уравнение (12), потребуем, чтобы левая часть (12) на каждом из элементов сетки была ортогональной к первым $(p_j - 4)$ -м полиномам Чебышева:

$$(L_j \psi_j, T_n) = 0, \quad n = 0, 1, \dots, p_j - 4, \quad j = 1, 2, \dots, N, \quad (15)$$

где $(f, g) = \int_{-1}^{+1} f(x)g(x)(1-x^2)^{-1/2} dx$ – скалярное произведение на отрезке $[-1, 1]$.

Кроме того, еще потребуем, чтобы ряд по полиномам Чебышева (14) точно удовлетворял краевым условиям и условиям непрерывности (13). С учетом следующих свойств полиномов Чебышева $T_n(\pm 1) = (\pm 1)^n$ и $T'_n(\pm 1) = (\pm 1)^{n-2} n^2$ эти условия записываются в виде:

$$\begin{aligned} \sum_{n=0}^{p_1} (-1)^n a_n^0 &= 0, \quad \sum_{n=0}^{p_1} (-1)^{n-1} n^2 a_n^{(1)} = 0, \quad \sum_{n=0}^{p_j} a_n^{(j)} = \sum_{n=0}^{p_{j+1}} (-1)^n a_n^{(j+1)}, \\ \frac{1}{l_j} \sum_{n=0}^{p_j} n^2 a_n^{(j)} &= \frac{1}{l_{j+1}} \sum_{n=0}^{p_{j+1}} (-1)^{n-1} n^2 a_n^{(j+1)}, \\ \frac{1}{l_j^2} \sum_{n=0}^{p_j} a_n^{(j)} T_n''(+1) &= \frac{1}{l_{j+1}^2} \sum_{n=0}^{p_j} a_n^{(j+1)} T_n''(-1), \\ \frac{1}{l_j^3} \sum_{n=0}^{p_j} a_n^{(j)} T_n'''(+1) &= \frac{1}{l_{j+1}^3} \sum_{n=0}^{p_{j+1}} a_n^{(j+1)} T_n'''(-1), \quad j = 1, 2, 3, \dots, N-1, \\ \sum_{n=0}^{p_N} a_n^{(N)} &= 0, \quad \sum_{n=0}^{p_N} n^2 a_n^{(N)} = 0. \end{aligned} \quad (16)$$

Таким образом, для определения $\overline{m} = N(p_j + 1)$ неизвестных $a_n^{(j)}$, $n = 0, 1, 2, \dots, p_j$; $j = 1, 2, 3, \dots, N$ имеем $\overline{m} = N(p_j + 1)$ уравнений. Этими уравнениями служат $N(p_j - 3)$ уравнений ортогональности (15), $4(N-1)$ условий непрерывности и четыре граничных условия из (16). Полученную систему удобно записать в матричном виде:

$$(A - \lambda B)X = 0, \quad (17)$$

где комплексные матрицы A и B имеют блочно-диагональную структуру специального вида, а вектор x содержит коэффициенты $a_n^{(j)}$ в разложении (14), т.е.

$$x^T = (a_0^0, a_1^0, \dots, a_{p_1}^0, a_0^1, a_1^1, \dots, a_{p_2}^1, \dots, a_0^{(N)}, a_1^{(N)}, \dots, a_{p_N}^{(N)}).$$

Характерная особенность системы (17) в том, что матрица B вырождена (поскольку условия (16) не зависят от λ) и содержит $4N$ нулевых строк, где N – число элементов сетки.

Сравнение спектрального метода и спектрально-сеточного метода. Рассмотрим построение алгебраического преобразования для матричных уравнений устойчивости (17). Данная система с помощью невырожденного линейного преобразования Q сводится к виду

$$(AQ - \lambda BQ)(Q^{-1}x) = 0. \quad (18)$$

После применения преобразования Q число строк и столбцов комплексных матриц A и B уменьшится на $4N$, где N – число элементов. Отношение общего число уравнений $\bar{m}$ к числу оставшихся $\bar{m} = 4N$ уравнений составляет

$$q = \frac{\bar{m}}{\bar{m} - 4N}. \quad (19)$$

Таким образом, в результате разбиения интервала интегрирования на элементы, размерность каждой из комплексных матриц (вещественная и мнимая часть) A и B в исходной алгебраической системе уменьшается в q^2 раз. Снижение размерности особенно заметно при небольшом числе полиномов на каждом из элементов. Действительно, количество полиномов на j -м элементе равно $p_j + 1$ ($j = 1, 2, 3, \dots, N$). Тогда общее количество полиномов и соответственно алгебраических уравнений равно

$$\bar{m} = \sum_{j=1}^N (p_j + 1).$$

Заметим, что p_j не должно быть меньше, чем порядок старшей производной дифференциального уравнения, т.е. $p_j \geq 4$. При $p_j = 4$, например, для всех j , $\bar{m} = 5N$, $q = 5$. Это означает, что число уравнений в системе уменьшается в 5 раз, а размерности каждой из комплексных матриц A и B – в 25 раз.

Из оставшихся уравнений получается алгебраическая система существенно меньшей размерности:

$$(T - \lambda W)Y = 0, \quad (20)$$

$$Y = Q^{-1}\bar{x}, \quad \bar{x} = (a_4^0, \dots, a_{p_1}^0, a_4^0, \dots, a_{p_2}^0, \dots, a_4^{(N)}, \dots, a_{p_N}^{(N)}),$$

где W – в общем случае невырожденная квадратная матрица.

Умножая (20) слева на матрицу W^{-1} , получаем

$$(D - \lambda E)Y = 0, \quad D = TW^{-1}. \quad (21)$$

Собственные значения системы (21) могут быть найдены стандартными методами. В данной работе они определяются с помощью QR -алгоритма.

Для решения системы вида (21) один шаг QR -алгоритма требует

$$Z = \left(\frac{20}{3}\right)n^3$$

арифметических операций. В таблице сравнены спектральный метод (СМ)¹ и ССМ по числу арифметических операций Z .

Таблица

Сравнение методов СМ и ССМ по числу арифметических операций

$\overline{m}$	СМ	ССМ	
	Z	N	Z
5	6	1	6
10	1440	2	53
20	27306	4	426
30	117173	6	1440
40	311040	8	3414
50	648906	10	6666
60	1170773	12	27306
70	1916640	14	70986
80	2926507	16	146346
90	4240373	18	262026
100	5898240	20	426666

Эффективность ССМ, приведенного в таблице, наиболее наглядно иллюстрируется на рисунке, где через Z обозначено число арифметических операций.

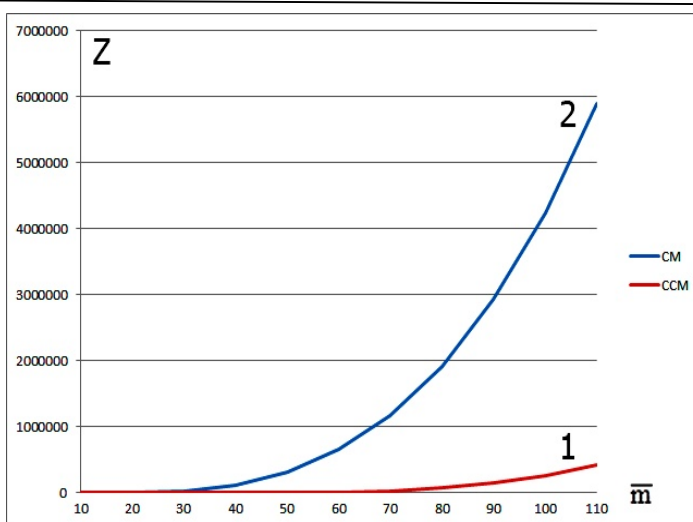


Рис. Кривая 1 – CCM, кривая 2 – CM.

При этом высокая точность CCM сохраняется.

Выводы. Предложен новый спектрально-сеточный метод для исследования гидродинамической устойчивости. Выполнено сравнение CCM и CM по числу арифметических операций при решении стандартной проблемы на собственные значения с комплексной матрицей. Показано, что спектрально-сеточный метод экономичен и имеет высокую точность при решении проблемы гидродинамической устойчивости.

Список литературы:

1. Orszag S.A. Accurate solution of the Orr-Sommerfeld stability equation / S.A.Orszag // *Journal fluid mech*, 1971. – Vol 4 (50). – P. 689-701.
2. Нармурадов Ч.Б. Об одном эффективном методе решения уравнения Орра-Зоммерфельда. / Ч.Б. Нармурадов // Математическое моделирование. – Москва. – 2005. – № 9 (17). – С. 35-42.
3. Абуталиев Ф.Б. Математическое моделирование проблемы гидродинамической устойчивости / Ф.Б. Абуталиев, Ч.Б. Нармурадов // *Fan va texnologiya*. – Ташкент. – 2011. – С. 188.
4. Крылов А.А. Решение задачи о собственных значениях для уравнения Орра-Зоммерфельда разностным методом / А.А. Крылов, И.Д. Малыхина // *Вычисл. методы и программирование*. – Москва. – 1968. – Вып.11. – С. 44-54.
5. Жарилкасинов А. Применение неравномерной сетки для численного решения задача Орра-Зоммерфельда / А. Жарилкасинов, В.Д. Лисейкин, Б.Ю. Скобелев, Н.Н. Яненко // *Числен. методы механики сплошной среды*. – Новосибирск, 1983. – № 5 (14). – С. 45-54.
6. Жарилкасинов А. Эффективная неравномерная сетка для уравнения Орра-Зоммерфельда и спектр течения Пуазейля / А. Жарилкасинов, Б.Ю. Скобелев,

- Н.Н. Яненко. – Новосибирск, 1984. – С.35. (Препринт/РАН. Сиб. Отд-ние. Ин-т теорет. и прикл. Мех. № 21).
7. Слепцов А.Г. Проекционно-сеточные методы решения задач Орра-Зоммерфельда / А.Г. Слепцов // Числен. методы механики сплошной среды. – Новосибирск, 1983. – № 5 (14). – С. 111-126.
8. Желтухин Н.А. Детерминантный метод решения уравнения Орра-Зоммерфельда / Н.А. Желтухин // Аэрогазодинамика: Тр. Сиб. конф. по аэродинамике, Июль-август. – Новосибирск, 1973. – С. 70-73.
9. Нормуратов Ч.Б. Математические модели проблемы гидродинамической устойчивости для однофазных потоков / Ч.Б. Нормуратов, Ш.А. Менглиев, К.А. Гулямкадиоров // Вычислительные математические задачи. – 2017. – № 1 (7). – С. 41-47.
10. Normurodov CH.B. Mathematical modeling movement of liquids in tubes / CH.B. Normurodov, SH.A. Mengliyev // Problems of computational and applied mathematics. – 2018. – Vol. 2. – P. 36-47.
11. Gordin V.A. Differential and difference equations / V.A. Gordin // Higher School of Economics. – 2016. – Moscow. – 517 p.

References:

1. Orszag, S.A. (1971), "Accurate solution of the Orr-Sommerfeld stability equation", *Journal fluid mech*, vol. 4 (50), pp. 689-701.
2. Narmuradov, Ch.B. (2005), "On one effective method for solving the Orr-Sommerfeld equation", *Math modeling*, Moscow, No. 9 (17), pp. 35-42.
3. Abutaliev, F.B. and Narmuradov, Ch.B. (2011), *Mathematical modeling of the problem of hydrodynamic stability*, Science and technology, Tashkent, pp. 188.
4. Krylov, A.A., and Malykhina, I.D. (1968), "Solving the eigenvalue problem for the Orr-Sommerfeld equation by the difference method", *Calculated. methods and programming*. Moscow, Issue 11, pp. 44-54.
5. Zharilkasinov, A., Liseikin, V.D., Skobelev, B.Yu. and Yanenko, N.N. (1983), "The use of non-uniform grids for the numerical solution of the Orr-Somerfeld problem", *Number continuum mechanics methods*, Novosibirsk, No. 5 (14), pp. 45-54.
6. Zharilkasinov, A., Skobelev, B.Yu. and Yanenko, N.N. (1984), *Effective non-uniform grid for the Orr-Sommerfeld equation and the Poiseuille flow spectrum*, Novosibirsk, p. 35. (Preprint/Russian Academy of Sciences. Sib. Separate. Inst. Theoretical and appl. Mech. No. 21).
7. Sleptsov, A.G. (1983), "Projection-grid methods for solving Orr-Sommerfeld problems", *Number methods of continuum mechanics*, Novosibirsk, No. 5 (14), pp. 111-126.
8. Zheltukhin, N.A. (1973), "The determinant method for solving the Orr-Sommerfeld equation", *Aerogasdynamics: Tr. Sib. konf. on aerodynamics July-August*, Novosibirsk, pp. 70-73.
9. Normuradov, Ch.B., Mengliyev, S.A. and Gulyamkadirov, K.A. (2017), "Mathematical models of the problem of hydrodynamic stability for single-phase flows", *Computational Mathematical Problems*, No. 1 (7), pp. 41-47.
10. Normurodov, CH.B., Mengliyev, SH.A. (2018), "Mathematical modeling of liquids in tubes". *Problems of computational and applied mathematics*, vol. 2, pp. 36-47.
11. Gordin, V.A. (2016), *Differential and difference equations*, Higher School of Economics, Moscow, 517 p.

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

Поступила (received) 14.04.2019

Toyirov Akbar Khasanovich, PhD
Termiz State University.
Str. Fayzulla Khujayev, 1A 13, Termiz, Uzbekistan, 190100,
Tel: +99897 242-31-50, e-mail: akbartoyirov@gmail.com
ORCID ID: 0000-0002-3664-8488

Kholturaev Khol Said Fayzullaevich, Ass
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 519.711.3

Про проблему гідродинамічної стійкості / Тойіров А.Х., Холтураєв Х.Ф. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2019. – № 13 (1338). – С. 48 – 59.

У статті з використанням методу малих збурень отримані математичні моделі гідродинамічної стійкості для однофазних потоків. Для аппроксимаций рівнянь стійкості застосовується спектрально-сітковий метод. Він об'єднує в собі високу точність спектрального методу нерівномірних сіток і дозволяє визначити відразу всі власні значення розглянутої проблеми. Ил.: 1. Табл.: 1. Бібліогр.: 11 назв.

Ключові слова: гідродинамічна стійкість; метод малих збурень; аппроксимация рівнянь стійкості; спектрально-сітковий метод; метод нерівномірних сіток.

УДК 519.711.3

О проблеме гидродинамической устойчивости / Тойиров А.Х., Холтураев Х.Ф. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2019. – № 13 (1338). – С. 48 – 59.

В статье с использованием метода малых возмущений получены математические модели гидродинамической устойчивости для однофазных потоков. Для аппроксимаций уравнений устойчивости применяется спектрально-сеточный метод. Он объединяет в себе высокую точность спектрального метода неравномерных сеток и позволяет определить сразу все собственные значения рассматриваемой проблемы. Ил.: 1. Табл.: 1. Библиогр.: 11 назв.

Ключевые слова: гидродинамическая устойчивость; метод малых возмущений; аппроксимация уравнений устойчивости; спектрально-сеточный метод; метод неравномерных сеток.

UDC 519.711.3

On the problem of hydrodynamic stability / Toyirov A.Kh., Kholтураev Kh.F. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2019. – №.13 (1338). – P. 48 – 59.

Mathematical models of hydrodynamic stability for single-phase flows are obtained in papers using the small perturbation method. The spectral-grid method is used to approximate the stability equations. It combines the high accuracy of the spectral method of non-uniform grids and allows you to immediately determine all the eigenvalues of the problem under consideration. Figs.: 1. Tabl.: 1. Refs.: 11 titles.

Keywords: hydrodynamic stability; small perturbation method; approximate the stability equations; spectral-grid method; non-uniform grid method.

УДК 004.9

10.20998/2411-0558.2019.13.06

В. Д. ДМИТРИЕНКО, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ",
А. Ю. ЗАКОВОРOTНЬИЙ, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ",
С. Ю. ЛЕОНОВ, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ",
Д. М. ГЛАВЧЕВ, асп., НТУ "ХПИ"

ПРОГРАММНАЯ КОМПОНЕНТА ДЛЯ ПОИСКА РЕШЕНИЙ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ В ЧАСТНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ В ГТУ МЕТОДОМ ГРУППОВОГО УЧЕТА АРГУМЕНТОВ

В геометрической теории управления (ГТУ) модели объектов управления, описываемые системами нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений, преобразовываются в эквивалентные линейные модели в форме Бруновского. Затем с помощью линейных моделей определяют оптимальные законы управления линейными объектами, а потом с помощью специальных преобразований переносят эти законы управления на модели исходных нелинейных объектов. Для определения функций преобразования (ФП), связывающих переменные линейных и нелинейных моделей необходимо решать системы дифференциальных уравнений в частных производных. Поскольку универсальных методов решения таких систем уравнений нет, то предложен метод поиска ФП на основе многорядного алгоритма МГУА. Проверка предложенного метода при решении ряда задач с помощью ГТУ подтвердила его работоспособность. Ил.: 1. Библиогр.: 14 назв.

Ключевые слова: геометрическая теория управления; многорядный алгоритм МГУА; функция преобразования; система дифференциальных уравнений в частных производных.

Постановка проблемы и анализ литературы. Многорядные алгоритмы метода группового учета аргументов относятся к биоинспирированным алгоритмам, то есть к алгоритмам, основанным на идеях эволюции и самоорганизации живых организмов, и успешно применяются для решения различных задач в многомерных и многоэкстремальных пространствах в условиях существенной априорной неопределенности [1 – 6]. Алгоритмы МГУА используются как для синтеза разнообразных математических моделей, так и для поиска приемлемых решений с помощью уже имеющихся сложных моделей, например, когда объект или процесс описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных. Одна из таких задач возникает в геометрической теории управления [7 – 11], которая позволяет модели объектов управления, описываемые системами нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений, преобразовывать в эквивалентные линейные модели в форме Бруновского. Затем с помощью линейных моделей и хорошо

разработанной теории управления линейными объектами определять оптимальные законы управления линейными объектами, а потом с помощью специальных преобразований переносить эти законы управления на модели исходных нелинейных объектов. Для определения функций преобразования, связывающих переменные линейной модели в форме Бруновского с переменными исходного нелинейного объекта, необходимо решать системы дифференциальных уравнений в частных производных при ограничениях в виде дифференциальных неравенств [7]. Решение этой системы уравнений в общем случае не является тривиальной задачей. При этом, сложность ее решения существенно зависит от сложности правых частей дифференциальных уравнений, описывающих исходный нелинейный объект управления [7, 12 – 13]. В связи с этим авторы, использующие ГТУ, стремятся описать исходный объект таким образом, чтобы правые части дифференциальных уравнений содержали минимальное число одночленов – один или два одночлена, и только потом модель преобразовывается к линейной форме Бруновского.

Как правило, в этом случае удается определять функции преобразования (ФП) как функции одной переменной путем последовательного исключения из общего выражения ФП $T(x_1, x_2, \dots, x_n)$ всех аргументов кроме одного [9, 10]. Если же правые части обыкновенных дифференциальных уравнений исходного нелинейного объекта содержат более двух одночленов, то процесс определения ФП усложняется. В работе [14] предложен автоматический перебор ФП с помощью специализированной нейронной сети, которая используется для определения ФП.

Однако необходимость моделирования нейронной сети повышает трудоемкость поиска решения и, кроме того, накладывает определенные ограничения на математические модели объектов управления. Поэтому используем другой подход к решению системы уравнений в частных производных – многорядный алгоритм МГУА.

Целью статьи является разработка многорядного алгоритма МГУА для поиска функций преобразования, связывающих переменные в линейных и нелинейных моделях геометрической теории управления.

Рассмотрим многорядный алгоритм МГУА на примере его применения в ГТУ.

Как известно, число определяемых ФП зависит от числа управлений в исходном объекте [7 – 9]. В качестве примера рассмотрим объект с двумя управлениями:

$$\begin{aligned}
\frac{dx_1}{dt} &= a_{11}x_2 = g_1; \\
\frac{dx_2}{dt} &= a_{21}x_3x_5 + a_{22} + a_{23}x_2 + a_{24}x_2^2 + a_{25}x_1 + a_{26}x_1^2 + a_{27}x_1^3 = g_2; \\
\frac{dx_3}{dt} &= a_{31}x_3 + a_{32}x_4 = g_3; \\
\frac{dx_4}{dt} &= a_{41}x_4 + a_{42}x_3 + a_{43}x_2x_6 + u_1 = g_4 + u_1; \\
\frac{dx_5}{dt} &= a_{51}x_2 + a_{52} \frac{x_6}{x_3} = g_5; \\
\frac{dx_6}{dt} &= a_{61}x_6 + a_{62}x_2x_3 + x_7 = g_6; \\
\frac{dx_7}{dt} &= g_7 + u_2,
\end{aligned} \tag{1}$$

где $x_1, x_2, \dots, x_7$ – переменные объекта управления; $a_{11}, a_{21}, \dots, a_{62}$ – постоянные коэффициенты.

С системой уравнений (1) связаны векторные поля:

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

где $\mathbf{x} = x_1, x_2, \dots, x_7$.

Проверка инволютивности распределений:

$$\begin{aligned}
M^0 &= \text{span}\{Y_1, Y_2\}, \quad M^1 = \text{span}\{Y_1, Y_2, L_X Y_1, L_X Y_2\}, \\
M_{Y_1}^2 &= \text{span}\{Y_1, L_X Y_1, L_X^2 Y_1\}, \quad M_{Y_2}^2 = \text{span}\{Y_2, L_X Y_2, L_X^2 Y_2\}, \\
M_{Y_1}^3, M_{Y_2}^3
\end{aligned}$$

показала, что система уравнений (1) может быть преобразована к линейному виду в 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 .

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 $X_1 = X + u_1 Y_1 + u_2 Y_2$, можно определить z_p , $p = \overline{2, 7}$:

$$\frac{dz_1}{dt} = z_2 = L_{X_1} T_1(x) = L_X T_1(x) + u_1 L_{Y_1} T_1(x) + u_2 L_{Y_2} T_1(x);\tag{4}$$

$$\begin{aligned}\frac{dz_2}{dt} = z_3 &= L_{X_1} (L_X T_1(x)) = L_X^2 (T_1(x)) + u_1 L_{Y_1} (L_X T_1(x)) + \\ &+ u_2 L_{Y_2} (L_X T_1(x));\end{aligned}\tag{5}$$

$$\begin{aligned}\frac{dz_3}{dt} = z_4 &= L_{X_1} (L_X^2 T_1(x)) = L_X^3 (T_1(x)) + u_1 L_{Y_1} (L_X^2 T_1(x)) + \\ &+ u_2 L_{Y_2} (L_X^2 T_1(x));\end{aligned}\tag{6}$$

$$\begin{aligned}\frac{dz_4}{dt} = u_1 &= L_{X_1} (L_X^3 T_1(x)) = L_X^4 (T_1(x)) + u_1 L_{Y_1} (L_X^3 T_1(x)) + \\ &+ u_2 L_{Y_2} (L_X^3 T_1(x));\end{aligned}\tag{7}$$

$$\frac{dz_5}{dt} = z_6 = L_{X_1} T_2(x) = L_X T_2(x) + u_1 L_{Y_1} T_2(x) + u_2 L_{Y_2} T_2(x);\tag{8}$$

$$\begin{aligned}\frac{dz_6}{dt} = z_7 &= L_{X_1} (L_X T_2(x)) = L_X^2 (T_2(x)) + u_1 L_{Y_1} (L_X T_2(x)) + \\ &+ u_2 L_{Y_2} (L_X T_2(x));\end{aligned}\tag{9}$$

$$\begin{aligned}\frac{dz_7}{dt} = u_2 &= L_{X_1} (L_X^2 T_2(x)) = L_X^3 (T_2(x)) + u_1 L_{Y_1} (L_X^2 T_2(x)) + \\ &+ u_2 L_{Y_2} (L_X^2 T_2(x));\end{aligned}\tag{10}$$

где $L_{X_1}T_k(x)$, $L_XT_k(x)$, $L_{Y_1}T_k(x)$, $L_{Y_2}T_k(x)$, $k=1, 2$ – 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 (4) – (6), (8), (9) коэффициенты при управлениях u_1 и u_2 равны нулю:

$$\begin{aligned} L_{Y_1}T_1(x) &= L_{Y_2}T_1(x) = L_{Y_1}(L_XT_1(x)) = L_{Y_2}(L_XT_1(x)) = \\ &= L_{Y_1}(L_X^2T_1(x)) = L_{Y_2}(L_X^2T_1(x)) = 0; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} L_{Y_1}T_2(x) &= L_{Y_2}T_2(x) = L_{Y_1}(L_XT_2(x)) = \\ &= L_{Y_2}(L_XT_2(x)) = 0. \end{aligned} \quad (12)$$

При этом коэффициенты при управлениях u_1 и u_2 в уравнениях (7) и (10) не равны нулю:

$$L_{Y_1}(L_X^3T_1(x)) = \left\langle \frac{\partial T_1}{\partial x}, L_X^3Y_1 \right\rangle \neq 0; \quad (13)$$

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

$$L_{Y_1}(L_X^2T_2(x)) = \left\langle \frac{\partial T_2}{\partial x}, L_X^2Y_1 \right\rangle \neq 0; \quad (14)$$

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

Соотношения (11) – (14) 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 $x = (x_1, x_2, \dots, x_7)$.

Опыт применения ГТУ показывает, что функции преобразования обычно имеют простой вид, например:

$$T_i(x) = x_{g_i}, \quad i = \overline{1, 2}; \quad (15)$$

$$T_i(x) = x_{g1} + x_{g2}, \quad i = \overline{1, 2}; \quad (16)$$

.....

$$T_i(x) = \sum_{l=1}^k x_{gl}, \quad i = \overline{1, 2}, \quad (17)$$

где $x_{g1}, x_{g2}, \dots, x_{gk} \in M = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, $g_1, g_2, \dots, g_k = \overline{1, n}$, $g_1 \neq g_2 \neq \dots \neq g_k$; M – множество переменных исходного нелинейного объекта.

Теперь поясним функционирование многорядного алгоритма МГУА (рис.) при поиске функции преобразования $T_i(x)$ для одной из двух клеток Бруновского [7 – 10]. На рисунке в блоках 1 и 2 используются обозначения А и Б.

А: В начале работы алгоритма:

Задание i номера клетки Бруновского. Задание исходных данных для определения ФП для i -й клетки Бруновского. Задание начального множества аргументов $M = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ для i -й клетки.

В процессе работы алгоритма – исключение аргументов из множества M . Задание новой клетки Бруновского и исходных данных для нее.

Б: Формирование ФП (частных описаний) с помощью соотношений (15) – (17) многорядного алгоритма МГУА.

Поиск ФП $T_i(x)$ для конкретной клетки Бруновского начинается с наиболее простых функций вида (15). При этом задается исходное множество M возможных аргументов ФП. Перебор аргументов в блоке 1 может осуществляться в любом порядке, для определенности положим, что аргументы проверяются в следующем порядке $x_1, x_2, \dots, x_n$ вначале для первой ФП $T_1(x) = x_1$, связывающей переменные линейной и нелинейной моделей для первой клетки Бруновского.

В блоке 2 формируются частные описания (16), (17) на втором и последующих рядах селекции. На первом ряду селекции одночленные частные описания из блока 1 через блок 2 передаются в блок 3.

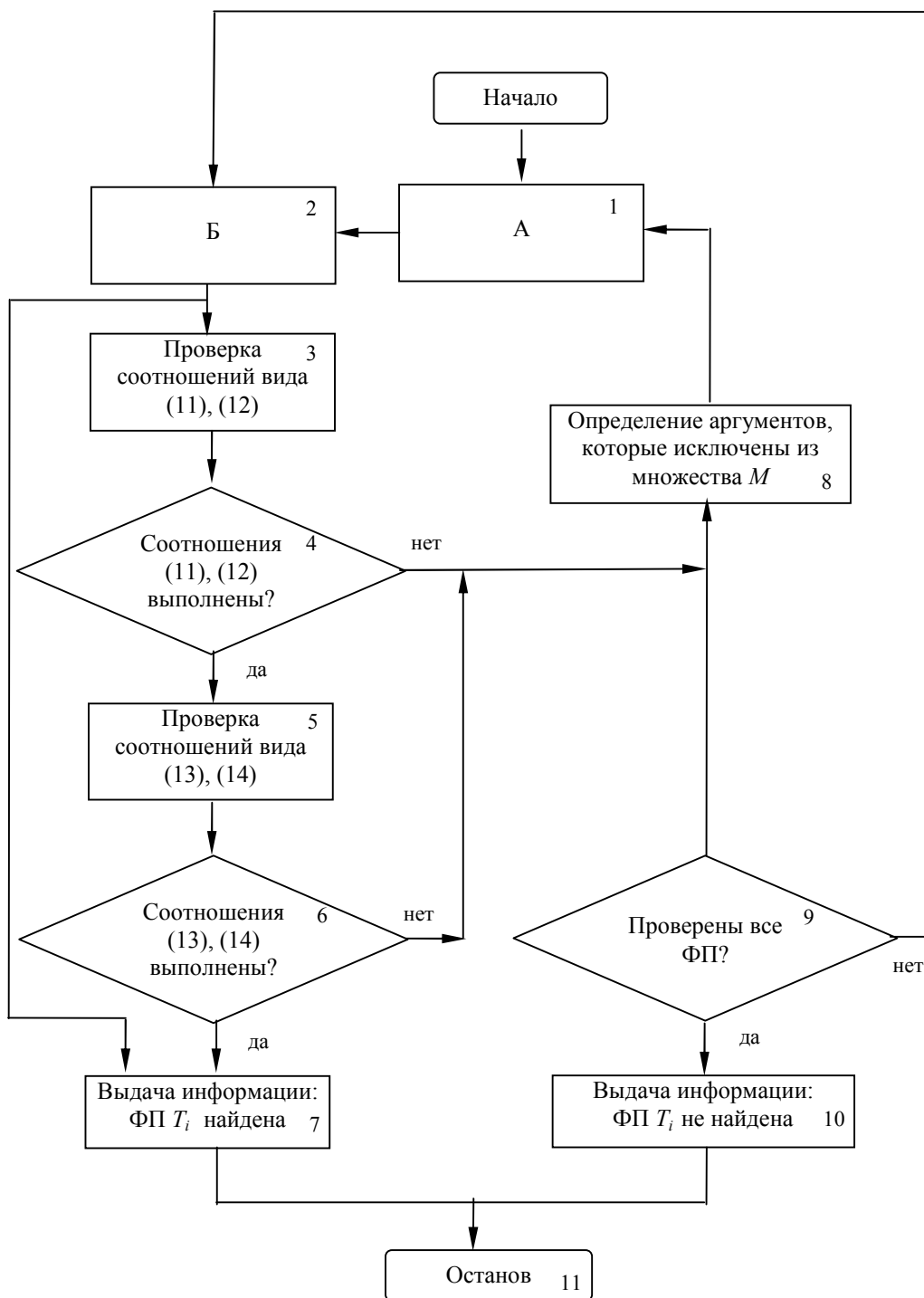


Рис. Обобщенный многокритерный алгоритм МГУА для поиска ФП

Поскольку определяется ФП T_1 , то с помощью блока 3 алгоритма формируются и проверяются соотношения (11). Если не все соотношения вида (11) выполняются, то это означает, что текущая ФП $T_1(x) = x_1$ не является искомым решением. Поэтому с помощью блока 8 определяется, что текущий аргумент x_1 (в общем случае аргумент x_j , $j = \overline{1, n}$ при проверке одночленных функций преобразования T_{1j} ($j = \overline{1, n}$)) должен быть исключен из множества M в блоке 1 алгоритма. С помощью блока 9 проверяется условие окончания перебора всех ФП при поиске функции T_1 . Поскольку анализируется только первая возможная функция преобразования для первой клетки Бруновского, сигнал с выхода блока 9 поступает на вход блока 2, где выбирается следующая возможная функция преобразования для первой клетки Бруновского, а затем блок 3 выполняет проверку соотношений (11) и т.д. Если в блоке 9 определяется, что проверены все ФП для данной клетки Бруновского, то с помощью блока 10 алгоритма выдается информация, что ФП для данной клетки не найдена (блок 10) и алгоритм прекращает свою работу (блок 11).

Если с помощью блока 4 устанавливается, что соотношения (11) для первой клетки Бруновского выполнены, то затем проверяются неравенства (13) в блоке 5. Если хотя бы одно из соотношений (13) не выполняется, то это означает, что текущая ФП не является искомым решением. Соответствующая информация с выхода блока 6 подается на входы блоков 8 и 9, функционирование которых описано выше. Если неравенства (13) выполняются, то блок 6 выдает информацию о найденной ФП, данные о которой поступают в блок 7 с выхода блока 2. Затем алгоритм прекращает свою работу (блок 11). Зная ФП $T_1(x) = z_1$, с помощью соотношений (4) – (7) путем последовательного дифференцирования вдоль векторного поля X можно определить и переменные z_2 , z_3 и z_4 .

После этого может быть определена ФП $T_2(x)$ для второй клетки Бруновского. Для определения этой ФП необходимо изменить исходные данные в блоках 1 и 2, а в блоках 3 и 4 использовать вместо уравнений (11) соотношения (12), аналогично – в блоках 5 и 6 вместо неравенств (13) проверять выполнение неравенств (14).

Этот алгоритм поиска ФП для объектов с двумя каналами управления можно обобщить и на случай объектов управлений с m каналами управлений, когда необходимо определять не две, а m ФП: $T_i(x)$, $i = \overline{1, m}$. В этом случае для каждой функции преобразования будут получены свои соотношения вида (11), (12) и неравенства вида (13), (14),

которые будут использоваться для поиска ФП для всех клеток Бруновского аналогично тому, как использовались соотношения (11) – (14) при поиске функций $T_1(x)$ и $T_2(x)$.

Если многорядный алгоритм МГУА с помощью соотношений вида (15) – (17) не позволяет получить функцию преобразования, а правые части обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающие исходный объект управления, содержат выражения, отличные от одночленов полиномов, то выражения (15) – (17) должны быть скорректированы с учетом этой дополнительной информации.

Выводы. На основе анализа метода определения функций преобразования, связывающих переменные линейных и нелинейных моделей в ГТУ, путем решения системы дифференциальных уравнений в частных производных при ограничениях в виде дифференциальных неравенств, можно сделать вывод, что решение этой системы уравнений в общем случае не является тривиальной задачей. В настоящее время эта система уравнений решается только в том случае, когда система обыкновенных дифференциальных уравнений исходного нелинейного объекта управления содержит в своих правых частях почти всех дифференциальных уравнений не более одного – двух одночленов. При увеличении сложности правых частей дифференциальных уравнений модели исходного объекта известный метод последовательного исключения переменных из функций преобразования, как правило, не работает. В связи с этим необходима разработка новых методов решения системы уравнений в частных производных. В качестве такого метода предлагается многорядный алгоритм метода группового учета аргументов, основанный на переборе возможных решений системы уравнений в частных производных с помощью соотношений вида (15) – (17). Проверка нового метода решения систем уравнений в частных производных при использовании ГТУ для решения различных задач управления подтвердила его работоспособность.

Если правые части обыкновенных дифференциальных уравнений исходного нелинейного объекта управления содержат одночлены, отличные от одночленов полиномов, например, вида: x_i/x_j ; x_i/x_jx_k , $x_i/(x_j+x_k)$, $\sqrt{x_j}$, $\sqrt{x_j+x_k}$, и т.д., где $x_i, x_j, x_k \in M$, $i, j, k = \overline{1, n}$, $i \neq j \neq k$, то исходное множество $M = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ должно быть расширено за счет этих одночленов $M^* = \{x_1, x_2, \dots, x_n, x_i/x_j, x_i/x_jx_k, x_i/(x_j+x_k), \dots\}$ и выражения (15) – (17) должны быть скорректированы с учетом дополнительной информации.

Список литературы:

1. *Ивахненко А.Г.* Помехоустойчивость моделирования / *А.Г. Ивахненко, В.С. Степашко.* – Киев: Наукова думка, 1981. – 206 с.
2. *Malada H.R.* Inductive learning algorithms for comple systems modeling / *H.R. Malada, A.G. Ivakhnenko.* – CRC Press, 1994. – 368 p.
3. *Дмитриенко В.Д.* Алгоритмы самоорганизации и *K*-значные динамические модели / *В.Д. Дмитриенко, Н.И. Корсунов, С.Ю. Леонов, И.М.И. Шехабат.* – М.: Наука-Физматлит, 1998. – 346 с.
4. *Понятский В.М.* Использование метода группового учета аргументов для выбора структуры модели динамического объекта / *В.М. Понятский, С.И. Велешкин, А.В. Жирнова* // Известия ТулГУ. Технические науки, Вып. 2. Управление, вычислительная техника и информационные технологии. – Тула: ТулГУ, 2013. – С. 55-66.
5. *Муравина О.М.* Программная реализация метода группового учета аргументов при идентификационном моделировании геолого-геофизических данных / *О.М. Муравина, И.А. Пономаренко* // Вестник ВГУ. Серия: Геология, 2016. – № 2. – С. 107-110.
6. *Баласанян С.Ш.* Сравнительный анализ методов регрессии и метода группового учета аргументов при моделировании процессов переработки полезных ископаемых / *С.Ш. Баласанян, Э.М. Геворкян* // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 4. – С. 23-34.
7. *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.
8. *Kim D.P.* Automatic Control. Theory Nonlinear and Multivariable System / *D.P. Kim.* – Seal: Harnol, 2000. – 558 p.
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.* Преобразование нелинейных систем управления к эквивалентным линейным в канонической форме Бруновского / *В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный* // Электротехнические системы и комплексы. – Магнитогорск: МГТУ, 2014. – № 4 (25). – С. 8 – 14.
11. *Сачков Ю.* Геометрическая теория управления / *Ю. Сачков.* – М.: СИНТЕГ, 2013. – 294 с.
12. *Bloch A.M.* An Introduction to Aspects of Geometric Control Theory / *A.M. Bloch.* – Nonholonomic Mechanics and Control Interdisciplinary Applied Mathematics. – Vol. 24. – Springer, New York. – P. 199-233.
13. *Zoehfeld Geoffrey A.* Geometric Control Theory: Nonlinear Dynamics and Applications / *Geoffrey A. Zoehfeld.* – University of San Jose, Master's Theses. – 150 p.
14. *Дмитриенко В.Д.* Метод поиска функций преобразования, связывающих переменные нелинейных и линейных моделей в ГТУ / *Дмитриенко В.Д., А.Ю. Заковоротный, Д.М. Главчев* // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2016. – № 44 (1216). – С. 14-30.

References:

1. Ivakhnenko, A.G., and Stepashko, V.S. (1981), *Immunity of simulation*, Kiev, Naukova Dumka, 206 p.
2. Malada, H.R., and Ivakhnenko, A.G. (1994), *Inductive learning algorithms for comple systems modeling*, CRC Press, 368 p.

3. Dmitrienko, V.D., Korsunov, N.I., Leonov, S.Yu., and Shehabat, I.M.I. (1998), *Self-organization algorithms and K-value dynamic models*, Moscow, Science-Fizmatlit, 346 p.
4. Ponyatsky, V.M., Veleshkin, S.I., and Zhirnova A.V. (2013), "Using the group method of data handling to select the structure of a model of a dynamic object", *News of TulSU, Technical science*, vol. 2. *Management, computer engineering and information technology*. – Тула: TulSU, pp. 55-66.
5. Muravina, O.M., and Ponomarenko, I.A. (2016), "Software implementation of the group method of data handling during identification modeling of geological and geophysical data", *Bulletin of the Voronezh State University. Series: Geology*, No. 2, pp. 107-110.
6. Balasanyan, S.Sh., and Gevorgyan, E.M. (2016), "Comparative analysis of the methods of re-grading and the group method of data handling in modeling the processes of mineral processing", *News of Tomsk Polytechnic University. Geo-Resource Engineering*, Vol 327, No. 4, pp. 23-34.
7. 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.
8. Kim, D.P. (2000), *Automatic Control. Theory Nonlinear and Multivariable System*, Harnol, Seal: 558 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., and Zakovorotny, A.Y. (2014), "Converting the nonlinear control systems equivalent to the linear canonical Brunovsky form", *Electrical systems and complexes*, MSTU, Magnitogorsk, No 4 (25), pp. 8-14.
11. Sachkov, Y. (2013), *Geometric control theory*, SYNTEG, Moscow, 394 p.
12. Bloch, A.M. (2015) "An Introduction to Aspects of Geometric Control Theory", *Nonholonomic Mechanics and Control. Interdisciplinary Applied Mathematics*", Vol 24. Springer, New York, pp. 199-233.
13. Zoehfeld, Geoffrey, A. (2016), *Geometric Control Theory: Nonlinear Dynamics and Applications*, University of San Jose, Master's Theses, 150 p.
14. Dmitrienko, V.D., Zakovorotny, A.Y. and Glavchev D.M. (2014), "Search method of conversion functions, linking the variables of linear and nonlinear models in the GTU", *Herald of NTU "KhPI"*, NTU "KhPI", Kharkiv, No. 44 (12163), pp. 14-20.

Статью представил д-р техн. наук, проф. НТУ "ХПІ", А.А. Серков

Поступила (received) 21.05.2019

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

Zakovorotniy Alexandr, Dr. Tech. Sci., Professor
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

Leonov Sergey, Dr. Tech. Sci., Professor
National Technical University "Kharkiv Politechnical Institute"
Str. Kirpichova, 2, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel.: (099) 911-911-3, e-mail: serleomail@gmail.com
ORCID ID 0000-0001-8139-0458

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 004.9

Програмна компонента для пошуку рішень системи рівнянь в частинних похідних в ГТУ методом групового врахування аргументів / Дмитрієнко В.Д., Заковоротний О.Ю., Леонов С.Ю., Главчев Д.М. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2019. – № 13 (1338). – С. 61 – 73.

У геометричній теорії управління (ГТУ) моделі об'єктів управління, які описуються системами нелінійних звичайних диференціальних рівнянь, перетворюються в еквівалентні лінійні моделі в формі Бруновського. Потім за допомогою лінійних моделей визначають оптимальні закони керування лінійними об'єктами, а потім за допомогою спеціальних перетворень переносять ці закони управління на моделі вихідних нелінійних об'єктів. Для визначення функцій перетворення (ФП), що пов'язують змінні лінійних і нелінійних моделей необхідно вирішувати системи диференціальних рівнянь у частинних похідних. Оскільки універсальних методів вирішення таких систем рівнянь немає, то запропонований метод пошуку ФП на основі багаторядного алгоритму МГВА. Перевірка запропонованого методу при вирішенні ряду завдань за допомогою ГТУ підтвердила його працездатність. Іл.: 1. Бібліогр.: 14 назв.

Ключові слова: геометрична теорія управління; багаторядний алгоритм МГВА; функція перетворення; система диференціальних рівнянь в частинних похідних.

УДК 004.9

Программная компонента для поиска решений системы уравнений в частных производных в ГТУ методом группового учета аргументов / Дмитриенко В.Д., Заковоротный А.Ю., Леонов С.Ю., Главчев Д.М. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2019. – № 13 (1338). – С. 61 – 73.

В геометрической теории управления (ГТУ) модели объектов управления, описываемые системами нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений, преобразовываются в эквивалентные линейные модели в форме Бруновского. Затем с помощью линейных моделей определяют оптимальные законы управления линейными объектами, а потом с помощью специальных преобразований переносят эти законы управления на модели исходных нелинейных объектов. Для определения функций преобразования (ФП), связывающих переменные линейных и нелинейных моделей необходимо решать системы дифференциальных уравнений в частных производных. Поскольку универсальных методов решения таких систем уравнений нет, то предложен метод поиска ФП на основе многорядного алгоритма МГУА. Проверка предложенного метода при решении ряда задач с помощью ГТУ подтвердила его работоспособность. Ил.: 1. Библиогр.: 14 назв.

Ключевые слова: геометрическая теория управления; многорядный алгоритм МГУА; функция преобразования; система дифференциальных уравнений в частных производных.

UDK 004.9

Software component for finding solutions to a system of partial differential equations in GTU by the method of group accounting of arguments / Dmitrienko V.D., Zakovorotny A.Y., Leonov S.Yu., Hlavchev D.M. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2019. – №.13 (1338). – P. 61 – 73.

In geometric control theory (GTU), models of control objects described by systems of nonlinear ordinary differential equations are converted into equivalent linear models in the Brunovsky form. Then, using linear models, they determine the optimal laws of control of linear objects, and then using special transformations transfer these control laws to models of the original nonlinear objects. To determine the transformation functions (FPs) connecting the variables of linear and nonlinear models, it is necessary to solve systems of differential equations in partial derivatives. Since there are no universal methods for solving such systems of equations, a method for searching for a phase transition based on the multi-row GMDH algorithm is proposed. Verification of the proposed method in solving a number of problems with the help of gas turbines confirmed its efficiency. Figs.: 1. Refs.: 14 titles.

Keywords: geometric control theory; pseudostratified GMDH algorithm; conversion function; system of partial differential equations

UDC 681.5.015.52

DOI: 10.20998/2411-0558.2019.13.07

V. I. LOMOVOY, master, National University "Odessa Maritime Academy", Odessa,

V. D. PAVLENKO, Doct. Sci, Prof., Odessa National Polytechnical University, Odessa

IDENTIFICATION NONLINEAR DYNAMIC SYSTEMS BASED ON VOLTERRA POLYNOMIALS WITH USING POLYHARMONIC TEST SIGNALS

The method is proposed for constructing the Volterra approximation model of the nonlinear dynamical systems in the frequency domain using of the test polyharmonic signals of various amplitudes. The computational identification method is based on the use of the regularized least squares method and the choice of the optimal step size on amplitude of test signals. The accuracy and computational stability of identification method in the form of multidimensional amplitude-frequency and phase-frequency characteristics are investigated. The method improves an accuracy and stability of the identification procedure. Figs.: 2. Refs.: 18 titles.

Keywords: nonlinear dynamic systems; Volterra approximation model; phase-frequency characteristics; polyharmonic test signals; regularized least squares method.

Introduction. Methods of mathematical modeling and experiment are the main tools for research of complex nonlinear dynamic systems (NDS) [1]. For the description of NDS, which are considered as a "black box", integro-power series are often used – Volterra models [2 – 6]. In this case, the nonlinear and dynamic properties of the system are completely characterized by a sequence of multidimensional weight functions – Volterra kernels.

Commonly, the Volterra series are replaced by a polynomial, with only taking several first terms of series into consideration. Nonlinear dynamical system identification in a form of Volterra series consists in the determination of n -dimensional weighting functions $w_n(\tau_1, \dots, \tau_n)$ in time domain [6, 7] or it's Fourier transforms $W_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n)$ – n -dimensional transfer functions in frequency domain [6, 8 – 13] on the input-output data of the NDS.

The scope of models in the form of integro-power series is limited to a weakly non-linear mode of operation, that is, the work of the NDS at small amplitudes of input signals or small non-linearity. To describe a substantially nonlinear system, Volterra integro-power polynomials are used. The theorem proved by M. Frechet justifies the possibility of such an approximation. However, the theorem does not give constructive algorithms for constructing Volterra polynomials from the input-output data [14].

The aim of this work is a theoretical substantiation and research of the

method of constructing the approximation model of the NDS in the form of the Volterra polynomials in frequency domain with using the test polyharmonic signals.

Identification of nonlinear system in frequency domain consists in determination of absolute value and phase of multidimensional transfer function at given frequencies – multidimensional amplitude-frequency (AFC) $|W_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n)|$ and phase-frequency characteristics (PFC) $\arg W_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n)$, which are defined by formulas:

$$|W_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n)| = \sqrt{[\operatorname{Re}(W_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n))]^2 + [\operatorname{Im}(W_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n))]^2}, \quad (1)$$

$$\arg W_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n) = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im}[W_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n)]}{\operatorname{Re}[W_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n)]}, \quad (2)$$

where Re and Im – accordingly real and imaginary parts of a complex function of n variables respectively.

The method of identification the Volterra approximation model. A method of constructing approximation Volterra model of the nonlinear dynamical systems (NDS) is developing [14]. Method of the identification is based on the approximation of the response $y(t)$ system at an arbitrary deterministic signal $x(t)$ in the form of integral power of the polynomial Volterra N -th order (N -order approximation model):

$$\tilde{y}_N(t) = \sum_{n=1}^N \hat{y}_n(t) = \sum_{n=1}^N \int_0^\infty \dots \int_0^\infty \underset{n \text{ times}}{w_n(\tau_1, \dots, \tau_n)} \prod_{i=1}^n x(t - \tau_i) d\tau_i. \quad (3)$$

The statement which proof is given in [14] is true.

Statement 1. Let the input test signals NDS are fed alternately $a_1x(t)$, $a_2x(t)$, ..., $a_Lx(t)$; $a_1, a_2, \dots, a_L$ – distinct real numbers satisfying the condition $|a_j| \leq 1$ for $\forall j=1, 2, \dots, L$; then

$$\begin{aligned} \tilde{y}_N[a_jx(t)] &= \sum_{n=1}^N \hat{y}_n[a_jx(t)] = \\ &= \sum_{n=1}^N a_j^n \int_0^\infty \dots \int_0^\infty \underset{n \text{ times}}{w_n(\tau_1, \dots, \tau_n)} \prod_{i=1}^n x(t - \tau_i) d\tau_i = \sum_{n=1}^N a_j^n \hat{y}_n(t). \end{aligned} \quad (4)$$

The partial components in the approximation model $\hat{y}_n(t)$ are found using the least square method. This makes it possible to obtain such evaluation in which the sum of squared deviations of responses identified the nonlinear

dynamical system $y[a_j x(t)]$ on the model $\hat{y}_N[a_j x(t)]$ response is minimal, i.e., NDS provides a minimum criterion

$$J_N = \sum_{j=1}^L (y[a_j x(t)] - \tilde{y}_N[a_j x(t)])^2 = \sum_{j=1}^L \left(y_j(t) - \sum_{n=1}^N a_j^n \hat{y}_n(t) \right)^2 \rightarrow \min, \quad (5)$$

where $y_j(t) = y[a_j x(t)]$. Minimization of the criterion (5) is reduced to solving the system of normal equations of Gauss, which in vector-matrix form can be written as

$$A' A \hat{y} = A' \bar{y}, \quad (6)$$

where A' – transposed matrix,

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & a_1^2 & \cdots & a_1^N \\ a_2 & a_2^2 & \cdots & a_2^N \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_L & a_L^2 & \cdots & a_L^N \end{bmatrix}, \quad \bar{y} = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ \cdots \\ y_L(t) \end{bmatrix}, \quad \hat{y} = \begin{bmatrix} \hat{y}_1(t) \\ \hat{y}_2(t) \\ \cdots \\ \hat{y}_N(t) \end{bmatrix}.$$

From (6) we obtain

$$\hat{y} = (A' A)^{-1} A' \bar{y}. \quad (7)$$

In (7), matrix operations, we obtain

$$\begin{bmatrix} \hat{y}_1(t) \\ \hat{y}_2(t) \\ \cdots \\ \hat{y}_N(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^L a_j^2 & \sum_{j=1}^L a_j^3 & \cdots & \sum_{j=1}^L a_j^{N+1} \\ \sum_{j=1}^L a_j^3 & \sum_{j=1}^L a_j^4 & \cdots & \sum_{j=1}^L a_j^{N+2} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \sum_{j=1}^L a_j^{N+1} & \sum_{j=1}^L a_j^{N+2} & \cdots & \sum_{j=1}^L a_j^{2N} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^L a_j y_j(t) \\ \sum_{j=1}^L a_j^2 y_j(t) \\ \cdots \\ \sum_{j=1}^L a_j^N y_j(t) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

The Tikhonov regularization method based on the variational method of constructing a regularizing operator is used to obtain the error-resistant to solving a system of linear algebraic equations (SLAE) (6) [15]. This method is to determine an approximative solution vector that minimizes a certain smooth functionality. The only vector satisfying the minimum condition of the smoothing functional is determined on the basis of the SLAE solution

$$(A' A + \alpha I) \hat{y}_\alpha = A' \bar{y}, \quad (9)$$

where I – the unit matrix, and α is a parameter of regularization.

When implementing this algorithm, the regularization parameter α is chosen quite small (from the analysis of the available information about the error of the input data and the error of calculations). The value of the regularization parameter α is determined by matching, that is, multiple calculations $\hat{y}_\alpha$, for different values α .

Using test polyharmonic signals in identification procedure. For identification in the frequency domain the test polyharmonic signals are used. We prove:

Statement 2. If test polyharmonic signal is used in form

$$x(t) = A \sum_{k=1}^n \cos(\omega_k t) = \frac{A}{2} \sum_{k=1}^n (e^{j\omega_k t} + e^{-j\omega_k t}), \quad (10)$$

then the n -th partial component of the response of test system can be written in the form:

$$y_n(t) = \frac{A^n}{2^{n-1}} \sum_{m=0}^{E(n/2)} C_n^m \sum_{k_1=1}^n \dots \sum_{k_n=1}^n |W_n(-j\omega_{k_1}, \dots, -j\omega_{k_m}, j\omega_{k_{m+1}}, \dots, j\omega_{k_n})| \times \\ \times \cos\left(\left(-\sum_{l=0}^m \omega_{k_l} + \sum_{l=m+1}^n \omega_{k_l}\right)t + \arg W_n(-j\omega_{k_1}, \dots, -j\omega_{k_m}, j\omega_{k_{m+1}}, \dots, j\omega_{k_n})\right), \quad (11)$$

where $E()$ – function used to obtain the of integer part of the value [11].

The partial components for $n = 1, 2$ and 3 are the form, respectively

$$y_1(t) = A |W_1(j\omega)| \cos(\omega t + \arg W_1(j\omega)), \quad (12)$$

$$y_2(t) = \frac{A^2}{2} \sum_{k_1, k_2=1}^2 |W_2(j\omega_{k_1}, j\omega_{k_2})| \cos((\omega_{k_1} + \omega_{k_2})t + \\ + \arg W_2(j\omega_{k_1}, \omega_{k_2})) + \\ + A^2 \sum_{k_1, k_2=1}^2 |W_2(-j\omega_{k_1}, j\omega_{k_2})| \cos((- \omega_{k_1} + \omega_{k_2})t + \\ + \arg W_2(-j\omega_{k_1}, \omega_{k_2})), \quad (13)$$

$$\begin{aligned}
y_3(t) = & \frac{A^3}{4} \sum_{k_1, k_2, k_3=1}^3 |W_3(j\omega_{k_1}, j\omega_{k_2}, j\omega_{k_3})| \cos((\omega_{k_1} + \omega_{k_2} + \omega_{k_3})t + \\
& + \arg W_3(j\omega_{k_1}, j\omega_{k_2}, j\omega_{k_3})) + \\
& + \frac{3A^3}{4} \sum_{k_1, k_2, k_3=1}^3 |W_3(-j\omega_{k_1}, j\omega_{k_2}, j\omega_{k_3})| \cos((-\omega_{k_1} + \omega_{k_2} + \omega_{k_3})t + \\
& + \arg W_3(-j\omega_{k_1}, j\omega_{k_2}, j\omega_{k_3})) + \\
& + \frac{3A^3}{4} \sum_{k_1, k_2, k_3=1}^3 |W_3(-j\omega_{k_1}, -j\omega_{k_2}, j\omega_{k_3})| \cos((-\omega_{k_1} - \omega_{k_2} + \omega_{k_3})t + \\
& + \arg W_3(-j\omega_{k_1}, -j\omega_{k_2}, j\omega_{k_3})).
\end{aligned} \tag{14}$$

The component with frequency $\omega_1 + \dots + \omega_n$ is extracted from the response to test signal (10)

$$A^n |W_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n)| \cos[(\omega_1 + \dots + \omega_n)t + \arg W_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n)]. \tag{15}$$

Certain limitations should be imposed while choosing of frequencies polyharmonic test signals in the process determine multidimensional AFC and PFC [11].

The technique and hardware–software tools of radio frequency communication channel identification. Experimental research of an Ultra High Frequency range communication channel (CC) for the purpose of identification of its multifrequency performances, characterizing nonlinear and dynamic properties of the channel are fulfilled [16, 17]. The Volterra model in the form of the second order polynomial is used. Thus physical channel properties are characterized by transfer functions of $W_1(j\omega)$ and $W_2(j\omega_1, j\omega_2)$ – by the Fourier–images of weighting functions $w_1(t)$ and $6w_2(t_1, t_2)$.

Implementation of identification method on the IBM PC computer basis has been carried out using the developed software in C++ language with the usage of such classes as CWaveRecorder, CWavePlayer, CWaveReader, CWaveWriter which allow to provide rather convenient interacting with MMAPI Windows. The software allows automating the process of the test signals forming with the given parameters (amplitudes and frequencies). Also this software allows transmitting and receiving signals through an output and input section of computer soundcard, to produce segmentation of a file with the responses to the fragments, corresponding to the communication channel responses being researched on test polyharmonic effects with different amplitudes.

In experimental research two identical S.P.RADIO A/S, T&T VHF–radio stations (a range of operational frequencies 146–174 MHz) and IBM PC with Creative SBLive! sound cards were used. Sequentially AFC of the first and second orders were defined. The method of identification with an order of approximation $N = 4$ was applied. Structure charts of identification procedure – determinations of the n –order AFC of CC are presented accordingly on figure 1. The general scheme of a hardware–software complex of the communication channel identification, based on the data of input–output type experiment is presented in fig. 1.

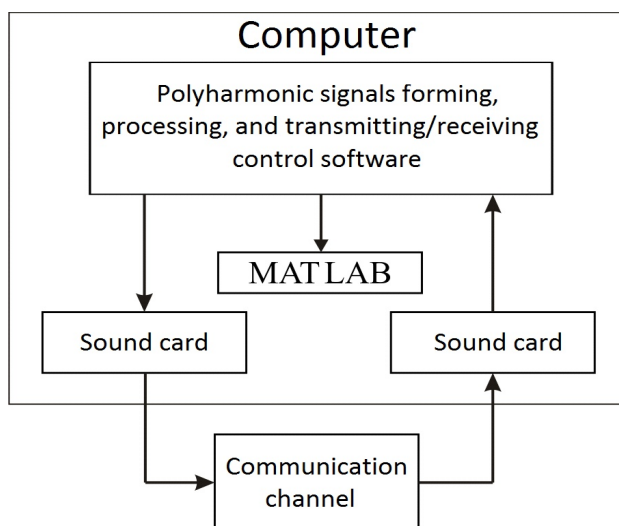


Fig. 1. The general scheme of the experiment

The communication channel received responses to the test signals, compose a group of the signals, which amount is equal to the used order of approximation N ($N = 4$). In each following group the signals frequency increases by magnitude of chosen step. To define the beginning of each received response we have used a cross–correlation.

Maximum allowed amplitude in described experiment with use of sound card was 0,2V (defined experimentally). The used range of frequencies was defined by the sound card pass band, and frequencies of the test signals has been chosen from this range, taking into account restrictions specified above. Such parameters were chose for the experiment: start frequency – 200 Hz; final frequency – 1600 Hz; a frequency change step – 27 Hz; to define AFC of the second order determination, an offset on frequency $\omega_2 - \omega_1$ was equal 25, 50 and 100 Hz.

The weighed sum is formed from received signals–responses of each group. As a result we get partial components of response of the communication channel $y_1(t)$ and $y_2(t)$. For each partial component of response a Fourier transform (the FFT is used) is calculated, and from received spectra only an informative harmonics (which amplitudes represents values of required characteristics of the first and second orders AFC) are taken. The first order AFC $|W_1(j\omega)|$ is received by extracting the harmonics with frequency ω from the spectrum of the partial response of the CC $y_1(t)$. The second order AFC $|W_2(j\omega_1, j\omega_2)|$ we received extracting the harmonics with summary frequency $\omega_1 + \omega_2$ from the spectrum of the partial response of the communication channel $y_2(t)$ to the test signal $A \cdot \cos(\omega_1 \cdot t) + A \cdot \cos(\omega_2 \cdot t)$.

The results are received after digital data processing of the experiments for the first and second orders. AFC $|W_1(j\omega)|$ and $|W_2(j\omega_1, j\omega_2)|$ after procedure of smoothing based on the wavelet transform [18] are presented in fig. 2.

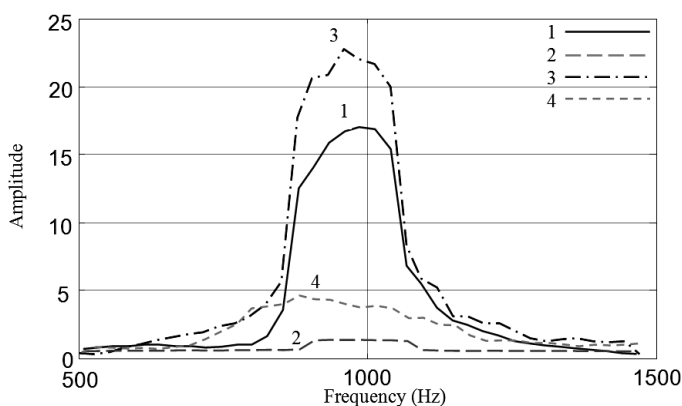


Fig. 2. AFC of the first order after smoothing –1, the second order AFC after smoothing at: $\Delta\Omega = 25$ Hz – 2; $\Delta\Omega = 50$ Hz – 3; $\Delta\Omega = 100$ Hz – 4

Conclusion. The method for building the Volterra approximation model of the nonlinear dynamical system with using of the test polyharmonic signals of various amplitudes is proposed. The computing identification method is based on the use of the regularized least squares method. The accuracy and computational stability of identification method in the form of multidimensional amplitude-frequency and phase-frequency characteristics are investigated. The method improves an accuracy and stability of the identification procedure.

The results of the identification of the NDS based on the approximation model in the form of a Volterra polynomial using test polyharmonic signals are significantly affected by measurement errors. The computational algorithm

that implements such method of identification is reduced to solving a system of linear algebraic equations (SLAE) for each fixed point in time t on the simulation interval. The method of regularization of ill-posed Tikhonov problems, based on the variational method of constructing a regularizing operator, is used to obtain the solutions of the SLAE, that are tolerant towards the measurement's errors. To improve the computational stability of the identification method, a noise reduction (smoothing) procedure was applied to the obtained estimates of the characteristics of the AFC and PFC based on the wavelet transform.

The technique of experimental research of continuous communication channel of the telecommunication system is developed for the identification of its characteristics regarding to the nonlinear and dynamic properties on the basis of the Volterra models in the frequency domain. The technique is based on application of the approximating model for identification of the nonlinear dynamic system using to the input polyharmonic signals of different amplitudes.

The hardware-software tools are developed implementing the technique of identification and they are applied to create an information model of the communication channel in the form of the first and second orders AFC on the basis of the data of input-output type experiment with the usage of the test harmonic and biharmonic signals.

The received results of research show essential nonlinearity of the communication channel that leads to distortions of the signals in a radio section, reduces an important parameters of the telecommunication system: accuracy of the reproduction signals, channel bandwidth, noise immunity.

References:

1. Giannakis, G.B. (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.
2. Doyle, F.J., Pearson, R.K., and Ogunnaike, B.A. (2001), *Identification and Control Using Volterra Models*, Published Springer Technology & Industrial Arts, 314 p.
3. Pupkov, K.A., and Yegupov, N.D. (2004), *Methods of classical and modern theory of automatic control. Statistical dynamics and identification of automatic control systems: Textbook for universities*, T. 2, 2-th ed., Moskov, MGTU named by N.E. Bauman, 638 p.
4. Pupkov, K.A., Kapalin, V.I., and Yushchenko, A.S. (1976), *Functional series in the theory of nonlinear systems*, Moskov, Science, 448 p.
5. Popkov, Yu.S. Kiselev, O.N., Petrov, N.P., and Shmulian B.L. (1976), *Identification and optimization of nonlinear stochastic systems*, Moskov, Energy, 440 p.
6. Danilov, L.V., Matkhanov, L.N., and Filippov, V.S. (1990), *Theory of Nonlinear Electrical Circuits*, Leningrad, Energoatomizdat, 256 p.
7. Pavlenko, Vitaliy, and Pavlenko, Sergey (2018), "Deterministic Identification Methods for Nonlinear Dynamical Systems based on the Volterra Model", *Applied Aspects of Information Technology*, No. 01 (01), pp. 9-29.

8. 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.
9. Pavlenko, V., Pavlenko, S., and 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.
10. Lomovoy, Volodimir, and Pavlenko, Vitaliy (2019), "Methods and Tools for Identification of Nonlinear Dynamical Systems based on Volterra Models in Frequency Domain", *Scientific notes of TNU Vernadsky. Series: Technical Sciences*, vol. 30 (69), Part 1, No.1, pp. 78-96.
11. Pavlenko, V., Pavlenko, S., and Lomovoy V. (2018), "Computational tools for the construction of Volterra models of nonlinear dynamic systems in the frequency domain", *Bulletin of NTU "KhPI". Special Issue: Informatics and Modeling*, No. 42 (1318), pp. 48-63.
12. 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, Published by WSEAS Press, pp. 423-428.
13. 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*, No. 1 (2), pp. 11-18.
14. Pavlenko, V.D., and Lomovoy, V.I. (2018), "Construction of an approximation model of a nonlinear dynamical system in the form of a Volterra polynomial", *Notes of the VI Taurida National University Vernadsky. Series: Technical Sciences*, vol. 29 (68), No. 6, pp. 200-205.
15. Pavlenko, S.V., and Pavlenko, V.D. (2015), "Regularization of the procedure for identifying nonlinear systems in the form of Volterra models" [Electronic resource], *System Identification and Management Tasks: Proceedings of the X International Conference SICPRO'15*, Moscow, January 26-29, Inst. of problems of management. V.A. Trapeznikova RAS, Moscow, IPU RAS, pp. 230-238.
16. Pavlenko, V.D., Lomovoy, V.I. and Issa, S.I.M. (2010), "Identification of a continuous communication channel with regard to its nonlinear and inertial properties", *East European Advanced Technology Journal*, Kharkov, No. 6/8 (48), pp. 13-18.
17. Pavlenko, V.D., Lomovoy, V.I., Speransky, V.A., and Ilyin, V.M (2011), "Radio frequency test method for wireless communications using Volterra model, In book: *Dynamical Systems. Nonlinear Dynamics and Control*". Editors: J. Awrejcewicz, M. Kaźmierczak, P. Olejnik, J. Mrozowski, Publisher Łódź, Poland, pp. 446-452.
18. Pavlenko, S.V. (2010), Wavelet filtering in the identification of non-linear systems based on Volterra models, *East European Advanced Technology Journal*, Kharkov, No. 6/4 (48), pp. 65-70.

The article was presented by Dr. Tech. Sciences, prof. NTU "KhPI", A.A. Serkov.

Received 15.04.2019

Lomovoy Volodimir, master
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

Pavlenko Vitaliy, Dr.Sci.Tech, Professor
Odessa National Polytechnical University
Ave. Shevchenko, 1, Odessa, Ukraine, 65044
tel./phone: (048) 705-84-36, e-mail: pavlenko_vitalij@ukr.net
ORCID ID: 0000-0002-5655-4171

УДК 681.5.015.52

Ідентифікація нелінійних динамічних систем на основі поліномів Вольєрра з використанням полігармонічних тестових сигналів / Ломовой В.І., Павленко В.Д. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2019. – № 13 (1338). – С. 74 – 84.

Запропоновано метод побудови апроксимаційної моделі Вольєрра нелінійних динамічних систем у частотній області з використанням тестових полігармонічних сигналів різної амплітуди. Обчислювальний метод ідентифікації заснований на використанні методу регуляризованих найменших квадратів і виборі оптимальної величини кроку по амплітуді тестових сигналів. Досліджується точність та обчислювальна стійкості методу ідентифікації у вигляді багатовимірних амплітудно- та фазо-частотних характеристик. Метод підвищує точність і стабільність результатів ідентифікації. Іл.: 2. Бібліогр.: 18 назв.

Ключові слова: нелінійні динамічні системи; апроксимаційна модель Вольєрра; полігармонічні тестові сигнали; метод регуляризованих найменших квадратів.

УДК 681.5.015.52

Идентификация нелинейных динамических систем на основе полиномов Вольерра с использованием полигармонических тестовых сигналов / Ломовой В.И., Павленко В.Д. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2019. – № 13 (1338). – С. 74 – 84.

Предложен метод построения аппроксимационной модели Вольерра нелинейных динамических систем в частотной области с использованием тестовых полигармонических сигналов различной амплитуды. Вычислительный метод идентификации основан на использовании метода наименьших квадратов с регуляризацией и выборе оптимальной величины шага по амплитуде тестовых сигналов. Исследуется точность и вычислительная устойчивость метода идентификации в виде многомерных амплитудно- и фазо-частотных характеристик. Метод повышает точность и стабильность результатов идентификации. Ил.: 2. Библиогр.: 18 назв.

Ключевые слова: нелинейные динамические системы; аппроксимационная модель Вольера; тестовые полигармонические сигналы; метод наименьших квадратов с регуляризацией.

UDC 681.5.015.52

Identification nonlinear dynamic systems based on Volterra polynomials with using polyharmonic test signals / Lomovoy V.I., Pavlenko V.D. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2019. – №.13 (1338). – P. 74 – 84.

The method is proposed for constructing the Volterra approximation model of the nonlinear dynamical systems in the frequency domain using of the test polyharmonic signals of various amplitudes. The computational identification method is based on the use of the regularized least squares method and the choice of the optimal step size on amplitude of test signals. The accuracy and computational stability of identification method in the form of multidimensional amplitude-frequency and phase-frequency characteristics are investigated. The method improves an accuracy and stability of the identification procedure. Figs.: 2. Refs.: 18 titles.

Keywords: nonlinear dynamic systems; Volterra approximation model; polyharmonic test signals; phase-frequency characteristics; regularized least squares method.

УДК 681.511.4:661.333(075)

DOI: 10.20998/2411-0558.2019.13.08

А. О. БОБУХ, канд. техн. наук, проф., НТУ "ХПІ",

Е. Є. ГЕРМАН, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПІ",

О. О. БОЛОТИНСЬКА, асп., НТУ "ХПІ",

А. М. ПЕРЕВЕРЗЄВА, асп., НТУ "ХПІ"

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ УПРАВЛІННЯ ТЕМПЕРАТУРОЮ ГІДРОКАРБОНАТНОЇ СУСПЕНЗІЇ ВИРОБНИЦТВА КАЛЬЦИНОВАНОЇ СОДИ

При дослідженні перехідних процесів управління температурою гідрокарбонатної суспензії виробництва кальцинованої соди за аміачним способом зміною витрат холодної води було отримано оптимальні параметри ПІД-регулятора за методом інтегральних критеріїв оцінки якості. Для оцінки використано сімейство вказаних критеріїв в залежності від ступеню похибки. Це дало можливість змінювати витрати холодної води, не впливаючи на оптимальні параметри температури гідрокарбонатної суспензії. Іл.: 2. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: перехідні процеси; гідрокарбонатна суспензія; виробництво кальцинованої соди; ПІД-регулятор; інтегральний критерій.

Постановка проблеми. Головною метою управління кожного виробництва є отримання якісного кінцевого продукту при мінімальних енергетичних та матеріальних затратах. Значні труднощі при управлінні процесами виробництва кальцинованої соди за аміачним способом (ВКС) завдають неконтрольовані зміни значень параметрів технологічних процесів, які викликані старінням обладнання, нестабільністю характеристик сировини тощо. Отримання гідрокарбонатної суспензії (ГС) є одним із основних та досить складним процесом у ВКС, тому що від цього процесу залежить функціонування інших процесів та техніко-економічні показники роботи ВКС в цілому. Одним із головних параметрів процесу отримання ГС є її температура (від цього параметру залежить якість ГС). Оптимальне управління температурою ГС забезпечується зміною витрати холодної води [1].

Для оптимізації управління температурою ГС необхідно проводити розрахунок оптимальних параметрів настроювань регуляторів, при яких система, будучи в достатній мірі стійкою, задовольняє прийнятим показниками якості перехідного процесу. Від якості налаштування регулятора залежить ефективність функціонування системи управління. Вибір оптимальних параметрів налаштування регуляторів є одним з найбільш важливих і складних етапів проектування системи управління. При цьому оптимальними налаштуваннями любого типу регуляторів називаються налаштування, які відповідають мінімуму (або максимуму)

якого-небудь показника якості [2 – 4].

Аналіз літератури. Вибір любого типу регулятора або необхідного закону управління для конкретного процесу (об'єкту) управління – завдання не з простих. На цей вибір впливає кілька чинників: вид передавальної функції процесу; або якщо об'єкт з запізненням, то вплив робить відношення загального запізнювання об'єкта до постійної часу тощо. Вибір типу регулятора також залежить від вимог до якості роботи системи управління, що проектується [2 – 4].

Близько 90 – 95% регуляторів, що знаходяться в даний час в експлуатації, використовують ПД – закон управління. ПД – регулятор відноситься до найбільш поширеного типу регуляторів. Причинами такої високої популярності є простота побудови, ясність функціонування, придатність для вирішення більшості практичних завдань та низька вартість. Використання ПД – закону управління в ВКС веде до підвищення якості готової продукції [3, 4].

Мета статті. Дослідження перехідних процесів управління температурою гідрокарбонатної суспензії виробництва кальцинованої соди зміною витрат холодної води для отримання оптимальних параметрів ПД-регулятора за методом інтегральних критеріїв оцінки якості.

Матеріали та результати аналізу. Метод інтегральних критеріїв оцінки якості є узагальненим методом, що дозволяє за перехідною динамічною складовою помилки системи досліджувати характер протікання перехідного процесу (ступінь його коливальності, коефіцієнт згасання, оптимальні параметри регулятора). Для використання методу інтегральних критеріїв оцінки якості необхідно на попередньому етапі отримати початкові значення для параметрів ПД-регулятора. Найпростішим способом отримання таких налаштувань є метод незатухаючих коливань Зіглера-Нікольса [4 – 7].

Алгоритм початкового налаштування ПД-регулятора методом Зіглера-Нікольса включає наступні кроки [7]:

Крок 1. Коефіцієнти посилення ПД-регулятора K_P встановлюються рівними нулю.

Крок 2. Після цього поступово збільшуємо пропорційний коефіцієнт посилення K_P до тих пір, доки в контурі управління розпочнуться автоколивання з коефіцієнтом автоколивального посилення $K_{АП}$ ПД-регулятора.

Крок 3. Далі здійснюється реєстрація коефіцієнтів автоколивального посилення $K_{АП}$ ПД-регулятора, де $K_{АП} = K_P$ за періодом коливань P_{AK} .

Параметри ПІД-регулятора є оптимальними, якщо вони обрані таким чином, що оцінка їх якості приймає екстремальне значення. Щоб оцінка якості мала реальний сенс, вона повинна являти собою число, яке завжди позитивне або дорівнює нулю. Тоді найкращими оптимальними параметрами ПІД-регулятора будуть ті, в яких ця оцінка якості має мінімальне значення [4 – 10].

Для знаходження оптимальних параметрів ПІД-регулятора було використано сімейство зважених інтегральних критеріїв оцінки якості в залежності від ступеню похибки (J):

$$J = \min \int_0^T t |e(t)|^k dt, \quad (1)$$

де T – верхня межа інтегрування; t – час за який змінюється температура ГС, що вимірюється в секундах; $e(t)$ – похибка; k – оптимальні значення ступеня похибки для ПІД-регулятора від 0.1, 0.2, 0.3,..., до 4.

Відповідно до сімейства зважених інтегральних критеріїв оцінки якості було отримано параметри ПІД-регулятора та побудовані криві перехідного процесу зміни температури ГС за часом (рис. 1), де t – час, що вимірюється в секундах, а T – температура у градусах Цельсія. Позначення на рис. 1 відповідають стандартному вигляду пакету програм MATLAB.

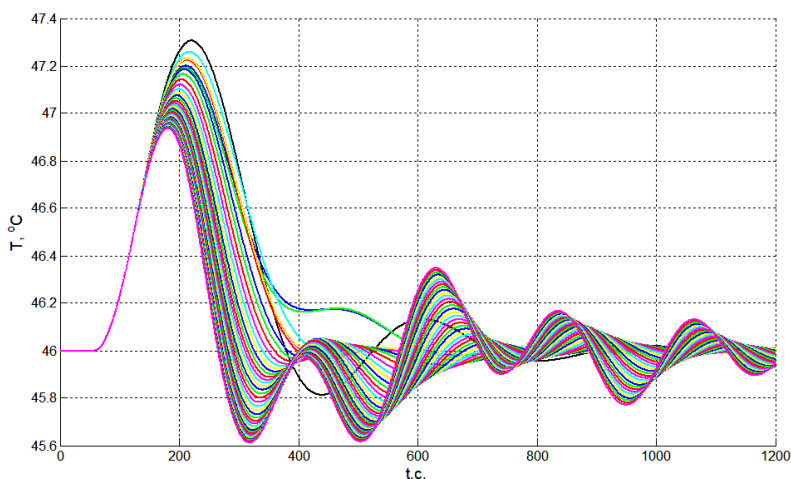


Рис. 1. Перехідні процеси відповідно до інтегральних критеріїв

Для наочності та розуміння, як ступінь похибки у даному випадку впливає на оптимальні параметри ПІД-регулятору досліджуваного

процесу, були побудовані поверхні перехідних процесів в залежності від ступеню похибки (k) (рис. 2), де t – час, що вимірюється в секундах, T – температура у градусах Цельсія, а також на рисунку відображено параметр k , який показує оптимальні значення ступеню похибки для ПІД-регулятора, налаштування якого застосовувалися для дослідження нашого процесу.

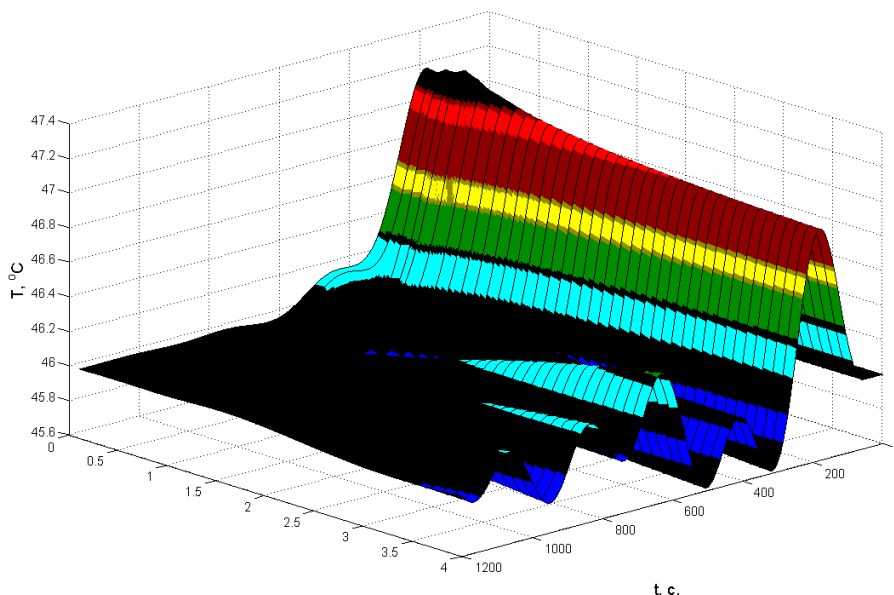


Рис. 2. Поверхня перехідних процесів

Висновок. Розроблено модель процесу управління температурою гідрокарбонатної суспензії ВКС за часом при зменшенні витрат холодної води. Для цього отримано попередні параметри управління, як початкові умови для використання сімейства інтегральних критеріїв та розраховано оптимальні параметри ПІД-регулятора. В результаті моделювання було отримано сімейство перехідних процесів та зроблено висновок, що за умов зменшення витрат холодної води, управління температурою гідрокарбонатної суспензії є оптимальним для задовільної роботи ВКС та високої якості кальцинованої соди.

Список літератури:

1. Dorf Richard. C. Modern Control Systems / C. Dorf Richard, H. Bishop Robert. – Pearson India, 2014. – 1048 p.
2. Болотинська О.О. Вибір методу математичного моделювання комп'ютерно-інтегрованої технології отримання суспензії гідрокарбонату натрію виробництва кальцинованої соди [Електронний ресурс] / О.О. Болотинська, А.О. Бобух // Сучасні

методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами: матеріали 5-ї Міжнар. наук.-техн. Internet-конф., 22 листопада 2018 р. – Київ: НУХТ, 2018. – С. 21. – Режим доступу: <https://drive.google.com/file/d/1JVwhxgpb0Kh0TfuO4W31FF4JOJzJHxos/view>, вільний.

3. Герман Е.Є. Методичні вказівки до виконання індивідуального домашнього завдання з курсу "КІТ". Частина І. Визначення параметрів регулятора за методом Зіглера-Нікольса з використанням Simulink для студентів напряму підготовки 050202 "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології" денної форми навчання / Уклад. Герман Е.Є., Подустов М.О., Шутинський О.Г., Лисаченко І.Г., Лобойко В.О., Деменкова С.Д. – Х.: НТУ "ХПІ", 2015. – 24 с.

4. Горлач Б.А. Математическое моделирование. Построение моделей и численная реализация / Б.А. Горлач, В.Г. Шахов. – М.: Лань, 2016. – 292 с.

5. Алпатов Ю.Н. Математическое моделирование производственных процессов / Ю.Н. Алпатов. – М.: Лань, 2016. – 136 с.

6. Герман Е.Є. Використання нечіткого регулятора в системі управління карбонізації у содовому виробництві / Е.Є. Герман, О.Г. Шутинський, О.М. Маковоз // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія. – 2016. – № 35. – С. 70-79. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vcpixx_2016_35_13.

7. Astrom K.J. Revisiting the Ziegler-Nichols step response method for PID control / K.J. Astrom, T. Hagglund // Journal of Process Control. – 2004. – № 4. – P. 635-650.

8. Д'яконов В.П. MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6® в математиці та моделюванні / В.П. Д'яконов. – Серія "Бібліотека професіоналу". – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 576 с.

9. Amos Gilat. MATLAB An Introduction with Applications / Gilat Amos. – Wiley, inc., 2017. – 411 p.

10. Справочные материалы по ПИД-регулятору в среде Simulink. Mathworks Inc. 2015. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <http://www.mathworks.com/help/simulink/slref/pidcontroller.tml>

References:

1. Dorf, Richard C., and Robert H., Bishop (2014), *Modern Control Systems*, Pearson India, 1048 p.

2. Bolotinska, O.O., and Bobuh, A.O. (2018), "Choice of the method of mathematical modeling of computer-integrated technology for obtaining a suspension of sodium bicarbonate from soda ash production", *Such methods, information, software and technical security systems for the management of organizational and technical and technological complexes: materials of 5-Yi Mizhnar. Scientific and Technical Internet Conference*, 22 november 2018, Kyiv : NUHT, 2018, P. 21.

3. German, E.E., Podustov, M.O., Shutinsky, O.G., Lisachenko, I.G., Loboyko, V.O., and Demenkova, S.D. (2015), *Guidelines for the completion of individual homework from the course "KIT". Part I. Determination of controller parameters by the Siegler-Nichols method using Simulink for students of the direction of preparation 050202 "Automation and computer integrated technologies" full-time education*, Kharkov, NTU "KHPI", 24 p.

4. Horlatch, B.A., and Shahov, V.G. (2016), *Mathematical modeling. Modeling and numerical implementation*, Moscow, Fallow deer, 292 p.

5. Alpatov, Yu.N. (2016), *Mathematical modeling of production processes*, Moscow, Fallow deer, 136 p.

6. German, E.E., Shutinskiy, O.G., and Makovoz, O.M. (2016), "Use of fuzzy controller in the system of carbonization management in soda production", *Visnik NTU "HPI". Seriya: Himiya, himichna tehnologiya ta ekologiya*, No. 35, pp. 70-79.
7. Astrom, K.J., and Hagglund, T. (2004), "Revisiting the Ziegler-Nichols step response method for PID control", *Journal of Process Control*, No. 4, pp. 635-650.
8. D'yakov, V.P. (2005), *"ATLAB 6.5 SP1/7 Simulink 5/6® in mathematics and simulation. Series "Professional Library"*, Moskow, SOLON-Press, 576 p.
9. Amos, Gilat (2017), *"MATLAB An Introduction with Applications"*, Wiley, inc., 411 p.
10. Reference materials on the PID controller in the Citylink environment. Mathworks Inc. 2015. [Electronic resource]. Access mode: URL: <http://www.mathworks.com/help/simulink/slref/pidcontroller.tml>.

Статтю представив д-р техн. наук, проф. HTУ "ХПІ" Подустов М.О.

Поступила (received) 19.04.2019

Повторно 14.05.2019

Bobukh Anatoly, PhD Tech.,
National Technical University "Kharkiv 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

German Eduard, PhD Tech.,
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Kirpicheva, 2, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel: +38 (050) 301-26-62, e-mail: german.khpi@ukr.net
ORCID ID: 0000-0002-8221-033X

Bolotynska Oleksandra, postgraduate,
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Kirpicheva, 2, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel: +38 (066) 088-40-03, e-mail: oleksandra.bolotynska@gmail.com
ORCID ID: 0000-0003-4236-696X

Pereverzieva Alevtyna, postgraduate,
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Str. Kirpicheva, 2, Kharkov, Ukraine, 61002
Tel: +38 (095) 253-12-63, e-mail: pereverzieva_alya@ukr.net
ORCID ID: 0000-0003-2072-2521

УДК 681.511.4:661.333(075)

Дослідження перехідних процесів управління температурою гідрокарбонатної суспензії виробництва кальцинованої соди / Бобух А.О., Герман Е.Є., Болотинська О.О., Переверзева А.М. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2019. – № 13 (1338). – С. 86 – 92.

При дослідженні перехідних процесів управління температурою гідрокарбонатної суспензії виробництва кальцинованої соди за аміачним способом зміною витрат холодної води було отримано оптимальні параметри ПІД-регулятора за методом інтегральних критеріїв оцінки якості. Для оцінки використано сімейство вказаних критеріїв в залежності від ступеню похибки. Це дало можливість змінювати витрати холодної води, не впливаючи на оптимальні параметри температури гідрокарбонатної суспензії. Іл.: 2. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: перехідні процеси; гідрокарбонатна суспензія; виробництво кальцинованої соди; ПІД-регулятор; інтегральний критерій.

УДК 681.511.4:661.333(075)

Исследование переходных процессов управления температурой гидрокарбонатной суспензии производства кальцинированной соды / Бобух А.А., Герман Э.Е., Болотинская А.А., Переверзева А.М. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2019. – № 13 (1338). – С. 86 – 92.

При исследовании переходных процессов управления температурой гидрокарбонатной суспензии производства кальцинированной соды по аммиачному способу изменением расхода холодной воды были получены оптимальные параметры ПИД-регулятора по методу интегральных критериев оценки качества. Для оценки использовано семейство указанных критериев в зависимости от степени погрешности. Это дало возможность изменять расход холодной воды, не влияя на оптимальные параметры температуры гидрокарбонатной суспензии. Ил.: 2. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: переходные процессы; гидрокарбонатная суспензия; производство кальцинированной соды; ПИД-регулятор; интегральный критерий.

UDC 681.511.4:661.333(075)

Study transition temperature control processes hydrocarbonate suspension soda ash / Bobukh A.O., German E.E., Bolotynska O.O., Pereverzeva A.M. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2019. – №.13 (1338). – P. 86 – 92.

In the study of transient temperature control hydrocarbonate suspension soda ash production method for changing the ammonia flow rate of cold water optimum PID controller parameters according to the method of integral quality criteria for evaluation was obtained. For evaluation, a family of specified criteria was used depending on the degree of error. This made it possible to change the flow rate of cold water without affecting the optimal temperature parameters of the hydrocarbonate suspension. Figs.: 2. Refs.: 10 titles.

Keywords: transients; hydrocarbonate suspension; soda ash production; PID controller; integral criterion.

УДК 004.932:519.652

DOI: 10.20998/2411-0558.2019.13.09

В. В. МОРОЗ, канд. техн. наук, проф., ОНУ імені І.І. Мечникова, Одеса,

М. А. ШВАНДТ, бакалавр, ОНУ імені І.І. Мечникова, Одеса

ДОСЛІДЖЕННЯ РУХУ ТА ПОВЕДІНКИ ЛАБОРАТОРНИХ ТВАРИН МЕТОДАМИ ДЕТЕКТУВАННЯ І ТРЕКІНГУ ОБ'ЄКТІВ

Запропоновано метод детектування і відстеження руху об'єкту на основі поєднання принципу віднімання фону з методами обробки зображень. На прикладі дослідження поведінки лабораторних тварин розроблений відповідний алгоритм, так як існуючі алгоритми не дають прийнятних результатів. Наведено результати роботи алгоритму та виконаний порівняльний аналіз результатів обчислювального експерименту з відомими алгоритмами трекінгу і аналізу руху. Розглянуто можливість розширення сфери застосування алгоритму для більшої кількості об'єктів. Іл.: 7. Бібліогр.: 9 назв.

Ключові слова: алгоритми трекінгу; аналіз руху; принцип віднімання фону; методи обробки зображень.

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень. Має місце тестова установка, що являє собою ящик із 16 отворами, які зроблені рівномірно по площині основи установки. В середині установки рухається єдиний об'єкт трекінгу – лабораторна миша. Над установкою вертикально розташована камера, кут огляду якої зверху охоплює всю установку. Відбувається фіксація на відео рухів тварини. На отриманому відео треба відстежити наступні параметри, що пов'язані із горизонтальною руховою активністю миші, а саме:

- автоматично визначити об'єкт трекінгу (мишу) та центр установки (область між 16 отворами);
- відстежувати траєкторію руху миші по установці;
- фіксувати моменти, коли миша заходить у центр і виходить з нього;
- скільки часу миша провела у центрі установки і поза її центром.

Впродовж останніх двох десятиліть задачі відстеження руху об'єктів набули широкого застосування в різних сферах науки, техніки і повсякденні, внаслідок чого було розроблено декілька різних підходів [1 – 8] до їх розв'язання. Розглянемо підходи, які засновані на алгоритмах без попередньої обробки зображень.

1. Трекінг об'єкта за кольором. На першому кадрі обирається певна область із однорідним забарвленням і потім, поступово, вона

відшукується на кожному наступному кадрі за своїми кольоровими характеристиками. Цей підхід доволі простий та має суттєвий недолік – інформація про колір чутлива до умов освітлення і буде погано працювати коли задній фон мало відрізняється від кольору об'єкта.

2. Інтерактивний трекінг. Алгоритм досліджує і вивчає характеристики об'єкта під час його відстеження. Одним з таких алгоритмів є CAM (Continuously Adaptive Meanshift – алгоритм неперервного адаптивного зсуву середнього значення), що являє собою модифікацію алгоритму Meanshift. Спочатку виділяється область інтересу, яку треба відстежити, на ній обираються декілька точок за кольоровою гістограмою та за ними обчислюється центроїд. Якщо об'єкт трекінгу посунувся, а за ним і область інтересу із точками, то, відповідно, змінюється і центроїд. Рух центроїду вказує на напрям, в якому зсунувся об'єкт. Модифікований алгоритм CAM дозволяє додатково масштабувати область трекінгу та визначати орієнтацію об'єкта.

3. Трекінг на основі детектування точок за допомогою операторів визначення кутів. Визначити окрему точку на зображенні іноді може бути достатньо складно, тому кут розглядається як окремий випадок точки. Для їх пошуку можна використовувати різні методи, як, наприклад, оператор Харріса (Harris corner detector) або детектор кутів Ши-Томаші (Shi-Tomasi corner detector).

4. Трекінг на основі точкових особливостей – Feature-based tracking. Йдеться про відстеження індивідуальних точкових особливостей. Його перевага в тому, що не треба відшукувати точкові особливості на кожному кадрі, достатньо визначити їх лише один раз і далі відстежувати їх на наступному кадрі, що підвищує ефективність даного підходу. Коли визначаються точкові особливості, то разом із ними обчислюються вектори переміщень і таким чином показується рух ключових точок між двома послідовними кадрами. Прикладами алгоритмів пошуку точкових особливостей є відомі алгоритми SIFT (Scale-Invariant Features), SURF (Speeded Up Robust Features), KAZE (назва від японського слова, яке означає вітер і посилається на потік повітря, керованого нелінійними процесами на великих масштабах).

5. Трекінг на основі обчислення оптичного потоку. В даному підході застосовується оцінка видимого руху. Серед широкого кола методів оцінки руху найбільш відомим є метод Лукаса-Кеннеде (Lucas-Kanade method). В даному методі на поточному кадрі береться блок пікселів розміру 3×3 із центром в особливих точках. Для кожного такого блоку виконується пошук в його околі на попередньому кадрі найбільш близького блоку за заданою метрикою. Вектор між їх центрами буде вважатися вектором зсуву/руху. Ця операція виконується для усіх

точкових особливостей і так отримують усі вектори руху. У методі ж Фарнебека (Farneback algorithm) пошук в околі використовується за допомогою квадратичної поліноміальної апроксимації. Завдяки тестам було встановлено, що жоден з існуючих підходів при прямому застосуванні не дає прийнятних результатів для поставленої задачі. Тому необхідна розробка нових підходів та алгоритмів для розв'язання поставленої задачі.

Ціллю статті є створення алгоритму, що буде мати невисоку обчислювальну складність і високу якість детектування і трекінгу об'єкта та може базуватися на одному з перерахованих підходів або буде поєднувати в собі елементи декількох.

Математична модель. Враховуючи вказані вище переваги та недоліки окремо взятих підходів трекінгу запропоновано окремий алгоритм для вирішення поставленої задачі. Він складається з декількох етапів.

На першому етапі аналізується зображення тестової установки (рис. 1) без об'єкта трекінгу. Надалі алгоритм працюватиме із чорно-білими зображеннями. Зображення установки треба попередньо перетворити на зображення у відтінках сірого (grayscale).

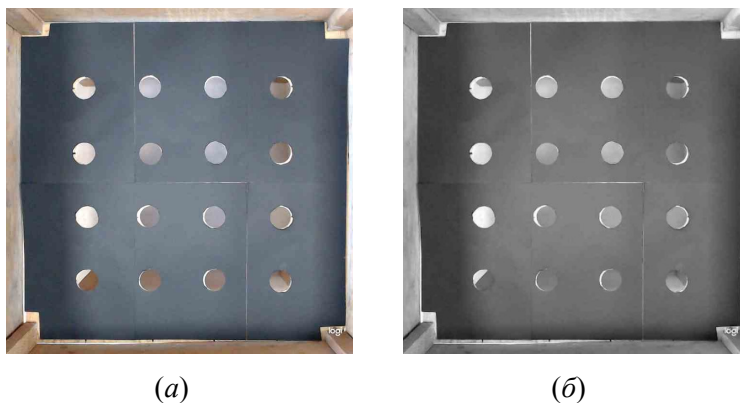


Рис. 1. Зображення тестової установки

a – оригінальне кольорове, без об'єкта трекінгу на ньому; *б* – перетворене на grayscale-зображення

На оригінальному зображенні можуть бути шуми, що залишаються навіть після перетворення його в grayscale, і які можуть заважати подальшому аналізу. Щоб їх позбутися, застосуємо двовірний фільтр Гаусса високих частот

$$G(X, Y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \cdot e^{-\frac{X^2 + Y^2}{2\sigma^2}}, \quad (1)$$

де X – ядро перетворення по осі OX ; Y – ядро перетворення по осі OY ; σ – стандартне відхилення розподілу Гауса.

Застосовувалися ядра перетворення у вигляді квадратних матриць. Наприклад, ядро перетворення X з розмірами 3×3 має вигляд

$$X = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

а ядро перетворення Y з розмірами 5×5 має вигляд:

$$Y = \begin{pmatrix} -2 & -2 & -2 & -2 & -2 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \end{pmatrix}.$$

Результат дії фільтра Гауса показано на рис. 2.

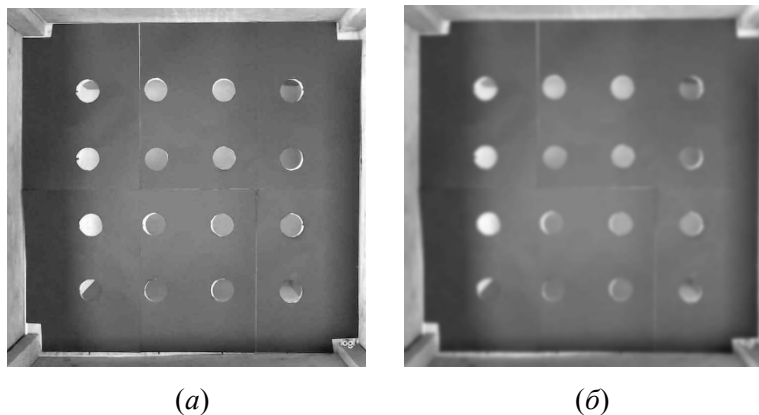


Рис. 2. Приклад дії фільтра Гауса

a – початкове grayscale-зображення; $б$ – після використання фільтра Гауса із ядром 19×19 .

На другому етапі визначається центр установки, який являє собою простір поміж круговими отворами на дні, за допомогою алгоритма детектування кіл Хога (СНТ – Circle Hough Transform) [3]. Цей алгоритм

є модифікованою версією перетворення Хога (Hough Transform) і застосовується для детектування кіл на зображеннях з недостатньою якістю. Для цього замінюється рівняння кривої у звичайному перетворенні Хога. В явній формі воно може бути задано як рівняння кола $(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r^2$.

Завдяки цьому алгоритму ми визначаємо усі кола включно з положенням їх центрів. Оскільки центри усіх кіл визначені, то легко знайти ті кола, що фактично формують кути центру установки. Для цього беруться усі екстремальні координати центрів кіл і з них формуються кутові точки для квадрату, що є центром установки. Ці дані будуть в подальшому використані для відстеження тих моментів, коли об'єкт заходить в центр чи покидає його, а також для підрахунку часу знаходження в центрі і поза його межами. Також це дає змогу візуально позначити на зображенні межі центру. Нижче наведений результат роботи за потрібними параметрами (рис. 3).

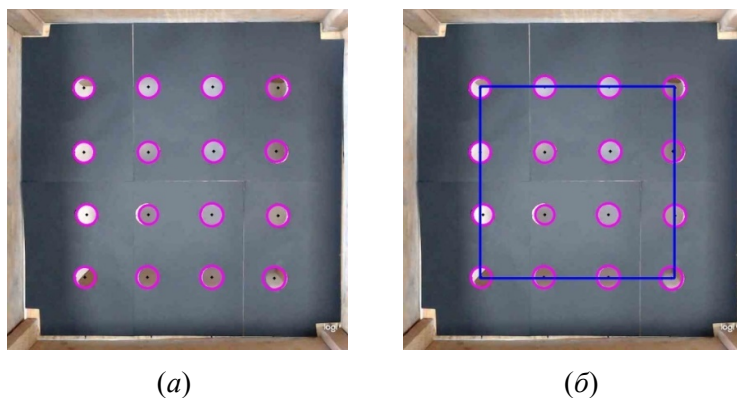


Рис. 3. Приклад дії алгоритму Хога
 а – знайдені кола (позначені пурпурним) та їх центри (чорні точки);
 б – автоматично визначений центр установки

Для безпосереднього детектування і трекінгу самого об'єкту (миші) виконується послідовне зчитування кадрів відео. Кожен кадр також перетворюється на зображення типу grayscale. До нього також застосовується низькочастотний фільтр Гаусса (рис. 4).

Далі проводиться операція віднімання фону [1] (рис. 5), а саме розраховується абсолютна різниця між двома зображеннями – між grayscale-зображенням установки без миші та черговим grayscale-кадром відео:

$$d_{i,j} = |b_{i,j} - f_{i,j}|, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m}, \quad (2)$$

де $d_{i,j}$ – елемент нового зображення, що, власне, являє собою різницю зображень; $b_{i,j}$ і $f_{i,j}$ – відповідно елементи зображення порожньої установки та кадру з відео; $i = \overline{1, n}$; $j = \overline{1, m}$ – відповідно ширина і висота кадру (співпадають із зображенням порожньої установки).

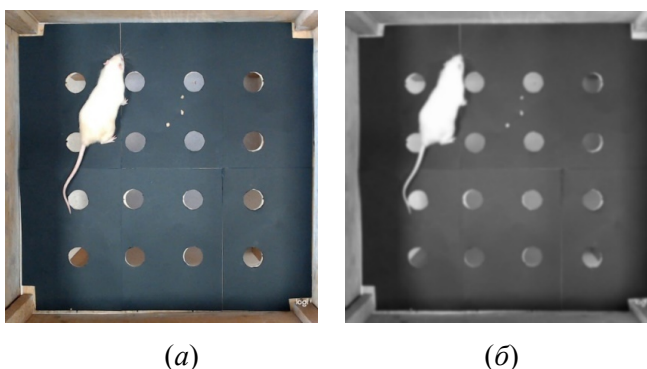


Рис. 4. Обробка кадру

a – кадр з відео; b – кадр відео, переведений у grayscale разом із використанням фільтра Гауса

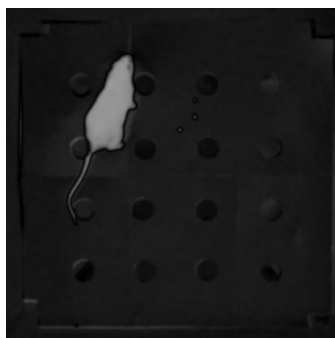


Рис. 5. Результат різниці заднього фону та кадру відео

Після цього застосовується бінарізація за пороговим значенням [3] (рис. 6).

У разі, якщо в бінарному зображенні знаходиться більше однієї області, яка є образом об'єкта, то для її очищення застосовується операція дилатації [5].



Рис. 6. Бінарне зображення, отримане в наслідок використання фільтру з пороговим значенням $threshold = 120$

На наступному етапі визначаються координати об'єкта. Оскільки область трекінгу – миша, область буде постійно змінювати форму. Тому для спрощення задачі з визначення координат будемо брати центроїд всієї області. Його можна порахувати за допомогою моментів бінарного зображення [9]

$$M_{i,j} = \sum_x \sum_y x^i y^j I(x,y).$$

Якщо площу позначити як M_{00} , тоді центроїд будемо обчислювати як

$$\{\bar{x}, \bar{y}\} = \left\{ \frac{M_{10}}{M_{00}}, \frac{M_{01}}{M_{00}} \right\}.$$

Таким чином отримуються приблизні координати розташування миші на полі. Оскільки нам вже відомі межі центру установки, то надалі ми можемо за допомогою перевірки координат меж центрального квадрату та положення миші слідкувати за її напрямками руху, рахувати кількість перетинів центру і фіксувати, скільки часу було проведено в ньому і поза його межами.

Результати роботи алгоритму. Описаний вище алгоритм був реалізований з використанням бібліотеки програм комп'ютерного зору OpenCV. На рис. 7 показаний результат роботи програми для одного кадру відео. Програма для кожного кадру обчислює положення миші в тестовій установці і виводить її координати. Центр координат знаходиться у верхньому лівому куті зображення, червоним кольором позначені контури миші, визначені ще на етапі бінарізації за допомогою оператора Кенні (Canny edge detector).

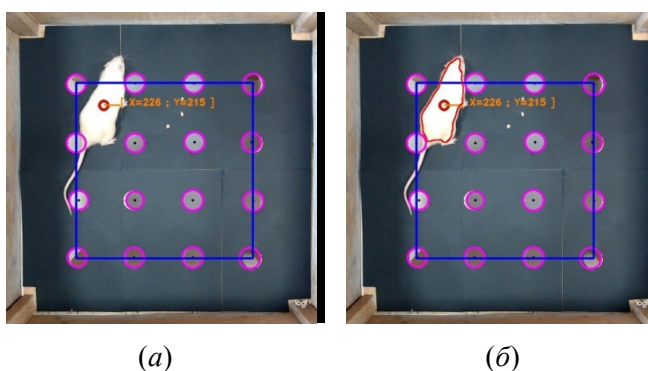


Рис. 7. Візуалізація фінального результату
а – червоним колом позначене умовне положення об'єкту трекінгу;
б – позначені приблизні контури об'єкту

На відміну від інших описаних раніше алгоритмів трекінгу, що втрачали об'єкт трекінгу або взагалі не могли його зафіксувати, запропонований алгоритм забезпечує стабільне відстеження миші. Оскільки на кожному кадрі відео ми знаємо її положення і нам відома частота кадрів у відео, ми легко можемо реалізувати підрахунок часу, впродовж якого миша знаходилася в центрі тестового поля і поза ним.

Перспективи подальших досліджень. Алгоритм трекінгу на основі різниці зображень дозволяє доволі точно детектувати об'єкт і відслідковувати його рух. Це дає змогу знаходити контури потрібного об'єкту в кадрі і виконувати подальший аналіз. Даний алгоритм може бути застосований для відслідковування руху і інших типів об'єктів. Надалі планується модифікація цього алгоритму для його застосування у випадках збільшення кількості об'єктів трекінгу та за умови їх часткового перекриття.

Висновки. В даній роботі проаналізовані існуючі алгоритми детектування і трекінгу, запропонований і реалізований алгоритм детектування і трекінгу лабораторної миші. Тестові результати показали стійку роботу алгоритму в порівнянні з існуючими. Алгоритм має стабільну роботу за умови, якщо задній фон сильно контрастує із самим об'єктом трекінгу. Якщо ця умова не буде виконана, при спробі відфільтрувати різницю зображень за пороговим значенням, результатом може стати повністю біле або чорне зображення, оскільки модуль різниці в рівнянні (2) буде менший за порогове значення. Тому цей алгоритм апіорі потребує певних технічних умов для його використання, але це

компенсується стабільністю роботи, особливо на об'єктах, що постійно змінюють свою форму.

Список літератури:

1. Prateek Joshi. OpenCV By Example / Joshi Prateek, Escrivá David Millán, Godoy Vinicius // Birmingham, Packt Publishing Ltd. – 2016. – P. 164-174, 189-215.
2. Amar Mitiche J.K. Aggarwal Computer Vision Analysis of Image Motion by Variational Methods / J.K. Amar Mitiche // Springer International Publishing, Switzerland. – 2014. – P. 143-175.
3. Mark Nixon. Feature Extraction & Image Processing for Computer Vision / Nixon Mark, Aguado Alberto // Third edition. – London, Elsevier Ltd. – 2012. – P. 93-101, 124-130, 250-255.
4. Ruizhe Wang. Capturing Dynamic Textured Surfaces of Moving Targets / Wang Ruizhe, Wei Lingyu, Vouga Etienne, Huang Qixing, Ceylan Duygu, Medioni Gerard, Li Hao // Toyota Technological Institute at Chicago, Adobe Research. – 2016. – 22 p.
5. Lowe D.G. Object recognition from local scale-invariant features / D.G. Lowe // International Conference on Computer Vision. – ICCV. – 1999. – Vol. 2. – P. 1150-1157.
6. Belongie S. Shape Matching and Object Recognition Using Shape Contexts / S. Belongie, J. Malik, J. Puzicha // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – April 2002. – 14 p.
7. Pramod Sharma. Ram Nevatia Unsupervised Incremental Learning for Improved Object Detection in a Video / Sharma Pramod, Huang Chang // University of Southern California, Los Angeles. – CA2NEC Labs. – Cupertino, CA – 2012. – 8 p.
8. Borovicka Jaroslav. Circle Detection Using Hough Transforms / Jaroslav Borovicka // Documentation. – Available at: pinus@centrum.cz, jb2383@bris.ac.uk – 28 p.
9. Zhang Y. Pathological Brain Detection based on wavelet entropy and Hu moment invariants / Y. Zhang // Bio-Medical Materials and Engineering. – 2015. – 26. – P. 1283-1290.

References

1. Joshi, P., Escrivá, D.M., and Godoy, V. (2016), "OpenCV By Example", *Packt Publishing Ltd.*, Birmingham, pp. 164-174, 189-215.
2. Mitiche, A., and Aggarwal, J.K. (2014), "Computer Vision Analysis of Image Motion by Variational Methods", *Springer International Publishing*, Switzerland, pp. 143-175.
3. Nixon, M., and Aguado, A. (2012), *Feature Extraction & Image Processing for Computer Vision. Third edition*, Elsevier Ltd., London, pp. 93-101, 124-130, 250-255.
4. Wang, R., Wei, L., Vouga, E., Huang, Q., Ceylan, D., Medioni, G. and Li, H. (2016), *Capturing Dynamic Textured Surfaces of Moving Targets*, Adobe Research, Toyota Technological Institute at Chicago, 22 p.
5. Lowe, D.G. (1999), "Object recognition from local scale-invariant features", *International Conference on Computer Vision, ICCV*, Vol. 2, pp. 1150-1157.
6. Belongie, S., Malik, J. and Puzicha, J. (2002), "Shape Matching and Object Recognition Using Shape Contexts", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14 p.
7. Sharma, P., Huang, C. and Nevatia, R. (2012), "Unsupervised Incremental Learning for Improved Object Detection in a Video", *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 8 p.
8. Borovicka, J. "Circle Detection Using Hough Transforms", available at: <https://www.borovicka.org/files/research/bristol/hough-report.pdf>.

9. Zhang, Y. (2015), "Pathological Brain Detection based on wavelet entropy and Hu moment invariants", *Bio-Medical Materials and Engineering*, No. 26, pp. 1283-1290.

*Статтю представив д-р техн. наук, проф. ОНУ імені І.І. Мечникова
Гунченко Ю.А.*

Надійшла (received) 03.05.2019

Moroz Volodymyr, PhD in Applied Mathematics, Professor
Odessa I.I. Mechnikov National University
Str. Dvoryans'ka, 2, Odesa, Ukraine, 65072
tel./phone: (+380) 67-484-6975, e-mail v.moroz@onu.edu.ua

Shvandt Maxim, bakakavr
Odessa I.I. Mechnikov National University
Str. Dvoryans'ka, 2, Odesa, Ukraine, 65072
tel./phone: (+380) 48-723-5254, e-mail maxim.shvandt@gmail.com

УДК 004.932:519.652

Дослідження руху та поведінки лабораторних тварин методами детектування і трекінгу об'єктів / Мороз В.В., Швандт М.А. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2019. – № 13 (1338). – С. 93 – 103.

Запропоновано метод детектування і відстеження руху об'єкту на основі поєднання принципу віднімання фону з методами обробки зображень. На прикладі дослідження поведінки лабораторних тварин розроблений відповідний алгоритм, так як існуючі алгоритми не дають прийнятних результатів. Наведено результати роботи алгоритму та виконаний порівняльний аналіз результатів обчислювального експерименту з відомими алгоритмами трекінгу і аналізу руху. Розглянуто можливість розширення сфери застосування алгоритму для більшої кількості об'єктів. Ил.: 7. Бібліогр.: 9 назв.

Ключові слова: алгоритми трекінгу; аналіз руху; принцип віднімання фону; методи обробки зображень.

УДК 004.932:519.652

Исследование движения и поведения лабораторных животных методами детектирования и трекинга объектов / Мороз В.В., Швандт М.А. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2019. – № 13 (1338). – С. 93 – 103.

Предложен метод детектирования и отслеживания движения объекта на основе сочетания принципа вычитания фона с методами обработки изображений. На примере исследования поведения лабораторных животных разработан соответствующий алгоритм, так как существующие алгоритмы не дают приемлемых результатов. Приведены результаты работы алгоритма и выполнен сравнительный анализ результатов вычислительного эксперимента с известными алгоритмами трекинга и анализа движения. Рассмотрена возможность расширения сферы применения алгоритма для большего количества объектов. Ил.: 7. Библиогр.: 9 назв.

Ключевые слова: алгоритмы трекинга; анализ движения; принцип вычитания фона; методы обработки изображений.

UDC 004.932:519.652

Study of movement and behavior of laboratory animals by methods of object detection and tracking / Moroz V.V., Schwandt M.A. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2019. – №.13 (1338). – P. 93 – 103.

The method of detecting and tracking the motion of an object based on a combination of the principle of subtraction of the background with the methods of image processing is proposed. An example of a study of the behavior of laboratory animals developed an appropriate algorithm, since existing algorithms do not provide acceptable results. The results of the algorithm are presented and a comparative analysis of the results of a computational experiment with known algorithms of tracking and motion analysis is performed. The possibility of expanding the scope of the algorithm for a larger number of objects is considered.. Figs.: 7. Refs.: 9 titles.

Keywords: algorithms of tracking; motion analysis; principle of subtraction of the background; image processing.

УДК 004.8: 004.89: 519.7

DOI: 10.20998/2411-0558.2019.13.10

І. Ф. ПОВХАН, канд. техн. наук, доц., ДВНЗ "Ужгородський національний університет"

ЗАДАЧА ЗАГАЛЬНОЇ ОЦІНКИ СКЛАДНОСТІ МАКСИМАЛЬНОГО ПОБУДОВАНОГО ЛОГІЧНОГО ДЕРЕВА КЛАСИФІКАЦІЇ

Робота присвячена проблемам теорії розпізнавання дискретних об'єктів, які пов'язані з загальною оцінкою складності результуючого логічного дерева класифікації. Дається загальна оцінка складності отриманих граф-схемних моделей у вигляді логічних дерев. Виведені числові оцінки в перспективі дозволяють розробити ефективні моделі схем мінімізації логічних дерев класифікації, а отже отримати мінімальну форму системи розпізнавання дискретних об'єктів. Отримані результати принципово важливі в задачах, які пов'язані з логічними деревами класифікації. Робота актуальна для всіх методів розпізнавання образів в яких отримана функція класифікації може бути представлена у вигляді логічного дерева. Бібліогр.: 11 назв.

Ключові слова: розпізнавання образів; логічне дерево; граф-схемні моделі; оцінка складності; функція класифікації.

Вступ. Як відомо з робіт [1, 2], довільну побудовану систему розпізнавання у вигляді дерева класифікації можна записати або в ДНФ, або в КНФ формі. Так дерево розпізнавання, яке являє собою певне правило класифікації, можна представити за допомогою відповідної логічної функції. Отже важливими проблемами при побудові систем розпізнавання такого типу – будуть задачі синтезу логічних функції, які еквівалентні даному дереву розпізнавання, оцінка їх складності, задача мінімізації отриманого дерева.

Дане дослідження є логічним продовженням циклу робіт [3 – 6] в яких піднімаються принципові питання пов'язані з логічними деревами класифікації (в даному випадку під логічним деревом будемо розуміти деяке граф-схемне представлення результуючої схеми розпізнавання образів), як питання мінімізації логічних дерев, дослідження стійкості щодо перестановки ярусів, оцінки складності найбільшого дерева, загальний алгоритм побудови самого складного логічного дерева. Тут досліджується складність граф-схемних моделей (логічних дерев класифікації), які конструюються в процесі навчання системи розпізнавання (логічне дерево класифікації фактично представляє собою згенеровану функцію розпізнавання). Для цього оцінюється складність дерева, яке використовується в схемі розгалуженого вибору ознак для розпізнавання дискретних наборів (об'єктів).

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Дане

© І.В. Повхан, 2019

дослідження є прямим продовженням роботи [7] в якій розглядалася схема (метод) побудови самого складного дерева класифікації в задачах розпізнавання образів та роботи [3] присвяченій оцінці складності найбільшого можливого логічного дерева.

В приведеній оцінці складності з [7]:

$$\left. \begin{aligned} K_1 K_2 \dots K_{m-1} &\leq K^{K_m K_{m+1} \dots K_n} \\ K_1 K_2 \dots K_m &> K^{K_{m+1} K_{m+2} \dots K_n} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

в даній роботі розглянемо випадок коли в першому співвідношенні виконується строга нерівність, тобто $K_1 K_2 \dots K_{m-1} < K^{K_m K_{m+1} \dots K_n}$. Зауважимо, що тут та в подальшому K_i – кількість вершин (міток, функцій) на i -му ярусі, а m – безпосередньо ярус злому [7] де виконується співвідношення (1).

На початку, будемо припускати, що зафіксована деяка система ознак $P_1, P_2, \dots, P_n$, $(0 \leq P_i \leq k_i - 1)$, $(i = 1, 2, \dots, n)$ та деяка система символів $O_0, O_1, \dots, O_{k-1}$. Будемо також рахувати, що ознаки $P_1, P_2, \dots, P_n$ – впорядковані (наприклад в такому порядку, в якому вони записані тут).

Будемо розглядати всі регулярні логічні дерева, тобто такі у яких в вершинах i -го ярусу стоїть ознак P_i , $(1 \leq i \leq n)$, а в вершинах $(n+1)$ -го ярусу стоять символи $O_0, O_1, \dots, O_{k-1}$ – значення функцій $f_R(P_1, \dots, P_n)$.

Нехай задане регулярне дерево D . Через $|D|$ позначимо кількість всіх різних міток, які отримуються в результаті процесу розстановки міток на дереві D . Очевидно, що $|D|$ дорівнює кількості вершин $\tilde{D}$ [6]. Задача полягає в тому, що серед всіх регулярних дерев D знайти таке дерево, для якого величина $|D|$ буде найбільшою. Максимальне дерево позначимо через $D_{\max}$.

Множину всіх вершин, які стоять в ярусах з номерами i , де $l \leq i \leq s$, $(1 \leq l \leq s \leq n)$ будемо називати полосою. Полосу, яка складається з ярусів з номерами i , $l \leq i \leq s$, позначимо через D_s^l . Через $|D_s^l|$ – позначимо кількість всіх різних між собою міток, які стоять в полосі D_s^l .

Логічне дерево розпізнавання, яке являє собою певне правило класифікації, можна представити за допомогою відповідної логічної функції. Отже важливою проблемою при побудові схеми розпізнавання (відповідного логічного дерева) такого типу буде проблема синтезу логічної функції, яка еквівалентна даному дереву розпізнавання. Зі

збільшенням числа аргументів логічної функції (результуючого дерева) швидко зростає складність одного з етапів синтезу функції – етапу мінімізації [8, 9].

Виходом з даного положення може бути не знаходження її мінімальної форми, а представлення у вигляді декомпозиції функцій (відповідних дерев). Важливими перевагами методу дерева для мінімізації логічних функцій (результуючих схем класифікації) є те, що з деревом досить просто працювати при великій кількості аргументів [10].

Мета роботи та задачі дослідження. Отже зважаючи на вище сказане метою даною роботи буде отримання загальної оцінки складності отриманих граф-схемних моделей у вигляді логічних дерев. Саме це дозволить розробити ефективний метод мінімізації логічних дерев, а отже отримати в перспективі найбільш мінімальну та ефективну форму результуючої схеми розпізнавання, що дозволить економити процесорний час на її роботу та оперативну пам'ять для зберігання. Для досягненн мети були поставлені такі завдання:

- Показати особливості представлення функцій розпізнавання у вигляді логічних дерев.
- Дослідити побудоване в роботі регулярне логічне дерево та визначити ярус злому даної структури.
- Представити числові оцінки та загальну схему оцінки складності дослідженого логічного дерева

Основна частина. Розглянувши в співвідшенні (1) випадок коли в першій частині виконується строга нерівність, тобто $K_1 K_2 \dots K_{m-1} < K^{K_m} K^{K_{m+1}} \dots K^{K_n}$, приходимо до двох можливих варіантів:

$$a) K_1 K_2 \dots K_{m-1} \leq K^{K_m K_{m+1} \dots K_n} - K^{K_{m+1} K_{m+2} \dots K_n}, \quad (2)$$

$$б) K_1 K_2 \dots K_{m-1} > K^{K_m K_{m+1} \dots K_n} - K^{K_{m+1} K_{m+2} \dots K_n}.$$

Зауважимо, що тут і далі K_i – кількість вершин (міток, функцій) на i -му ярусі.

Величина $K^{K_m K_{m+1} \dots K_n} - K^{K_{m+1} K_{m+2} \dots K_n}$ представляє собою кількість всіх функцій вигляду $f_a(P_m, P_{m+1}, \dots, P_n)$, які істотно залежать від ознаки P_m .

На першому етапі дослідження розглянемо випадок (2, а). В цьому випадку в m -му ярусі можна розмістити таким чином функції $f_a(P_m, P_{m+1}, \dots, P_n)$, що вони будуть істотно залежати від ознаки P_m , причому в різних вершинах a та b m -го ярусу будуть стояти різні

функції f_a та f_b . Розташувавши тільки що вказаним чином функції f_a в m -му ярусі, отримаємо деяке дерево D^0 .

Розглянемо в цьому дереві полоси $(D^0)_m^1$ та $(D^0)_{n+1}^{m+1}$. В роботі [6] було показано, що при побудові дерева D^0 , множина міток, які стоять в полосах $(D^0)_m^1$ та $(D^0)_{n+1}^{m+1}$ не перетинаються між собою. Крім того, в полосі $(D^0)_m^1$ в різних вершинах стоять різні мітки. Виникає питання, чи можна в дереві D^0 в $(m+1)$ -му ярусі розмістити всі функції, які залежать від ознак $P_{m+1}, \dots, P_n$ (тобто – ставиться питання, чи можна не міняючи вищевказаної основної властивості дерева D^0 , добитися ще того, що би в $(m+1)$ -му ярусі дерева D^0 стояли всі функції, які залежать від ознак $P_{m+1}, \dots, P_n$).

Друге з базових співвідношень (1) вказує на те, що можна добитися тільки що вказаної конструкції дерева D^0 .

Дійсно з нього видно, що в $(m+1)$ -му ярусі дерева D^0 завжди знайдуться такі дві різні вершини a та b , що $f_a = f_b$. Якщо в $(m+1)$ -му ярусі дерева D^0 не входить деяка функція $\varphi(P_{m+1}, \dots, P_n)$, тоді замінивши в вершині a функцію f_a на φ , можна добитися того, що φ буде входити в $(m+1)$ -й ярус дерева D^0 . Зауважимо, що при цьому ніякі функції з $(m+1)$ -го ярусу не входять та основна властивість логічного дерева не міняється.

Зауважимо також, що під основною властивістю дерева D^0 будемо розуміти те, що в m -му ярусі дерева D^0 в усіх вершинах стоять різні функції.

Послідовно виконуючи вищевказані вставки невисначуючих функцій φ в $(m+1)$ -й ярус, можна добитися ще того, що в $(m+1)$ -му ярусі дерева D^0 , будуть стояти всі функції, які залежать від ознак $P_{m+1}, P_{m+2}, \dots, P_n$. Отже ми можемо побудувати таке дерево D^0 , що:

1) Множина міток, які стоять в полосах $(D^0)_m^1$ та $(D^0)_{n+1}^{m+1}$ не перетинаються між собою.

2) В різних вершинах полоси $(D^0)_m^1$ стоять різні мітки.

3) Мітки, які стоять в полосі $(D^0)_{n+1}^{m+1}$, представляють собою всі функції, які залежать від аргументів $P_{m+1}, P_{m+2}, \dots, P_n$.

Застосовуючи до дерева D^0 такий самий підхід, що і до дерева D^* з роботи [6], можна показати, що дерево D^0 є максимальним деревом. При доведенні максимальності дерева D^0 єдина невелика різниця полягає в тому, що дерево D^* розбивається на полоси $(D^*)_m^1$ та $(D^*)_{n+1}^{m+1}$, а дерево D^0 треба розбивати на $(D^0)_m^1$ та $(D^0)_{n+1}^{m+1}$:

Підрахуємо тепер величину $|D^0|$. Виходячи з вищесказаного, запишемо $|D^0| = |(D^0)_m^1| + |(D^0)_{n+1}^{m+1}|$:

$$|(D^0)_m^1| = 1 + K_1 + K_1 * K_2 + \dots + K_1 * K_2 * \dots * K_{m-1};$$

$$|(D^0)_{n+1}^{m+1}| = K^{K_{m+1} \dots K_n}.$$

Звідси можна отримати наступне:

$$|D^0| = 1 + \sum_{j=1}^{m-1} K_1 K_2 * \dots * K_j + K^{K_{m+1} K_{m+2} * \dots * K_n}. \quad (3)$$

Розглянемо тепер випадок (2, б).

В цьому випадку максимальне дерево $\bar{D}$ будемо будувати наступним чином. В m -му ярусі розмістимо в різних вершинах різні функції, які залежать від ознак $P_{m+1}, P_{m+2}, \dots, P_n$. Останнє можливе завдяки співвідношенню (2, б), ми можемо в m -му ярусі дерева $\bar{D}$ розмістити всі функції вигляду $f_a(P_{m+1}, P_{m+2}, \dots, P_n)$, які істотно залежать від ознаки P_m . Будемо рахувати, що в дереві $\bar{D}$ таке розміщення вже існує. Тоді завдяки останньому розміщенню в $(m+1)$ -му ярусі дерева $\bar{D}$ будуть присутні всі функції, які залежать від ознак $P_{m+1}, P_{m+2}, \dots, P_n$. Дійсно, нехай $\varphi(P_{m+1}, P_{m+2}, \dots, P_n)$ – довільна функція, яка залежить від $P_{m+1}, P_{m+2}, \dots, P_n$. Візьмемо ще одну функцію $\psi(P_{m+1}, P_{m+2}, \dots, P_n)$, відмінну від φ . Побудуємо наступну функцію $f(P_m, P_{m+1}, \dots, P_n)$:

$$f(0, P_{m+1}, P_{m+2}, \dots, P_n) = \varphi(P_{m+1}, P_{m+2}, \dots, P_n), \quad (4)$$

$$f(j, P_{m+1}, P_{m+2}, \dots, P_n) = \psi(P_{m+1}, P_{m+2}, \dots, P_n).$$

Тут ($1 \leq j \leq K_m - 1$). Очевидно, що f буде істотно залежною від P_m . Отже f буде входити в m -й ярус дерева $\bar{D}$. Звідси та з (4) можна зробити висновок, що φ буде входити $(m + 1)$ -й ярус дерева $\bar{D}$.

Розіб'ємо дерево $\bar{D}$ на дві частини $(\bar{D})_{m-1}^1$ та $(\bar{D})_{n+1}^m$. З побудови дерева $\bar{D}$ випливають наступні властивості:

- 1) В різних вершинах полоси $(\bar{D})_{m-1}^1$ стоять різні мітки.
- 2) Множина міток, які стоять в полосах $(\bar{D})_{m-1}^1$ та $(\bar{D})_{n+1}^m$ не перетинаються між собою.
- 3) Всі мітки, які стоять в полосі $(\bar{D})_{n+1}^m$, вичерпають всі функції, які залежать від ознак $P_m, P_{m+1}, \dots, P_n$.

Використовуючи тільки що приведені властивості та застосовуючи ті самі судження, що і при доведенні максимального дерева D^* [6], легко переконатися, що дерево $\bar{D}$ є максимальним деревом. Підрахуємо величину $|\bar{D}|$. Виходячи з вищесказаних властивостей дерева $\bar{D}$, можна записати наступне:

$$|\bar{D}| = |(\bar{D})_{m-1}^1| + |(\bar{D})_{n+1}^m|,$$

$$|(\bar{D})_{m-1}^1| = 1 + K_1 + K_1 K_2 + \dots + K_1 K_2 \dots K_{m-1} = 1 + \sum_{j=1}^{m-2} K_1 K_2 \dots K_j,$$

$$|(\bar{D})_{n+1}^m| = K^{K_m K_{m+1} \dots K_n}.$$

$$\text{Отже, будемо мати } |\bar{D}| = 1 + \sum_{j=1}^{m-2} K_1 K_2 \dots K_j + K^{K_m K_{m+1} \dots K_n}.$$

Резюмуючи все вищесказане, можна привести формули для розрахунку $|D_{\max}|$

$$|D_{\max}| = 1 + \sum_{j=1}^{m-1} K_1 K_2 \dots K_j, \quad (5)$$

якщо $K_1 K_2 \dots K_{m-1} = K^{K_m K_{m+1} \dots K_n}$

$$|D_{\max}| = 1 + \sum_{j=1}^{m-1} K_1 K_2 \dots K_j + K^{K_{m+1} \dots K_n}, \quad (6)$$

якщо $K_1 K_2 \dots K_{m-1} < K^{K_m K_{m+1} \dots K_n}; \quad K_1 K_2 \dots K_{m-1} K_m > K^{K_{m+1} \dots K_n};$
 $K_1 K_2 \dots K_{m-1} \leq K^{K_m \dots K_n} - K^{K_{m+1} \dots K_n},$

$$|D_{\max}| = 1 + \sum_{j=1}^{m-2} K_1 K_2 \dots K_j + K^{K_m K_{m+1} \dots K_n}, \quad (7)$$

якщо – $K_1 K_2 \dots K_{m-1} < K^{K_m \dots K_n}$; $K_1 K_2 \dots K_m > K^{K_{m+1} \dots K_n}$;
 $K_1 K_2 \dots K_{m-1} > K^{K_m \dots K_n} - K^{K_{m+1} \dots K_n}$.

Покладемо $K_1 = K_2 = \dots = K_n = K \geq 2$.

Покажемо, що в цьому випадку виконується співвідношення (2. а).
 Зауважимо, що в цьому випадку буде цікавити тільки випадок коли
 $K_1 K_2 \dots K_{m-1} < K^{K_m \dots K_n}$, тобто $K^{m-1} < K^{K^{n-(m-1)}}$ (випадок, коли
 $K^{m-1} = K^{n-(m-1)}$ був розглянутий раніше).

З наведеного вище випливає, що при $K^{m-1} < K^{K^{n-(m-1)}}$ можливі два варіанти:

$$\text{а) } j < \delta, \quad (8)$$

$$\text{б) } j > \delta.$$

Зауважимо, тут δ таке число, що виконується $K^\delta \leq n \leq K^{\delta+1}$. Тобто δ представляє собою ярус злому логічного дерева яке розглядається

$$K^\delta \leq n < \delta, \quad (j = n - K^\delta).$$

У випадку виконання (8, а), та зважаючи на визначення ярусу злому [7] будемо мати наступне:

$$\begin{aligned} K_1 K_2 \dots K_{m-1} &= K^{K_{m-1}} = K^l = K^{K^\delta + j - \delta}, \\ K_m K_{m+1} \dots K_n &= K^{n-(m-1)} = K^{n-l} = K^\delta, \\ K_{m+1} K_{m+2} \dots K_n &= K^{(n-m)} = K^{n-(l+1)} = K^{\delta-1}. \end{aligned} \quad (9)$$

З відношення (9) випливає:

$$\begin{aligned} K^{K_m \dots K_n} - K^{K_{m+1} \dots K_n} &= K^{K^\delta} - K^{K^{\delta-1}} = K^{K^\delta} (1 - K^{K^{\delta-1} - K^\delta}) = \\ &= K^{K^\delta} \left(1 - \frac{1}{K^{K^{\delta-1} - (K-1)}}\right) \geq K^{K^\delta} \left(1 - \frac{1}{K}\right). \end{aligned} \quad (10)$$

З (9) та (8) будемо мати наступне:

$$K_m K_{m+1} \dots K_n = K^{K^\delta + j - \delta} \leq K^{K^{\delta-1}} = K^{K^\delta} \frac{1}{K}. \quad (11)$$

Так як $K \geq 2$, то $\frac{1}{K} = 1 - \frac{K-1}{K} \leq 1 - \frac{1}{K}$.

Отже з (10) та (11) будемо мати $K^{K_m \dots K_n} - K^{K_{m+1} \dots K_n} \geq K_1 \dots K_{m-1}$.

У випадку виконання (8, б), та зважаючи на визначення ярусу злому [7] будемо мати наступне:

$$\begin{aligned} K_1 K_2 \dots K_{m-1} &= K^{m-1} = K^l = K^{K^\delta + j - (\delta+1)}, \\ K_m K_{m+1} \dots K_n &= K^{n-(m-1)} = K^{n-l} = K^{\delta-1}, \\ K_{m+1} K_{m+2} \dots K_n &= K^{n-m} = K^{n-(l+1)} = K^\delta. \end{aligned} \quad (12)$$

З (12) випливає наступне:

$$K^{K_m \dots K_n} - K^{K_{m+1} \dots K_n} = K^{K^{\delta+1}} - K^{K^\delta} (K^{K^\delta(K-1)} - 1). \quad (13)$$

З (12), (8, б) та того, що $\delta > 0$ та $j < K^\delta(K-1)$ будемо мати

$$K_m K_{m+1} \dots K_n = K^{K^\delta + j - (\delta+1)} \leq K^{K^\delta} K^{j-1} < K^{K^\delta} K^{K^\delta(K-1)-1}. \quad (14)$$

Але при $K \geq 2$ та $\delta \geq 0$, $K^{K(K-1)} - 1 \geq K^{K^\delta(K-1)-1}$.

Дійсно,

$$\begin{aligned} K^{K^\delta(K-1)} &= K^{K^\delta(K-1)} \left(1 - \frac{1}{K^{K^\delta(K-1)}}\right) \geq \frac{1}{K^{K^\delta(K-1)}} \geq K^{K^\delta(K-1)} \left(1 - \frac{1}{K}\right) \geq \\ &\geq K^{K^\delta(K-1)} \left(1 - \frac{K-1}{K}\right) = K^{K^\delta(K-1)} \frac{1}{K} = K^{K^\delta(K-1)-1}. \end{aligned} \quad (15)$$

З (13), (14), (15) отримаємо наступне:

$$K^{K_m \dots K_n} - K^{K_{m+1} \dots K_n} \geq K_1 K_2 \dots K_{m-1}. \quad (16)$$

Отже, було показано, що у випадку $K_1 = K_2 = \dots = K_n = K \geq 2$ та $K_1 K_2 \dots K_{m-1} < K^{K_m \dots K_n}$ завжди виконується співвідношення (16).

Звідси, з відношення (6) та [6] отримаємо наступні формули для розрахунку $|D_{\max}|$ у випадку $K_1 = K_2 = \dots = K_n = K \geq 2$:

$$|D_{\max}| = \frac{K^{K^\delta+1} - 1}{K - 1}, \quad (17)$$

якщо $n = K^\delta + \delta$,

$$|D_{\max}| = \frac{K^{K^\delta + j - \delta + 1} - 1}{K - 1} + K^{K^\delta - 1}, \quad (18)$$

якщо $n = K^\delta + j$ та $j < \delta$,

$$|D_{\max}| = \frac{K^{K^\delta + j - \delta} - 1}{K - 1} + K^{K^\delta}, \quad (19)$$

якщо $n = K^\delta + j$ та $K^\delta(K - 1) > j > \delta$.

У випадку $K_1 = K_2 = \dots = K_n = K = 2$ отримаємо:

$$|D_{\max}| = 2^{2^\delta + 1} - 1, \text{ якщо } n = 2^\delta + \delta, \quad (20)$$

$$|D_{\max}| = 2^{2^\delta + j - \delta - 1} + 2^{2^\delta - 1} - 1,$$

якщо $n = 2^\delta + j$ та $j < \delta$.

$$|D_{\max}| = 2^{2^\delta + j - \delta} - 1 + 2^{2^\delta},$$

якщо $n = 2^\delta + j$ та $2 > j > \delta$.

Виходячи з формул (17), (18), (19) можна запропонувати наступний спосіб розрахунку $|D_{\max}|$ при $K_1 = K_2 = \dots = K_n = K \geq 2$.

Спочатку знаходимо таке число δ , що $K^\delta \leq n \leq K^{\delta+1}$. Після цього знаходимо $j = n - K^\delta$. Потім, в залежності від випадків $j = \delta$, $j < \delta$ та $j > \delta$, розрахунок $|D_{\max}|$ проводиться відповідно за формулами (17), (18), (19).

Висновки На основі формул (20) можна розрахувати та привести відповідні вибіркові значення d та $|D_{\max}|$:

1. ($n = 5$, $d = 63$, $|D_{\max}| = 19$),
2. ($n = 10$, $d = 2047$, $|D_{\max}| = 271$),
3. ($n = 15$, $d = 65535$, $|D_{\max}| = 4349$),
4. ($n = 20$, $d = 2097151$, $|D_{\max}| = 131071$).

Зауважимо, тут $K_1 = K_2 = \dots = K_n = K = 2$, d позначає кількість всіх вершин регулярного дерева D при відповідному n .

Отже серед основних результатів роботи можна виділити наступне:

- показані особливості представлення функцій розпізнавання у вигляді логічних дерев, причому структура дерева в більшості випадків не є оптимальною і дозволяє наступний етап мінімізації (складність результуючого дерева є найбільшою або наближається до неї).

- досліджене регулярне логічне дерево та визначено ярус злому даної структури, що дозволяє оцінити рівень складності та можливість мінімізації даного дерева.

- представлені числові оцінки та загальна схема оцінки складності дослідженого регулярного логічного дерева.

Виведені числові оцінки та загальна схема оцінки складності логічного дерева даного дослідження в перспективі дозволяють розробити ефективні моделі схем мінімізації логічних дерев класифікації, а отже отримати мінімальну форму системи розпізнавання дискретних об'єктів. Отримані результати принципово важливі в задачах, які пов'язані з логічними деревами класифікації. Робота актуальна для всіх методів розпізнавання образів в яких отримана функція класифікації може бути представлена у вигляді логічного дерева класифікації.

Список літератури:

1. *Quinlan J.R.* Induction of Decision Trees / *J.R. Quinlan* // Machine Learning. – 2008. – № 1. – P. 1-81.
2. *Votgoff P.E.* Incremental Induction of Decision Trees / *P.E. Votgoff* // Machine Learning. – 2009. – № 4. – P. 161-186.
3. *Василенко Ю.А.* Проблема оцінки складності логічних дерев розпізнавання та загальний метод їх оптимізації / *Ф.Г. Ващук, Ю.А. Василенко, І.Ф. Повхан* // Науково технічний журнал "European Journal of Enterprise Technologies". – 2011. – 6/4 (54). – С. 24-28.
4. *Василенко Ю.А.* Загальна оцінка мінімізації деревоподібних логічних структур / *Ю.А. Василенко, Ф.Г. Ващук, І.Ф. Повхан* // Науково технічний журнал "European Journal of Enterprise Technologies". – 2012. – 1/4 (55). – С. 29-33.
5. *Srikant R.* Mining generalized association rules / *R. Srikant, R. Agrawal* // Future Generation Computer Systems. – 2015. – Vol. 13. – № 2. – P. 161-180.
6. *Povhan I.* Designing of recognition system of discrete objects / *I.F. Povhan* // 2016 IEEE First International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP), Lviv, Ukraine. – 2016. – P. 226-231.
7. *Povhan I.* General scheme for constructing the most complex logical tree of classification in pattern recognition discrete objects / *I.F. Povhan* // Збірник наукових праць "Електроніка та інформаційні технології", Львів. – 2019. – Випуск 11. – С. 112-117.
8. *Toivonen H.* Sampling large databases for association rules // In Proc. 1996 Int. Conf. Very Large Data Bases / Ed. by *T.M. Vijayaraman, A.P. Buchmann, C. Mohan, N.L. Sarda*. – Morgan Kaufman, 1996. – P. 134-145.
9. *Whitley D.* An overview of evolutionary algorithms: practical issues and common pitfalls / *D. Whitley* // Information and Software Technology. – 2001. – Vol. 43. – №14. – P. 817-831.
10. *Zheng Z.* Real world performance of association rule algorithms / *Z. Zheng, R. Kohavi, L. Mason* // Proceedings of the Seventh ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining / Ed. by *F. Provost, R. Srikant*. – 2001. – P. 401-406.

11. Bodyanskiy Y. Hybrid neuro-neo-fuzzy system and its adaptive learning algorithm / Y. Bodyanskiy, O. Vynokurova, G. Setlak, I. Pliss // Xth Scien. and Tech. Conf. "Computer Sciences and Information Technologies" (CSIT), 2015, Lviv, 2015, P. 111-114.

References:

1. Quinlan, J.R. (2008), "Induction of Decision Trees", *Machine Learning*, No. 1, pp. 1-81.
2. Vtogoff, P.E. (2009), "Incremental Induction of Decision Trees", *Machine Learning*, No 4, pp. 161-186.
3. Vashchuk, F.G., Vasilenko, Y.A., and Povhan, I.F. (2011), "The problem of evaluation of complexity of logic trees, recognition, and a general method of optimization", *Scientific and technical journal "European Journal of Enterprise Technologies"*, 6/4(54), pp. 24-28.
4. Vasilenko, Y.A., Vashchuk, F.G., and Povhan, I.F. (2012), "Overall assessment of minimization of logical tree structures", *Scientific and technical journal "European Journal of Enterprise Technologies"*, No. 1/4 (55), pp. 29-33.
5. Srikant, R., Agrawal, R. (2015), "Mining generalized association rules", *Future Generation Computer Systems*, Vol. 13, No. 2. pp. 161-180.
6. Povhan, I. (2016), "Designing of recognition system of discrete objects", *2016 IEEE First International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP)*, Lviv, Ukraine, pp. 226-231.
7. Povhan, I. (2019), "General scheme for constructing the most complex logical tree of classification in pattern recognition discrete objects", *Collection of scientific papers "Electronics and information technologies"*, Lviv, Issue 11, pp. 112-117.
8. Toivonen, H. (1996), "Sampling large databases for association rules", *In Proc. 1996 Int. Conf. Very Large Data Bases*, Morgan Kaufman, pp. 134-145.
9. Whitley, D. (2001), "An overview of evolutionary algorithms: practical issues and common pitfalls", *Information and Software Technology*, Vol. 43, No. 14, pp. 817-831.
10. Zheng, Z., Kohavi, R., Mason, L. (2001), "Real world performance of association rule algorithms" *Proceedings of the Seventh ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, pp. 401-406.
11. Bodyanskiy, Y., Vynokurova, O., Setlak, G. and Pliss, I. (2015), "Hybrid neuro-neo-fuzzy system and its adaptive learning algorithm", *X-th Scien. and Tech. Conf. "Computer Sciences and Information Technologies" (CSIT)*, Lviv, pp. 111-114.

Статтю представив д.т.н., професор, кафедри програмного забезпечення систем ДВНЗ "Ужгородський національний університет" Головач Й.Г.

Надійшла (received) 03.05.2019

Повторно 05.06.2019

Povhan Igor, Cand. Tech. Sci.
Uzhgorod national university, Ukraine
Narodna Square 3, Uzhgorod, Ukraine, 88000
e-mail: Igor.povkhan@uzhnu.edu.ua
ORCID ID: 0000-0002-7034-8702

УДК 004.8: 004.89: 519.7

Задача загальної оцінки складності максимального побудованого логічного дерева класифікації / Повхан І.Ф. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2019. – № 13 (1338). – С. 104 – 115.

Робота присвячена проблемам теорії розпізнавання дискретних об'єктів, які пов'язані з загальною оцінкою складності результуючого логічного дерева класифікації. Дається загальна оцінка складності отриманих граф-схемних моделей у вигляді логічних дерев. Виведені числові оцінки в перспективі дозволяють розробити ефективні моделі схем мінімізації логічних дерев класифікації, а отже отримати мінімальну форму системи розпізнавання дискретних об'єктів. Отримані результати принципово важливі в задачах, які пов'язані з логічними деревами класифікації. Робота актуальна для всіх методів розпізнавання образів в яких отримана функція класифікації може бути представлена у вигляді логічного дерева. Бібліогр.: 11 назв.

Ключові слова: розпізнавання образів; логічне дерево; граф-схемні моделі; оцінка складності.

УДК 004.8: 004.89: 519.7

Задача общей оценки сложности максимального синтезированного логического дерева классификации / Повхан И.Ф. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2019. – № 13 (1338). – С. 104 – 115.

Робота посвящена проблемам теории распознавания дискретных объектов, которые связаны с общей оценкой сложности результирующего логического дерева классификации. Дается общая оценка сложности полученных граф-схемных моделей в виде логических деревьев. Выведены числовые оценки в перспективе позволяют разработать эффективные модели схем минимизации логических деревьев классификации, а следовательно получить минимальную форму системы распознавания дискретных объектов. Полученные результаты принципиально важны в задачах, которые связаны с логическими деревьями классификации. Работа актуальна для всех методов распознавания образов в которых полученная функция классификации может быть представлена в виде логического дерева. Библиогр.: 11 назв.

Ключевые слова: распознавание образов; логическое дерево; граф-схемные модели; оценка сложности.

UDC 004.8: 004.89: 519.7

The problem of the overall complexity evaluation of the maximum logical classification tree / Povhan I.F. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2019. – № 13 (1338). – P. 104 – 115.

The work is devoted to the problems of the theory of recognition of discrete objects, which are associated with a general assessment of the complexity of the resulting logical classification tree. A general estimation of the complexity of the obtained graph-circuit models in the form of logical trees is given. Numerical estimates in the long term allow us to develop effective models of schemes for minimization of logical classification trees, and therefore to obtain the minimum form of the system of recognition of discrete objects. The results obtained are fundamentally important in problems that are related to logical classification trees. The work is relevant for all methods of pattern recognition in which the resulting classification function can be represented as a logical tree. Refs.: 11 titles.

Keywords: methods of pattern recognition; logical tree; graph-circuit models; estimation of complexity.

УДК 004.932.2

DOI: 10.20998/2411-0558.2019.13.11

Р. В. СІРЯК, здобув., СНУ ім. В. Даля, Сєвєродонецьк,

І. С. СКАРГА-БАНДУРОВА, д-р техн. наук, проф., зав.каф., СНУ ім. В. Даля, Сєвєродонецьк,

Л. О. ШУМОВА, канд. техн. наук, СНУ ім. В. Даля, Сєвєродонецьк

ОСОБЛИВОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ ДАНИХ ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ ЖЕСТІВ

Розглянуто основні етапи вирішення задачі машинного розпізнавання жестів рук, отриманих з вебкамери. Завдання полягало в отриманні простої, точної та ресурсоефективної системи візуального розпізнавання. В ході роботи були визначені основні етапи підготовки та обробки даних, проведені експерименти зі зміною значень гіперпараметрів, порядком проходження та кількістю шарів згорткової нейронної мережі. В результаті застосування запропонованої технології отримано точність розпізнавання 98.46% зі значенням функції втрати 0.02. Перевагою системи є її низька обчислювальна складність на етапі розпізнавання, що дозволяє в реальному часі класифікувати жести рук. Іл.: 2. Бібліогр.: 12 назв.

Ключові слова: дані; розпізнавання; жест; згорткова нейронна мережа; функції втрати; обчислювальна складність.

Постановка проблеми. Останні десятиліття, розпізнавання жестів рук для реалізації людино-машинної взаємодії є сферою активних досліджень галузі комп'ютерного зору та машинного навчання. Задачею досліджень є створення систем, здатних ідентифікувати жести людини та використовувати їх для передачі інформації або керування пристроями. Застосування цієї технології має дуже великий потенціал. Через зчитування даних про жести можливе маніпулювання об'єктами в середовищі віртуальної реальності. Створення системи, яка розпізнає мову жестів, здатне надати допомогу людям з вадами слуху. Разом з тим, на сьогодні, питання взаємодії через жести все ще не вирішене і вимагає подальших досліджень і вдосконалень. Розпізнавання жестів пов'язане з великою кількістю різноманітних проблем, які виникають кожного разу, коли необхідно розпізнати об'єкт, наприклад, при зміні умов освітлення, неоднорідності фону та ін. Підхід, що використовується для розв'язання проблеми розпізнавання жестів, полягає у виявленні пікселів на зображенні, які складають руку, витягуванні ознак з цих ідентифікованих пікселів для класифікації і використання цих функцій для розпізнавання конкретних послідовностей жестів. Однак, мета розпізнавання полягає не тільки в тому, щоб знайти цільове зображення в реальному часі і відокремити його від фону, а й проаналізувати динамічні просторово-часові характеристики, відстежуючи початок і кінець класифікованого

© Р.В. Сіряк, І.С. Скарга-Бандурова, Л.О. Шумова, 2019

жесту в потоці кадрів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Залежно від підходів і цілей завдання розпізнавання жестів вирішуються різними методами. Одним з найбільш популярних і ефективних методів розпізнавання жестів рук є згорткові нейронні мережі (CNN). CNN використовується для вилучення, для сегментації зображень [1], розпізнавання дій людини, з урахуванням просторових і часових особливостей [2]. Значний успіх досягнуто Pigou et al. [3], які використовуючи CNN і Microsoft Kinect створили систему розпізнавання італійської мови жестів. Вони досліджували п'ять різних архітектур глибокого навчання і прийшли до висновку, що двонапрямна повторюваність і часова згортка можуть значно покращити класифікацію жестів. Bheda et al. [4] реалізували метод класифікації зображень для американської мови жестів, отримавши 82,5% точності на алфавітних жестах і 97% на цифрах. Підходи до вирішення задачі розпізнавання жестів рук відрізняються один від одного на різних стадіях – починаючи від способу отримання даних і закінчуючи вибором класифікатора. Дані можуть бути отримані через спеціально обладнані рукавички, через закріплення на руці датчиків, через звичайні камери або камери глибини простору. Залежно від способу отримання даних, проводиться їх сегментація. Витяг ознак може проводитися на основі обчислень гістограми орієнтованих градієнтів, Principal Component Analysis (PCA), SIFT або нейронних мереж. Класифікатором може виступати Support Vector Machine, метод Random Forest, алгоритм k -найближчих сусідів, нейронна мережа та ін. Згорткова нейронна мережа, на основі якої реалізований представлений метод розпізнавання жестів рук, має низку переваг. Перш за все, шари згортки в такій мережі здатні будувати ієрархічні уявлення і самостійно виділяти ознаки у вхідних даних. CNN показала найкращі результати при роботі з розпізнаванням зображень і відео, значно випереджаючи інші методи машинного навчання.

Ціль статті – реалізація системи розпізнавання жестів рук на основі згорткової нейронної мережі (CNN) та особливості її реалізації.

Основна частина. Технологія розпізнавання жестів складається з шести етапів: отримання набору даних; збільшення набору (для випадків використання власного відео та/або зображень); попередня підготовка даних; витяг ознак; навчання класифікатора і, безпосередньо, розпізнавання жестів.

Етап 1. Отримання наборів вихідних даних.

Для роботи з жестами рук зазвичай можна використовувати два підходи: формування власного набору або використання відкритих наборів даних. Найбільш відомим відкритим набором є LSA64 [5].

Етап 2. Збільшення даних.

Оскільки навчання мережі і тестування проводилися на власному наборі даних, що містять зображення, отримані з веб-камери, до зібраних даних була застосована операція збільшення даних (data augmentation).

Додаткові зображення генеруються шляхом маніпуляцій з вже наявними зображеннями, і охоплюють операції масштабування, зрушення, деформацію і повороти під різними кутами. Крім збільшення набору даних для навчання, це робить мережу стійкою до спотворень у вхідних даних на стадії розпізнавання, а також додатково допомагає боротися з перенавчанням.

Етап 3. Підготовка та попередня обробка даних.

Попередня обробка даних містить очищення даних, зміну колірної моделі, сегментацію та виділення контуру (розпізнавання країв).

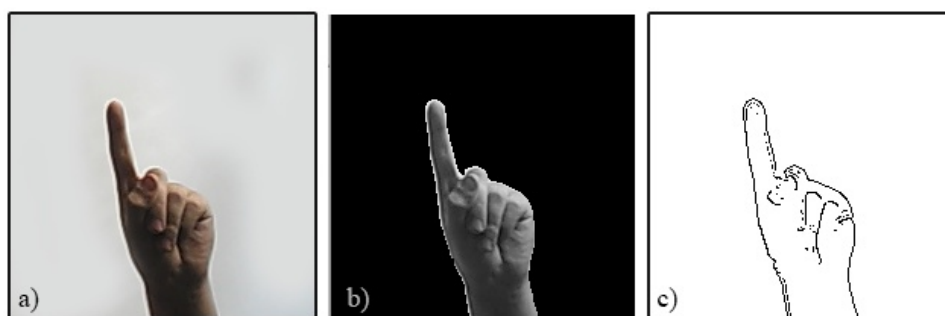


Рис. 1. Підготовка зображення для CNN: (a) початкове зображення, (b) сегментація за кольором шкіри, (c) виділення контурів за Canny

Перед початком процесу сегментації, необхідно очистити зображення від цифрового шуму і знизити зайву деталізацію. Для цього, до кожного зображення з набору даних було застосовано фільтр розмиття за Гауссом (Gaussian Blur) [6]

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}},$$

де x – відстань по осі абсцис, y – відстань по осі ординат, σ – стандартне відхилення розподілу Гаусса. Взаємний вплив пікселів визначається як обернено пропорційне квадрату відстані між ними. Ступінь розмиття залежить від параметра стандартного відхилення.

Потім зображення переводяться з колірної моделі RGB в формат HSV, оскільки завдяки тому, що хроматична інформація зберігається в ньому в окремому каналі, стає легше орієнтуватися при сегментації на колір шкіри. Також при використанні HSV знижується проблема з мінливим освітленням.

Сегментація полягає у відокремленні руки від фону. Перш за все, для цього на зображенні виділяється у відповідному діапазоні область кольору шкіри. Таким чином віддаляється задній фон, і подальша робота ведеться тільки з рукою. Зображення перетворюється в одноканальне півтонове для зменшення обчислювальних витрат.

Останньою процедурою підготовки було розпізнавання країв. Розпізнавання країв є важливим моментом в розпізнаванні образів, визначаючи границю між об'єктами або між об'єктом і фоном. До виділеного елементу застосовується детектор країв Canny [7].

Робота детектора Canny складається з наступних кроків:

1. Згладжування зображення шляхом застосування до нього розглянутого вище фільтра Гауссова розмиття.

2. Взяття градієнта зображення, після чого на максимальних значеннях позначаються межі. Для цього використовується оператор Собеля [8], що обчислює значення градієнта яскравості. Оператор Собеля використовує два квадратних ядра згортки, які оцінюють градієнт в горизонтальному і вертикальному напрямках. Після проходження згортки напрямки градієнта обчислюється як:

$$\Theta = \arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right),$$

де G_y і G_x – значення для першої похідної відповідно в горизонтальному і вертикальному положеннях.

3. Придушення немаксимумов. Краями визнаються пікселі, в яких досягається локальний максимум градієнта в напрямку вектора градієнта. Значення кожного пікселя невизнаного максимумом встановлюється в нуль. В результаті виходить тонка лінія контуру.

4. Подвійна порогова фільтрація. Для оцінки того, чи дійсно має місце край в конкретній точці зображення, використовуються два порога. Якщо значення пікселя відноситься вище порога, то край визнається достовірним. Інакше відкидається. Проміжним пікселям присвоюється середнє значення.

5. Гістерезис (Hysteresis), тобто зв'язування країв в контури. Піксель вище порогового значення T_1 є крайовим пікселем. Пікселі, які межують з крайовим пікселем, і при цьому мають значення вище, ніж T_2 також відносяться до групи крайових пікселів.

В результаті виконання даного етапу отримується набір зображень, готових для завантаження до нейронної мережі. Результуюче зображення, підготовлене до розпізнавання, представлено на рис. 1 с).

Етап 4. Витяг ознак.

На відміну від інших методів машинного навчання, згорткова нейронна мережа не вимагає ручної розробки набору ознак. Ознаки витягуються мережею самостійно в згортальних шарах. Розроблена мережа має три згорткових шари з функцією активації ReLU, за кожним з яких розташовується шар maxpooling (рис. 2). Умовно, створену CNN можна розділити на дві частини: а) три блоки згорткових і subsampling шарів, які чергуються один з одним і формують вхідний вектор ознак для навчання; б) три повнозв'язних шари. Згорткові шари, формують 16, 32 і 64 карти ознак, застосовуючи ядра згортки розміром 3×3 . Карти ознак проходять через шари subsampling з max-pooling 2×2 , кожен раз зменшуючи розмірність даних вдвічі.

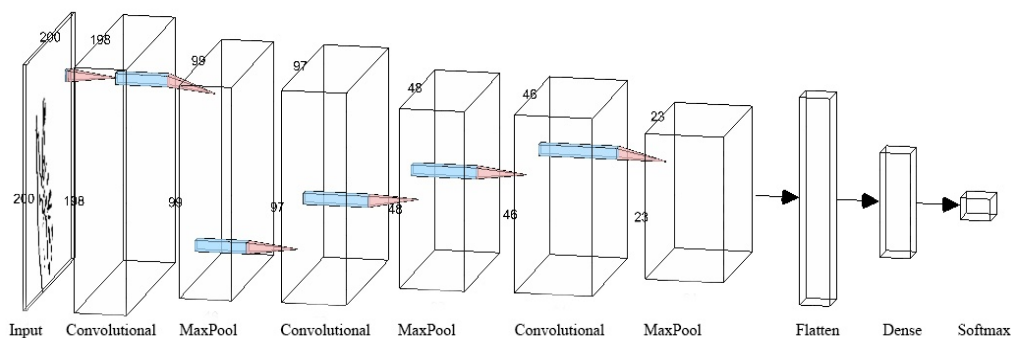


Рис. 2. Архітектура нейронної мережі

Витяг ознак здійснюється шляхом операції згортки квадратною матрицею з непарною розмірністю. Матриця, яка називається ядром згортки або фільтром, ковзає по зображенню, виконуючи покрокове скалярне перетворення. На виході є feature maps, кількість яких залежить від числа застосовуваних фільтрів. Кожен фільтр являє собою систему поділюваних ваг і призначений для пошуку і виділення ознак за певним шаблоном.

Згортка представлена як

$$Conv(\omega \times y)_{ij} = \sigma \left(\sum_{a=0}^{m-1} \sum_{b=0}^{m-1} \omega_{ab} \times y_{(i+a)(j+b)}^{l-1} \right),$$

де ω – ядро згортки розміру $m \times m$, y – входи з попереднього шару, σ – функція активації нейронів.

За кожним згортковим шаром слідує шар max-pool, що зменшує розмірність карти ознак, проходячи по зображенню і покроково вибираючи з рецептивного поля розміром 2×2 максимальне значення. Крім зниження розмірності в два рази і зменшення кількості параметрів в нейронної мережі, max-pooling робить знайдені ознаки більш яскраво вираженими, а мережа стає більш інваріантною до місцезнаходження об'єкта на карті ознак, до зрушень і поворотів. Вихід max-pool буде обчислюватися через формулу:

$$y^{l+1} = \max_{0 \leq i \leq H, 0 \leq j \leq W} x_{i^{l+1} \times H + i, j^{l+1} \times W + j}^l,$$

де H, W – розмір вікна субдискретизації, x – вихідні дані.

Етап 5. Навчання класифікатора.

Частина мережі, що безпосередньо виконує класифікацію, складається з шару flatten, кожен вузол якого відповідає одному значенню з вектора ознак, і двох повнозв'язних шарів dense. Останній шар є вихідним і реалізує функцію softmax. Дані з останнього шару субдискретизації надходять на шар Flatten, перетворюючись у ньому в одновимірний вектор. Обчислення значень нейронів для повнозв'язного шару відбувається за формулою:

$$x_i^l = \sum_{k=0}^m w_{ki}^l y_k^{l-1} + b_i^l,$$

де w_{ki}^l – вага від k -го нейрона шару $l-1$ до i -го нейрону поточного шару l ; b – зміщення поточного шару; y_k^{l-1} – вхідні дані з попереднього шару.

Останній шар мережі з кількістю виходів що дорівнює кількості категорій що розпізнаються, реалізує функцію активації softmax. Softmax привласнює значення, представлене невід'ємним дійсним числом, кожному класу, відображаючи ймовірність приналежності. Сума всіх вихідних сигналів дорівнює одиниці. Значення вихідного сигналу i -го нейрона відповідає ймовірності того, що правильна відповідь є i . Значення i -го виходу в softmax визначається за формулою:

$$S_i = \frac{e^{z_i}}{\sum_{j=1}^n e^{z_j}}.$$

Етап 6. Розпізнавання.

На етапі розпізнавання навчена нейронна мережа через веб-камеру в режимі реального часу розпізнає клас одержуваного на вхід жесту.

Функцією активації всюди, крім останнього шару, виступала Rectified Linear Unit (ReLU)

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

ReLU значно перевершує інші функції в стійкості до загасання градієнта, а швидкість навчання згідно [9] в порівнянні з гіперболічним тангенсом швидше в шість разів.

Для регуляризації моделі в мережі двічі застосовувалася техніка dropout [10] з коефіцієнтом 0.25. Dropout полягає в тому, щоб на кожну епоху з заданою вірогідністю p виключати нейрони з мережі, в результаті чого він повертає значення 0.

У якості функції втрат була використана категорійна кросс-ентропія – розрахована логарифмічна втрата для декількох представлених класів. Крос-ентропія між розподілами p і q визначається наступним чином:

$$H(p, q) = H(p) + D_{KL}(p \| q),$$

де $H(p)$ – ентропія p , $D_{KL}(p \| q)$ – розбіжність Кулбака-Лейблера [11] для q з p (відносна ентропія p до q).

Якщо прогнозовані значення моделі дорівнюють q , тоді як справжні значення дорівнюють p , то категорійна перехресна ентропія буде виглядати так:

$$H(y, \hat{y}) = -\sum_i y_i \log \hat{y}_i = -y \log \hat{y} - (1 - y) \log(1 - \hat{y}).$$

У якості методу оптимізації використано Adam (adaptive moment estimation) [12]. Adam використовує як середні значення градієнта, так і другий імпульс градієнта, що заважає йому застрягти в місцевих мінімумах. Далі йде формула, в якій m_t обчислює перший імпульс, а v_t – квадрат:

$$m_t = \beta_1 m_t + (1 - \beta_1) g_t,$$

$$v_t = \beta_2 v_{t-1} + (1 - \beta_2) g_t^2,$$

де β_1 – коефіцієнт для зменшення ковзного середнього градієнта, β_2 є коефіцієнтом для зменшення ковзного середнього площі градієнта. Перерахунок параметрів виконується за формулою

$$w_p = w_{p-1} - \frac{\eta}{\sqrt{v_p + \varepsilon}} m_p,$$

де $\varepsilon = 10^{-8}$ вводиться для запобігання можливого ділення на нуль.

Результати експерименту.

Набір складався з 7200 зображень розміром 120×120 , об'єднаних в умовні категорії "one", "two", "zero", "palm", "fist", "letter SH" по 1200 зразків кожен. Для полегшення процедур навчання та обробки використовувався білий фон. Дані були зібрані у чотирьох осіб при штучному розсіяному світлі.

Експериментальні дослідження були проведені на комп'ютері з процесором Intel Core i3-7100, 8 Гб оперативної пам'яті, NVIDIA GeForce GTX 1060. Програмне забезпечення написано мовою програмування Python. Були використані бібліотеки кадрів Tensorflow і Keras, які використовують бібліотеки numpy, scikit-learn, OpenCV. В якості навчального набору було створено власну базу зображень ручного жесту. Зйомка руки проводилася з різних кутів огляду.

Процес як отримання даних, так і розпізнавання проводився за допомогою веб-камери на відстані близько 1 метра.

Весь набір даних був розділений на навчальний – на якому власне і проходило навчання, валідаційний – призначений для контролю ходу навчання, і тестовий – призначений для перевірки вже навченої мережі. Розподіл набору даних на підмножини складав 70, 10 і 20 відсотків відповідно.

Навчання нейронної мережі тривало 50 епох. За одну епоху оброблялися всі підмножини даних адаптації та валідації. Для перевірки якості використовувалася метрика асигасу, що показує співвідношення кількості правильно передбачених значень до всієї кількості виданих мережею пророкувань.

Функцією втрат виступала категоріальна перехресна ентропія, яка вираховувала логарифмічну втрату на кілька представлених класів. В результаті навчання мережі була отримана точність на тестовому підмножині в 98.46%, а значення функції втрат склало – 0.02.

Висновки. Метою проекту було створення простої, дешевої і ресурсномісткої системи розпізнавання жестів рук. Була розроблена і навчена модель згорткової нейронної мережі, здатна з високою ймовірністю розпізнавати в відеопотоці шість тестових жестів. Розроблена модель багато в чому дотримується принципів, які застосовуються при використанні згорткової нейронної мережі як класифікатора жестів. При необхідності, мережу можна навчити на більшій кількості жестів. Перевагою запропонованої системи є її низька обчислювальна складність на етапі розпізнавання, що дозволяє в реальному часі класифікувати жести рук. Серед недоліків можна відзначити, що модель не працює добре на неоднорідному, змінюваному фоні, окрім того, жести рук людей, які не брали участь у створенні

набору даних, визнаються гірше. Розроблена модель багато в чому слідує принципам, необхідним для CNN як класифікатора жестів. Її точність розпізнавання з власним набором даних складає 98.46%, хоча є й деякі недоліки, згадані вище.

В майбутньому планується збільшити кількість видів жестів, додати періодичний блок для розпізнавання більш складних жестів. Планується також розробити засоби боротьби з гетерогенним фоном.

Список літератури:

1. *Tompson J.* Real-time continuous pose recovery of human hands using convolutional networks / *J. Tompson* // *ACM Transactions on Graphics (ToG)*. – 2014. – Vol. 33. – № 5. – P. 169-175.
2. *Ji S.* 3D convolutional neural networks for human action recognition / *S. Ji* // In *IEEE Transactions on Pattern Analysis And Machine Intelligence*. – 2013. – Vol. 35. – № 1. – P. 221-231.
3. *Yamato J.* Recognizing human action in time-sequential images using hidden Markov model / *J. Yamato, J. Ohya, K. Ishii* // In *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Proceedings CVPR'92*. – 1992.
4. *Bheda V.* Using deep convolutional networks for gesture recognition in American sign language / *V. Bheda, D. Radpour* // In: *CoRR*, abs/1710.06836. – 2017.
5. A dataset for Argentinian Sign Language LSA64 <http://facundoq.github.io/unlp/lsa64/>
6. *Nixon Mark.* Aguado / *Mark Nixon, S. Alberto* // *Feature extraction and image processing for computer vision*. – Academic Press, 2012.
7. *Canny John.* A computational approach to edge detection / *John Canny* // *Readings in computer vision*. – Morgan Kaufmann. – 1987. – P. 184-203.
8. *Sobel Irwin.* A 3x3 isotropic gradient operator for image processing / *Irwin Sobel, Feldman Gary* // *A talk at the Stanford Artificial Project in* – 1968. – P. 271-272.
9. *Krizhevsky Alex.* Imagenet classification with deep convolutional neural networks / *Alex Krizhevsky, Sutskever Ilya, E. Hinton Geoffrey* // *Advances in neural information processing systems*. – 2012.
10. *Hinton Geoffrey E.* Improving neural networks by preventing co-adaptation of feature detectors / *Geoffrey E. Hinton* // *arxiv preprint arxiv:1207.0580*. – 2012.
11. *Kullback Solomon.* On information and sufficiency / *Solomon Kullback, Leibler Richard* // *The annals of mathematical statistics*. – Vol. 22. – № 1. – 1951. – P. 79-86.
12. *Kingma, Diederik P. Jimmy Ba.* Adam: A method for stochastic optimization / *Diederik P. Kingma, Jimmy Ba* // *arxiv preprint arxiv:1412.6980*. – 2014.

References:

1. Tompson, J. (2014), "Real-time continuous pose recovery of human hands using convolutional networks", *ACM Transactions on Graphics (ToG)*, vol. 33, No. 5, pp. 169-175.
2. Ji, S. (2013), "3D convolutional neural networks for human action recognition", In *IEEE Transactions on Pattern Analysis And Machine Intelligence*, vol. 35, No. 1, pp. 221-231.
3. Yamato, J., Ohya J., and Ishii K. (1992), "Recognizing human action in time-sequential images using hidden Markov model", In *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Proceedings CVPR'92*.
4. Bheda, V., and Radpour, D. (2017), "Using deep convolutional networks for gesture recognition in American sign language", In: *CoRR*, abs/1710.06836.
5. A dataset for Argentinian Sign Language LSA64 <http://facundoq.github.io/unlp/lsa64/>

-
6. Nixon, Mark, and Alberto S. Aguado (2012), *Feature extraction and image processing for computer vision*, Academic Press.
 7. Canny, John (1987), "A computational approach to edge detection", *Readings in computer vision*, Morgan Kaufmann, pp. 184-203.
 8. Sobel, Irwin, and Gary Feldman (1968), "A 3x3 isotropic gradient operator for image processing", *a talk at the Stanford Artificial Project*, pp. 271-272.
 9. Krizhevsky, Alex, Ilya Sutskever, and Geoffrey E. Hinton (2012), "Imagenet classification with deep convolutional neural networks", *Advances in neural information processing systems*.
 10. Hinton, Geoffrey E. (2012), "Improving neural networks by preventing co-adaptation of feature detectors", *arXiv preprint arXiv:1207.0580*.
 11. Kullback, Solomon, and Richard, A. Leibler (1951), "On information and sufficiency", *The annals of mathematical statistics*, vol. 22, No. 1, pp. 79-86.
 12. Kingma, Diederik P., and Jimmy Ba. (2014), "Adam: A method for stochastic optimization", *arXiv preprint arXiv:1412.6980*.

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

Надійшла (received) 01.01.2019

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

Особливості реалізації технології обробки даних для розпізнавання жестів / Сіряк Р.В., Скарга-Бандурова І.С., Шумова Л.О. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2019. – № 13 (1338). – С. 117 – 127.

Розглянуто основні етапи вирішення задачі машинного розпізнавання жестів рук, отриманих з вебкамери. Завдання полягало в отриманні простої, точної та ресурсоефективної системи візуального розпізнавання. В ході роботи були визначені основні етапи підготовки та обробки даних, проведені експерименти зі зміною значень гіперпараметрів, порядком проходження та кількістю шарів згорткової нейронної мережі. В результаті застосування запропонованої технології отримано точність розпізнавання 98.46%, зі значенням функції втрати 0.02. Перевагою системи є її низька обчислювальна складність на етапі розпізнавання, що дозволяє в реальному часі класифікувати жести рук. Іл.: 2. Бібліогр.: 12 назв.

Ключові слова: дані, розпізнавання; жест; згорткова нейронна мережа; обчислювальна складність.

УДК 004.932.2

Особенности реализации технологии обработки данных для распознавания жестов / Сиряк Р.В., Скарга-Бандурова И.С., Шумова Л.О. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2019. – № 13 (1338). – С. 117 – 127.

Рассмотрены основные этапы решения задачи машинного распознавания жестов рук, полученных с вебкамеры. Задача состояла в получении простой, точной и ресурсоэффективной системы визуального распознавания. В ходе работы были определены основные этапы подготовки и обработки данных, проведены эксперименты с изменением значений гиперпараметров, порядком прохождения и количеством слоев сверточной нейронной сети. В результате применения предлагаемой технологии получена точность распознавания 98.46%, со значением функции потери 0.02. Преимуществом системы является ее низкая вычислительная сложность на этапе распознавания, что позволяет классифицировать жесты рук в реальном времени. Ил.: 2. Библиогр.: 12 назв.

Ключевые слова: данные; распознавание; жест; сверточная нейронная сеть; вычислительная сложность.

UDC 004.932.2

Special Considerations for the Implementation of Data Processing Technique for Gesture Recognition / Siriak R.V., Skarga-Bandurova I.S., Shumova L.O. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2019. – № 13 (1338). – P. 117 – 127.

The main stages of solving the problem of machine recognition of hand gestures received from a webcam are considered. The task was to obtain a simple, accurate, and resource-efficient visual recognition technique. The main stages of data preparation and processing were determined; experiments were carried out with different values of hyperparameters, the order, and the number of layers of a convolutional neural network. As a result, we obtained the recognition accuracy of 98.46% with a loss function value of 0.02. This technique has a low computational complexity at the recognition stage and makes it possible to classify hand gestures in real time. Figs.: 2. Refs.: 12 titles.

Keywords: data; recognition; gesture; convolutional neural network; computational complexity.

УДК 621.3.078.3

DOI: 10.20998/2411-0558.2019.13.12

В. С. СУЗДАЛЬ, д-р техн. наук, ст. науч. сотр., Институт
сцинтилляционных материалов НАН Украины, Харьков,
И. И. ТАВРОВСКИЙ, канд. техн. наук, Институт
сцинтилляционных материалов НАН Украины, Харьков

ИНВАРИАНТНЫЕ ПО ВЫХОДУ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЫРАЩИВАНИЕМ ЩЕЛОЧНОГАЛОИДНЫХ МОНОКРИСТАЛЛОВ

На основе необходимых и достаточных условий инвариантности по выходу для линейных стационарных динамических систем к произвольным внешним возмущениям проведен аналитический синтез системы управления диаметром кристалла. Для данного объекта управления получено все множество эквивалентных решений для регуляторов, обеспечивающих инвариантность системы. Ил.: 1. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: инвариантные по выходу системы управления; произвольное внешнее возмущение; управление диаметром кристалла.

Постановка проблемы. Анализ современного состояния и тенденций автоматизации процессов выращивания щелочногалоидных монокристаллов показывает, что основной проблемой, стоящей перед разработчиками систем управления ростовыми установками, является повышение эффективности управления с учетом характерных особенностей объекта управления.

Щелочногалоидные монокристаллы выращивают в промышленности из расплава методом Чохральского [1 – 4] на установках, в которых для оценки диаметра растущего кристалла применяют метод измерения падения уровня расплава в результате быстрого дискретного подъема кристалла из расплава на малую величину [5]. В процессе роста монокристалла в тигле автоматически поддерживают постоянный уровень расплава, подпитывая его исходным сырьем. Диаметр растущего кристалла управляют, изменяя тепловые условия выращивания.

В промышленных условиях процесс выращивания обычно проходит в условиях значительных внешних возмущений, что значительно ухудшает качество получаемых монокристаллов. Источником возмущений являются: работа силовых установок, вибрация установок для выращивания, которая вызывается вращением тигля с расплавом и приводит к колебаниям поверхности расплава, и т.д. Для таких процессов целесообразно использовать системы управления, обладающие инвариантными свойствами, в которых качество

© В.С. Суздаль, И.И. Тавровский, 2019

функционирования не зависит от возмущений [6].

В линейной постановке в наиболее общем виде задача синтеза инвариантной системы по выходу решена в [7]. Однако в этой работе не найдено все множество эквивалентных решений для регуляторов, обеспечивающих инвариантность системы, что во многом осложняет решение задач исчерпывающего анализа устойчивости системы в целом, качества переходных процессов на выходе системы, возможность конфигурации системы без потери качества и т.д.

Анализ литературы. В [8] предложен новый подход для аналитического синтеза инвариантных систем. Пусть некоторая линейная непрерывная стационарная модель порядка n описывается системой уравнений в пространстве состояний

$$\dot{x} = Ax + Bu + Sw, \quad x(t_0) = x_0, \quad (1)$$

$$y = Cx, \quad (2)$$

$$u = Kx, \quad (3)$$

где $x \in R^n$ – вектор состояния системы, а $u \in R^l$, $y(t) \in R^m$, $w \in R^s$ являются векторами входа, выхода и возмущения в системе. Реализацию в пространстве состояний (1), (2) обозначим четверкой матриц (A, B, C, D) соответствующих размеров, матрица K – регулятор. Компоненты вектора w принадлежат классу произвольных непрерывных функций.

По определению, инвариантность выхода y системы по отношению к произвольному возмущению w связывается с выполнением тождества

$$F_y^w(p) = C(pI_n - A_\Sigma)^{-1}S \equiv 0, \quad (4)$$

где $A_\Sigma = A + BK$. Здесь $F_y^w(p)$ – передаточная матрица от возмущения к выходу, p – переменная преобразования Лапласа. При решении практических задач наибольший интерес представляет задача синтеза регулятора, обеспечивающего справедливость тождества (4) в случае, когда при $K = 0$ оно не выполняется. Непосредственно использовать тождество (4) для решения в общем виде этой задачи затруднительно вследствие операции обращения матрицы. В [8] на основе решения матричных уравнений методом канонизации найдены необходимые и достаточные условия, выполнение которых гарантирует справедливость тождества (4) при решении задачи синтеза.

Метод канонизации матриц для решения матричных уравнений, основанный на эквивалентных преобразованиях матриц, предложен в

работе [9]. Канонизацией некоторой матрицы M размера $m \times n$ и ранга r называется разложение этой матрицы на четверку матриц $\tilde{M}_{r,m}^L$, $\overline{M}_{m-r,m}^L$, $\tilde{M}_{n,r}^R$, $\overline{M}_{n,n-r}^R$, удовлетворяющих равенству:

$$\begin{bmatrix} \tilde{M}_{r,m}^L \\ \overline{M}_{m-r,m}^L \end{bmatrix} M \begin{bmatrix} \tilde{M}_{n,r}^R & \overline{M}_{n,n-r}^R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_r & 0_{r,n-r} \\ 0_{m-r,r} & 0_{m-r,n-r} \end{bmatrix},$$

где $\tilde{M}_{r,m}^L$ – левый канонизатор матрицы M ; $\tilde{M}_{n,r}^R$ – правый канонизатор матрицы M ; $\overline{M}_{m-r,m}^L$ – левый матричный делитель нуля матрицы M ; $\overline{M}_{n,n-r}^R$ – правый матричный делитель нуля матрицы M ; I_r – единичная матрица размера $r \times r$.

При решении матричных уравнений методом канонизации используется понятие сводного канонизатора $\tilde{M}$, вычисляемого по формуле $\tilde{M} = \tilde{M}^R \tilde{M}^L$.

Известно несколько алгоритмов формирования матричных делителей нуля [6 – 10]. Наиболее простым и наглядным является, видимо, так называемый "планшетный" способ формирования матричных делителей нуля. Суть процедуры заключается в следующем.

1. Исходная матрица M дополняется слева и снизу единичными матрицами в виде "планшета":

$$\frac{I_m}{I_n} \left| \frac{M}{I_n} \right.$$

2. Применяется операции Гаусса ко всему "планшету" для преобразования строк и столбцов. Используются такие элементарные преобразования, что указанная выше конструкция приводится к виду:

$$\left[\begin{array}{c} \tilde{M}^L \\ \overline{M}^L \end{array} \right] \left| \begin{array}{cc} I_r & 0 \\ 0 & 0 \end{array} \right. \left[\begin{array}{cc} \tilde{M}^R & \overline{M}^R \end{array} \right].$$

3. Матричный блок, стоящий напротив нулевых строк матрицы M , будет левым делителем нуля $\overline{M}^L$, матрицы M . Блок, находящийся под нулевыми столбцами матрицы M , будет соответствовать правому делителю нуля $\overline{M}^R$, матрицы M .

Если в результате элементарных преобразований не получится ни одной нулевой строки, то это говорит о том, что у матрицы M не существует левого делителя нуля. Если не получится ни одного нулевого столбца, то это говорит о том, что у матрицы M нет правых делителей нуля.

В [8] доказывается следующая теорема.

Теорема. Система (1) – (3) при заданных матрицах A , B , C и S обладает инвариантностью к произвольным внешним возмущениям в смысле выполнения тождества (4) тогда и только тогда, когда выполняется условие $\overline{C}^R \pi S = 0$, в котором матрица π максимального столбцового ранга, удовлетворяет условию

$$\overline{C}^R \pi B \overline{C}^R \pi A \overline{C}^R \pi = 0, \quad (5)$$

и система замкнута любым регулятором из множества

$$\{K\}_{\chi, \gamma} = -\tilde{K}_1 \overline{C}^R \pi A \overline{C}^R \pi \tilde{K}_2 + \overline{C}^R \pi B \chi + \gamma \overline{C}^R \pi, \quad (6)$$

где $K_1 = \overline{C}^R \pi B$, $K_2 = (\overline{C}^R \pi)$, χ и γ – матрицы заданных размеров.

В [4] приведен алгоритм, позволяющий вычислить матрицу π при синтезе управления.

Алгоритм:

1. Проверяется условие

$$\overline{C} B^L C A \overline{C}^R = 0. \quad (7)$$

Если это условие выполняется, то принимается $\pi = I_{(n-\text{rank } C)}$.

2. Если условие (7) не выполняется, то определяется матрица π_1 по выражению

$$\pi_1 = C B^L C A \overline{C}^R.$$

Если $\pi_1 = 0$, то система не обладает инвариантностью, алгоритм останавливается. В противном случае проверяется условие (5) при $\pi = \pi_1$.

3. Если условие (5) на предыдущем шаге не выполняется, то шаг i увеличивается на единицу и определяется матрица i -й итерации

$$\pi_i = \overline{C}^R \pi_{i-1} B \overline{C}^R \pi_{i-1} A \overline{C}^R.$$

Если $\pi_1 = 0$, то система не обладает инвариантностью, алгоритм останавливается. В противном случае проверяется условие (5) при $\pi = \pi_1$.

4. Алгоритм останавливается на k -м шаге при первом выполнении условия (5). Матрица π максимального ранга имеет значение π_1 .

Таким образом, предложенный в [8] алгоритм синтеза инвариантного управления системой (1) – (3) сводится к итерационному процессу определения матрицы π максимального столбцового ранга, удовлетворяющей условию (5).

Цель статьи – аналитический синтез инвариантной системы управления для выращивания монокристаллов.

Синтез управления.

Моделирование процесса выращивания как объекта управления (ОУ) проводилось на примере получения активированных монокристаллов NaJ(Tl) диаметром 250 мм. Процесс выращивания рассматривался как двумерный LTI-объект управления с двумя входными величинами – температура донного T_d и температура бокового нагревателя T_b и двумя выходами – диаметр кристалла D_s и температура расплава T_p . Данные для идентификации ОУ были получены в реальном масштабе времени при выращивании монокристалла на одном из этапов роста.

Матрицы A , B , C объекта управления имеют следующие значения:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -1.5483 & 0 & 0 \\ 1 & -5.4529 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.4322 \\ 0 & 0 & 0.5 & -3.1241 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} -0.5019 & 2.1419 \\ 0.2637 & 5.5727 \\ 0.2915 & -0.3939 \\ 1.6988 & -0.8284 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}.$$

Модель ОУ устойчива, полностью управляема и наблюдаема.

Канонизация матриц проводилась "планшетным" способом. Правый делитель нуля матрицы C

$$\overline{C}^R = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Для матрицы CB левый делитель нуля $\overline{CB}^L = 0$. Поэтому $\overline{CB}^L C A \overline{C}^R = 0$, т.е. условие (6) выполняется. Следовательно $\pi = I_{(n-\text{rank} C)}$, т.е. $\pi = I_2$.

Определим множество инвариантных регуляторов по (6) [11]. Вычисляем сводные канонизаторы матриц K_1 и K_2 .

$$\tilde{K}_1 = \begin{bmatrix} 0.0855 & 0.5754 \\ 0.1754 & -0.272 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{K}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

В выражении (6) матрица $\overline{\overline{C}^R}^L \pi B$ равна нулю, а матрица

$$\overline{\overline{C}^R}^L \pi = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

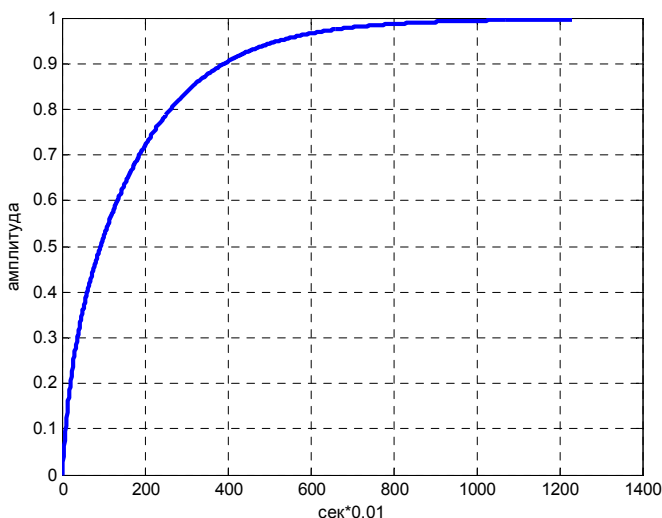
поэтому множество инвариантных регуляторов для рассматриваемого ОУ определяется выражением

$$\{K\}_\chi = \begin{bmatrix} 0.0855 & 0 & 0.2877 & 0 \\ 0.1754 & 0 & -0.01360 & 0 \end{bmatrix} + \gamma \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

Если выбрать матрицу

$$\gamma = \begin{bmatrix} 0 & 0.500 \\ -0.890 & 0.042 \end{bmatrix},$$

то переходная характеристика замкнутой системы по каналу $Td - Ds$ будет иметь следующий вид (рис.)

Рис. Переходная характеристика замкнутой системы по каналу $Td - Ds$

Следовательно замкнутая система управления диаметром монокристалла устойчива. Длительность переходного процесса не превышает 10 секунд, что в полной мере удовлетворяет требованиям к качеству управления для рассматриваемого процесса выращивания.

Выводы. Для линейной стационарной динамической системы управления процессом выращивания щелочногалоидных монокристаллов синтезирована система управления диаметром кристалла, инвариантная по выходу к произвольным внешним возмущениям. Для конкретного процесса выращивания найдено все множество регуляторов, решающих эту задачу (выражение 8).

Список литературы:

1. Chan Y.T. Numerical simulations of Czochalski silicon growth / Y.T. Chan, H.J. Gibeling, H.L. Grubin // Appl. Phys. – 1988. – Vol. 64. – № 3. – P. 1425-1439.
2. Суздаль В.С. Оптимизация управления процессами выращивания сцинтилляционных монокристаллов / В.С. Суздаль, Ю.М. Енифанов. – Харьков: "ИСМА", 2015. – 110 с.
3. Avinash M. Kumar. Numerical simulation of thermal stress distributions in Czochalski-grown silicon crystals / M. Kumar Aninash, M. Srinivasan, P. Ramasany // AIP Conference Proceedings. – Vol. 1942. – 2018.
4. Muller G. The Crochalski Method – where we are 90 years after Jan Crochalski's invention / G. Muller // Cryst. Res Technol. – 2007. – Vol. 42. – № 12. – P. 1150-1161.
5. Горилецкий В.И. Рост кристаллов / В.И. Горилецкий, Б.В. Гринев, Б.Г.Заславский. – Харьков: АКТА, 2002. – 535 с.
6. Щипанов Г.В. Теория и методы проектирования автоматических регуляторов / Г.В. Щипанов // Автоматика и телемеханика, 1939. – № 1. – С. 49-66.
7. Уонэм М. Линейные многомерные системы управления. Геометрический подход / М. Уонэм. – М.: Наука, 1980. – 456 с.

8. Буков В.Н. Условия инвариантности выхода линейных систем / В.Н. Буков, А.М. Бронников // Автоматика и телемеханика, 2005. – № 2. – С. 23-35.
9. Буков В.Н. Решение матричных уравнений методом канонизации / В.Н. Буков, В.Н. Рябченко, В.В. Косьянчук, Е.Ю. Зыбин // Вестник Киевского ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. Вып. 1. Киев: Изд. Киевского нац. ун-та, 2002. – С. 19-28.
10. Хорн Р. Матричный анализ / Р. Хорн, Ч. Джонсон. – М.: Мир, 1989. – 398 с.
11. Буков В.Н. Анализ и синтез матричных систем. Сравнение подходов / В.Н. Буков, В.Н. Рябченко, С.В. Горюнов // Автоматика и телемеханика, 2000. – № 11. – С. 3-43.

References:

1. Chan, Y.T., Gibeling, H.J., and Grubin H.L. (1988), "Numerical simulations of Czochulski silicon growth", *Appl. Phys*, Vol. 64, No. 3, pp. 1425-1439.
2. Suzdal, V.S., and Epifanov, Yu.M. (2015), *Optimization of management of scintillation single crystal growth processes*, Kharkov: "ISML", 110 p.
3. Avinash, M. Kumar, Vasan, M. Srini, and Ramasany, P. (2018), "Numerical simulation of thermal stress distributions in Czochalski-grown silicon crystals", *AIP Conference Proceedings*, vol. 1942.
4. Muller, G. (2007), "The Crochalski Method – where we are 90 years after Jan Crochalski's inversion", *Cryst. Res Technol*, vol. 42, No. 12, pp. 1150-1161.
5. Goriletsky, B.T., Grinev, B., and Zaslavsky, B. (2002), *Crystal Growth*, Kharkov: AKTA, 535 p.
6. Shchipanov, G.V. (1939), "Theory and methods of designing automatic controllers", *Automation and Remote Control*, No. 1, pp. 49-66.
7. Wonham, M. (1980), *Linear multidimensional control systems. Geometric approach*, Moscow, Science, 456 p.
8. Bukov, V.N., and Bronnikov, A.M. (2005), "Invariance conditions for the output of linear systems", *Automation and Remote Control*, No. 2, pp. 23-35.
9. Bukov, V.N., Ryabchenko, E.Yu., Kosyanchuk, V.V. and Zibin, E.Yu. (2002), "Solving matrix equations by canonization", *Bulletin of Kiev University. Ser. Phys.-Math. Science*, Issue 1, Kiev, Ed. Kiev nat. Un-ta, pp. 19-28.
10. Horn, R.A., and Johnson, C.R. (1989), *Matrix Analysis*, Moscow, Myr, 398 p.
11. Bukov, V.N., Ryabchenko, V.N., and Goryunov, S.V. (2000), "Analysis and synthesis of matrix systems. Comparison of approaches", *Automation and Remote Control*, No.11, pp. 3-43.

Статью представил д-р физ.-мат. наук, зав отделом 2319 ИСМА НАН Украины Тарасов В.А.

Поступила (received) 10.05.19

Suzdal Viktor, Dr. Sci. Tech., Senior Researcher,
ISMA NAS of Ukraine
Nauki Ave., 60, Kharkov, Ukraine, 61072.
Tel.: (057) 314-01-45, email: suzdal@isma.kharkov.ua
ORCID ID: 0000-0002-3816-9886

Tavrovskiyi Ihor, Cand. Sci. Tech., Senior Researcher,
ISMA NAS of Ukraine
Nauki Ave., 60, Kharkov, Ukraine, 61072.
Tel.: (057) 314-01-45, email: tawr@isma.kharkov.ua
ORCID ID: 0000-0001-9175-1667

УДК 621.3.078.3

Інваріантні щодо виходу системи управління вирощуванням лужногалогенових монокристалі / Суздаль В.С., Тавровський І.І. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2019. – № 13 (1338). – С. 128 – 136.

На основі необхідних і достатніх умов інваріантності по виходу для лінійних стаціонарних динамічних систем до довільних зовнішніх збурень проведено аналітичний синтез системи управління діаметром кристала. Для даного об'єкта управління отримано всі безліч еквівалентних рішень для регуляторів, що забезпечують інваріантність системи. Іл.: 1. Бібліогр.: 11 назв.

Ключові слова: інваріантні щодо виходу системи управління; довільне зовнішнє збурення; управління діаметром кристала.

УДК 621.3.078.3

Инвариантные по выходу системы управления выращиванием щелочногалогенидных монокристаллов / Суздаль В.С., Тавровский И.И. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2019. – № 13 (1338). – С. 128 – 136.

На основе необходимых и достаточных условий инвариантности по выходу для линейных стационарных динамических систем к произвольным внешним возмущениям проведен аналитический синтез системы управления диаметром кристалла. Для данного объекта управления получено все множество эквивалентных решений для регуляторов, обеспечивающих инвариантность системы. Ил.: 1. Библиогр.: 11 назв.

Ключевые слова: инвариантные по выходу системы управления; произвольное внешнее возмущение; управление диаметром кристалла.

UDC 621.3.078.3

Invariant on output control systems for the growth of alkali halide single crystals / Suzdal V.S., Tavrovsky I.I. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2019. – №.13 (1338). – P. 128 – 136.

On the basis of necessary and sufficient conditions of output invariance for linear stationary dynamic systems to arbitrary external perturbations, an analytical synthesis of the crystal diameter control system was carried out. For the given control object, the entire set of equivalent solutions for regulators is obtained, ensuring the invariance of the system. Figs.: 1. Refs.: 11 titles.

Keywords: invariant of output control systems; arbitrary external perturbations; crystal diameter control.

UDC 303.732

DOI: 10.20998/2411-0558.2019.13.13

V. I. TIKHONOV, dr. of tech. sciences, professor "ONAT", Odessa,
O. V. TYKHONOVA, teacher "ONAT", Odessa

THE MATH MODELING COGNITIVE ISSUES OF GENERAL SYSTEM THEORY

The paper focuses researches on general system theory. Related publications surveyed. Cognitive aspects of system math modeling studied. The issues of 'state-space' and 'space-structure' discussed for a model of open system. The role of observer and 'dark matter' formalism determined in system analysis. Figs.: 2. Refs.: 28 titles.

Keywords: general system theory; math modeling; cognitive aspects; space-structure; dark matter.

Introduction. The problem statement.

Modeling ability is an important philosophical category in our understanding both biological structures and artificial 'smart machines'. Diverse living matter entities (cells, organisms or their communities) apparently inherit and develop their own models of the world in the form of instincts, acquired reflexes or intellect. Through natural selection, these models as a form of individual or collective intelligence obtain clear motivation to survive in a volatile environment. Any model of a system is actually embodied either in fine proteins or in physical matter. The higher intelligence of a certain system substance, the more complicated fine matter organization. In developed living organisms, fine structures are bound with peripheral and central nervous system. The artificial intelligent systems are driven by microprocessors connected with sensors and actuators.

The great variety of biological individuals and intelligent technical devices determines a huge number of models. In fact, any science, language, or parts of it are models in our human world. The nature of models in biological objects and systems still remains a mystery in many ways. However, advances in artificial intelligence help understand some of the general principles in fine biological matter construction. In this regard, math modelling methods in general systems theory (GST) are of high interest as particular instrument of mental activity. The classical approach often treats a system as a set of co-related elements (e.g. "A whole composed of relationships among the members", [1]). Also other specific variations of this view are known.

In this work, we primarily treat a "system" as a *cognitive model of a material object*, i.e. somebodies subjective vision on a real object in terms of co-related parts of the whole which are distinguished by the subject. Besides,

our focus set on a *system math model* of related experiment.

Experimental physics, as well as fundamental researches in math logic, pose new challenges to specialists and philosophers. Our understanding of material world models requires new rethinking upon their rigor and legitimacy. In particular, we speak about fundamental categories of "space" and "time". Among physicists, relativity and uncertainty of object's models have already been established [2, 3]. Now, the role of subject-observer in math model of an experiment is an actual issue. Near a century ago, K.F. Gödel proved incompleteness of any formal theory or math model [4], as well as confusion of the so-called 'naive sets theory' of G. Cantor [5, 6].

In parallel, J. Neumann formulated his multilevel sets theory ([7]) along with based on it math theory of quantum mechanics in terms of operators in generalized Hilbert space [8]. In recent decades, much attention of physicists is being paid to a relatively new phenomenon of "dark matter", which is hardly detected but seriously influences observed processes [9].

The practice shows, that academic courses on general system theory are not always in trend of cutting edge experimental or theoretical physics. The present work pretends to rethink the role of subject-observer and dark matter in system analysis and modeling. On this premise, some cognitive principles of systems' math modeling introduced, as well as a simple case of enhanced tensor approach for an abstract system.

1. Related publications survey.

In 1963, the book of the American mathematician G. Kron "Diakoptics" was published, which sets out original methods for the study of complex systems of different nature in parts [10]. Based on the decomposition of a complex system, topological models are built – graphs of the original system. Kron introduced the concept of space-structure. Such a space is described by a fully-connected graph of a network whose nodes are separate parts of the system (subnets). The matrix of such a graph contains in diagonal cells descriptions of individual subsystems. The off-diagonal elements describe the connections between the parts of the whole. For any subsystem, an analysis is carried out separately and a solution is sought. The overall solution is obtained by articulating the resulting partial solutions for all the subsystems.

The Kron's method is convenient for direct calculations on computers. This approach is also interesting because Kron first proposed a non-standard tensor analysis of electrical machines and networks, which can be used to study complex systems in other realms. Of course, the diakoptics does not provide general solution for various problems; therefore, each given case requires particular consideration.

The fundamental work on general systems theory is the book of L. Bertalanffy ([11], 1969). In the introduction, the author writes: "Systems

theory ... is preeminently a mathematical field, offering partly novel and highly sophisticated techniques, closely linked with computer science, and essentially determined by the requirement to cope with a new sort of problem that has been appearing". The author focuses three basic math sections of GST: set theory, graph theory, network theory (p. 21). He further emphasizes the importance of such areas of mathematics as information theory, automata, game theory, decision making and queuing theories.

Finally, Bertalanffy identifies the least formalized part of the GST – verbal models, i.e. models in terms of professional languages (pp. 22-23). He says: "A verbal model is better than no model at all or a model which, because it can be formulated mathematically, is forcibly imposed upon and falsifies reality. Theories of enormous influence such as psychoanalysis were un-mathematical or, like the theory of selection, their impact far exceeded mathematical constructions which came only later and cover only partial aspects and a small fraction of empirical data. Mathematics essentially means the existence of an algorithm which is much more precise than that of ordinary language. History of science attests that expression in ordinary language often preceded mathematical formulation, i.e., invention of an algorithm".

Bertalanffy underscored the structural/functional hierarchy in our vision the world: "A similar hierarchy is found both in "structures" and in "functions". In the last resort, structure (i.e., order of parts) and function (order of processes) may be the very same thing: in the physical world matter dissolves into a play of energies, and in the biological world structures are the expression of a flow of processes. At present, the system of physical laws relates mainly to the realm between atoms and molecules (and their summation in macrophysics), which obviously is a slice of a much broader spectrum. Laws of organization and organizational forces are insufficiently known in the subatomic and the super-molecular realms. There are inroads into both the subatomic world (high energy physics) and the super-molecular (physics of high molecular compounds); but these are apparently at the beginnings. This is shown, on the one hand, by the present confusion of elementary particles, on the other, by the present lack of physical understanding of structures seen under the electron microscope and the lack of a "grammar" of the genetic code". Chapter 6 of [11] focuses the openness of a system model as a key GST-concept, along with the "bio-creatures-to-automata" correspondence in terms of system entropy. There are also discussed the issues of social and history system modeling, as well as system models in psychology and psychiatry.

One of the founders of the modern formalized theory of dynamical systems is the Hungarian mathematician R. Kalman ("Topics in mathematical system theory", 1969, [12], part 1 – "Theory of Automatic Control", and part 4

– "Algebraic Theory of Linear Systems"). The second part of the book (P. Falb) considers the basics of the optimal control theory based on Pontryagin maximum principle. The third part (Arbib) studies the automata theory. The algebraic linear analysis is primarily focused on integral and discrete Laplace transformations, Fourier harmonic analysis, etc. The algebraic structure of linear systems allows establishing relationships between the models of pulsed and continuous systems, as well as the theory of automata.

The Kalman's approach to dynamic system modeling aims describing the flow of causal relationships from the past to the future. Based on the "modules theory", the linear stationary systems considered with the discrete time and a finite number of input/outputs (aka "black box"). One of the well-known models of that type is the Kalman's filter to predict dynamic object behavior. In contrast to Kalman's continuous time in dynamic system study, the section "Automata theory" by Arbib uses system states transition in discrete time dots with no fixed time-metric. Such an approach is truly fruitful to logical system study. Though, the complexity of Kalman's formalism prevents easy understanding of dynamic systems theory by undergraduates.

A fundamental academia work on GST is "Theory of hierarchical multilevel systems" (M.D. Mesarović, D. Macko, Y. Takahara, 1970, [13]). This book targets production/economical applications (e.g. planning, operational management, accounting etc.). With respect to general aspects of system modeling, of great interest is multi-level hierarchy approach to complex systems study and system math modeling. In fact, the idea of world hierarchical order originate in deep antiquity (the ancient teachings of India, Egypt, Greece and Rome, etc.)

The works by J. Gigch from University of California ([14], 1978) laid a bridge between the general theory of systems as a new scientific discipline and system approach to practical tasks. Application sphere of these ideas embraces decision making in administrative-state apparatus and organizations. The goal setting, planning and optimization are key aspects in this work. The notion of a 'system' is introduced as a set of parts or components that are interconnected organizationally. The Gigch's works benefit study of system theory cognitive problems (e.g. optimization math task) on a qualitative and verbal level, avoiding cumbersome formalisms. This attracts a wide range of students and specialists, including the humanitarian sphere.

The chapter 8 of the first Gigch's book [14] ("Quantitative definition and measurement") introduces 'measurement through a hierarchy of nested models'. Chapter 9 ("Measurement Problems and Social Sciences") uses the methodology of fuzzy sets to formalize GST models.

A known propagandist of Kalman's dynamical systems theory is J. Casti (Univ. of New York). His dedication to "Connectivity, complexity, and

catastrophe in large-scale systems" ([15], 1979) is: "To Rudolf Kalman, who transformed systems theory from a mystical art into a mathematical discipline". Casti noted: "One of the most pervasive and least well-defined concepts in modern intellectual thought is the notion of a system. One of the primary goals of this monograph is to provide a basis for common discussion of system-theoretic issues by presenting numerous examples of system problems from many disciplines and showing how they all may be described and analyzed by means of a rather small number of abstract paradigms".

The core Casti's idea is representation the system framework as a graph, which echoes the principles of Kron's diakoptics. In this case, a new concept of geometric space arises, the dimension of which is determined by the number of vertices of the graph. Also, the problem of the system complexity and its quantification is discussed. The concept of static and dynamic complexity of system behavior in time is introduced. Besides, the complexity of object management discussed in the context of its computational operability. An important role underscored to the qualitative (structural) and quantitative (algebraic) system framework.

The notable contribution to GST made E. Nappelbaum by Russian translations of Kalman, Feynman, Mesarovic and other known scientists in system analysis. Nappelbaum is also a co-author of "System Analysis-1979" journal ([16], 1980). In his preface to the second edition of the math theory of systems by R. Kalman [11], he wrote the following (for correct citation we also bring original text in Fig. 1). "From my point of view, the systems approach is based on cognition that any task is not something objective, existing regardless of who wants to solve it, but in some sense equally reflects as objective properties of reality, within which this task is attempted to be solved, and the attitude to this reality of the one who sets such a task..."

С моей точке зрения, системный подход зиждется на осознании того, что всякая задача не является чем-то объективным, существующим независимо от того, кто ее хочет решать, а в каком-то смысле в равной степени отражает как объективные свойства реальности, в рамках которой эту задачу пытаются решать, так и отношение к этой реальности того, кто такую задачу ставит. Иными словами, всякая реальность дает почву для постановки целого ряда различных, возможно несовместимых, а зачастую и прямо противоположных задач, и поэтому весьма важно не только корректно поставить задачу, но и отчетливо осознать, почему именно этой задаче мы отдаем предпочтение в нашем взаимодействии с реальностью. Системный анализ и другие методы этой же категории и должны помочь осознать, какие же из задач, которые в данной реальности можно поставить и решить, соответствуют желаниям и возможностям субъекта, намеревающегося изменить эту реальность, и позволить преобразовать несистематизированные представления о реальности в постановку задачи, доступную для рационального решения формальными методами.

Fig.1. Original Russian text of the cited fragment

"... In other words, any reality gives rise to the formulation of a number of different, possibly incompatible, and often directly opposing tasks, and therefore it is very important not only to set the task correctly, but also to clearly understand why it is this task that we prefer in our interaction with reality. Systems analysis and other methods of this category should help to realize which of the tasks that in this reality can be set and solved correspond to the desires and possibilities of the subject intending to change this reality and allow unsystematic representations of the reality in the formulation of the problem, available for a rational solution by formal methods. And at the same time, the mathematical theory of systems, to which the book offered to you is devoted, is engaged in clarifying the properties of the formal description (models) of reality, which allow us to set problems and solve them. It is this close attention to the relationship between the subject of observation and its object that systems theory differs from ordinary mathematics, and this is where the center of its specific research lies".

The book "System analysis and design" (A. Dennis et al, [17], 2012) encourages GST-learning students not just to read about, but understand related issues, with a focus on the 'Unified modeling language' (UML-2) and "Software development lifecycle" (SDLC) as proper instruments for object-oriented analysis and design. Also, emphasized the visual-form interpretation throughout of the discussed issues to help students better understand the major elements and their relationships of the subject. Hereby, no specific math tools are discussed.

In [18] (2014) there are considered electrical, mechanical and hydraulic systems, along with their transfer functions estimation in MATLAB SIMULINK. The functional state-space aspects discussed with respect to differential equation in math models. The publication [19] (2014) discusses the state-space representation of a system in terms of tensors. It is reasoned, that tensor approach is directly applicable in concurrent linearly coupled dynamical systems for case study of distributed signal processing in cyber physical systems.

The work "Generic Framework for Simulation of Cognitive Systems" ([20], 2014) presents a model of a cognitive system based on communicating agent's population. There is underscored the importance of the environmental structure, in which a system evolves and learns, as well as the learning capacities of individual agents. The agent-based model shows that boundaries might be seen as a product of agent's communication in a given environment.

The work [21] (2016) presents the adaptation of Kron's tensor analysis of network for the electromagnetic compatibility design and analysis. The idea is, firstly decompose a complex system onto the sub-systems related to

each other in graph view. Secondly, to map the system graph onto an abstract geometrical space, where the graph edge's weights play the role of independent (orthogonal) axes. The author claims that Kron's tensor model of electro-magnetic circuits based on space-structure geometrical approach were applicable to many other complex objects study.

The publication [22] (2017) exhibits the multilayer tensor factorization method with respect to recommender systems applications in E-commerce and entertainment industries. Tensors are understood as multi-dimensional arrays. The streaming tensor factorization method is considered in [23] (2018) for processing of high-volume and multi-way temporal data in Internet networks, recommender systems and image analysis. The paper presents the Bayesian robust streaming tensor factorization model to identify sparse outliers, automatically determining the underlying tensor rank and fitting the low-rank structure. The model is implemented in MATLAB. This approach is applied to complete streaming tensors in synthetic data, dynamic magnetic resonance imaging (MRI), video sequences and Internet traffic data.

S. Moura ([24], (2018) seeks to write non-trivial ordinary differential equations (ODE) for energy system. Once sustainable ODE properly defined, the system dynamics analyzed in terms of 'state-space' canonical template. Discussed transition from nonlinear object description to a linear systems of ODE.

The publication [25] (2018) calculates the many-body dynamics of polar-tonic states supported by an optical cavity, which is filled with organic molecules. Optical, vibration, and radioactive processes are treated on an equal footing, employing the algorithm of time-dependent matrix states. Also there analyzed single- and many-molecule cases to show the role of collective motion of molecular nuclei and dark states in determining the polar-ton dynamics and photon emission.

The work published by F. Schröder et al from Cambridge University [26] (2019) presents the tensor network simulation approach for multi-environmental open quantum dynamics via machine learning and entanglement renormalization. The authors stated that simulation of open quantum dynamics is a critical tool for understanding the non-classical properties of matter towards their functionalized presentation in future devices. However, this task is challenging due to strong non-Markovian coupling of environmental molecular vibrations to the electronic system degrees of freedom. For this purpose, an advanced computational strategy has been presented to allow tensor network methods computing the non perturbative, real-time dynamics of molecules. There exhibited an "ab-initio" machine learning and entanglement analysis to provide real-time insight of dissipative photo physics.

2. Discussion on publication survey. Objectives

The survey of GST-researches indicates an obvious need in further developing of general systems theory as an academic discipline addressed to a wide range of applications from physics to humanitarian and social sciences. Now, diversity of methods in system analysis is exhibited. Engineering designers often construct highly abstract math models that weakly understandable even for specialists. Researchers on economics, sociology and other realms prefer less formalized methods of system analysis, more easily accepted by undergraduates.

Maybe the number one issue in system analysis is how to understand the "system" as a key formal term. Today, the *multilevel hierarchy* of a system vision increasingly prevails among the GST-specialists meaning that any stratum of a system can be uniformly presented on common principles but filled in with specific content. Also the concept of *system model openness* is more and more popular in contrast to the commonly known assumption of a "closed physical system". Of course, the axiom of a "closed system" is sometimes relevant to given task; however, with more comprehensive analysis, one sooner or later challenges the possibility of building the so-called closed system. An example of term confusion by "closed system" is known paradox about the "Universe thermal death" which allegedly follows from the thermodynamics' second law (aka 'entropy of any closed system invariably increases'). Yet, this paradox may be obviously resolved through the openness declaration of any system, which eliminates any logical statement about the "whole Universe" itself (except, perhaps, recognition the fact it actually exists but never completely seen). Remember the Bible commandment "Do not mention the name of your Lord in vain". Thus, the observable world around is only a finite open part of an infinite Universe, and for this visible part, the thermodynamics second law is not valid. It turns out that an open system can reduce its entropy by interacting with the rest of the world (which is what is actually happening). Apparently, this insight of an 'open system' is fruitful to other systems and models study (biological, economic, social etc.). Thus, "black box" as a popular dynamic system model is disputable under the doctrine of system model openness.

Another key aspect of GST-methodology is formalization the notion "state-space" of system, as well as the "spatial" and "time" categories mutual correspondence. In this respect, some questions of interest arise. First, are spatial and time coordinates crucially different or they can be joint to a uniformed 'space-time' framework? Second, what about the spatial and time coordinates dimensionality? Third, is time-argument as reversible as all the spatial coordinates are? Again, is a straight unidirectional arrow an adequate geometric model of time-axis? Our conventional world's spatial image is the

notorious three-dimensional Cartesian space. In theoretical physics, also known more complicated forms of real matter existence, e.g. four-dimensional Minkowski space-time (with real Cartesian coordinates and imaginary time axis, [27], 1908). Minkowski space-time is a pseudo-Euclidean (or complex stratified) Euclidean space. Later on, new models of the physical world appeared (1921, T. Kaluza, 5-dimensional model; 1990s, E. Witten et al, 11-dimensional model). In 1996 the famous book issued "The nature of space and time" (S. Hawking and R. Penrose [28]). Herein Hawking uses the term "Universe" meaning "all that is in nature" with no boundaries; next he concludes that Universe is closed. Also he made a cautious assumption of possibly looped time, but himself abandoned this idea a little bit later. With respect to coauthor's cognitive discussion around this book, the Penrose's theses about the quantum-wave model of gravity and tensor description of physical world, undoubtedly are significant steps on further generalization of previously known scalar and vector field models. Unlike his coauthor, Penrose prefers talking about the 'open universe', and later on uses the term "our Universe". Notably, that both coauthors do not argue the issues of physical space dimensionality beyond the four-dimensional Minkowski space-time.

Regarding the mathematical state-space of an arbitrary physical or humanitarian system the specialists primarily appeal to objective characteristics and do not underscore specific nature of modelling object in the context of somebody's subjective motivation. In this sense, position of Nappelbaum in [16] concerning the principal role of a subject-observer is of particular interest to our discussion. Besides, some recent researches in physics indicate increasing interest in the so-called 'Dark matter' phenomenon. A coherent idea was expressed in [26] regarding the "Dark states" in the tensor model of a technical system. However, the concepts of dark matter and dark states are less reflected in humanitarian system researches.

The present work objective: substantiation cognitive principles of math modeling physical objects, based on the open system architecture with subject-observer and dark matter formalisms.

3. Model as a subject's point of view on the object of study

Known literature on general system theory (GST) commonly treats "system" as a set of elements of a whole related to each other. Such insight of system needs two remarks: a) system is a closed and single-level framework (no outside interfaces declared, and all the elements are peer-to-peer members); b) neither 'subject-observer' nor "dark-states" explicitly posed among the system elements. Consider above remarks in detail.

Openness and system hierarchy

Is the system hierarchy inner property of a real object, or it is just our perception of it? The answer to this question seems not really actual but more important to simplify our mental image of a system complexity. The hierarchical model presentation of a great object allows the use of simple operational tools to handle subsystems at different levels. Recall the ancient teachings of Hermeticism philosophy (Tábula smaragdina): "What is below is like what is above. And what is above is similar to what is below. And this must be known in order to gain knowledge of the most wonderful One".

Apparently, the openness and multilevel system's hierarchy are rather mutually bound characteristics of our insight a large object, then its inherent property. Next, we distinguish the "openness in breadth" (i.e. up the hierarchy) and "openness in depth" (i.e. down the hierarchy). An arbitrary subsystem layer we assume as "zero-rank" stratum. In accordance with multilevel set theory by Neumann (i.e. von Neumann classes) introduce the following system model architecture. The up/down hierarchy subsystems layers (in comparison to predetermined zero-rank level) we'll define as positive/negative rank system strata. The "n-rank subsystem" integrates "n-rank elements". Each "n-rank element" may turn to "n-1-rank subsystem".

Therefore, each subsystem or element of rank n is potentially open up and down in a system model hierarchy. In other words, any model of a system looks a "multi-slice cake" in the intermediate range between the observed microcosm and the macrocosm. Everything else but this "cake" remains beyond our perception and modeling, while new experiments extend the scope and horizons of our observations. Yet, anyone can solely observe a vanishingly small part of the whole infinite World. The multilevel hierarchical approach is applicable not solely to pure physical objects, but more in general for many other ones (informational, biological, social, economic etc.). The paradigm of open system hierarchy leads to the principal dualism in system architecture, i.e. each subsystem should have not one, but at least two types of presentations: a) subsystem opened "in depth" as a framework built on the set of inner elements and outer interface points; b) subsystem opened "in breadth" as a point of the overlying hierarchy level; this point potentially has a "hidden" inner structure.

The role of subject-observer

The inclusion observer into a system model inevitably makes it subjective, which can be perceived as its flaw. One can understand an inquisitive researcher who intuitively aims building an accurate object's model independent of a particular point of view. This is somehow possible in middle rank stratum observations between the microcosm and macrocosm with respect to our tools. Instead, elementary particles as objects of interest in

quantum mechanics, inevitably change their behavior forced by the subject's observation instruments. Therefore, one cannot know the "real behavior" of tiny particles. In a quantum-physical experiment, we solely observe some results of our instrumental intervention into the physical matter. This means that a smart model of a system must necessarily include a "subject" as an actual participant in the process of experimental research and modeling. It also follows that any model of such a physical system is nothing more than subject-specific formalization of a particular experiment (or a typical experiment, if it can be repeated under identical conditions). Each such experiment (and, hence, its "system model") pursues a well-defined goal, solves a limited circle of problems, beyond which it loses its relevance.

4. Spatial-temporal system states

In theoretical physics, a model of a four-dimensional pseudo-Euclidean space-time of three real Cartesian axes and one imaginary time axis (with Minkowski metric) is often considered. Also there are known models with greater dimensions (e.g. 10-dimensional space in string theory).

In engineering applications are used the so-called abstract multidimensional spaces (e.g. N-dimensional Euclidean space). Functional analysis widely explores infinite-dimensional spaces (e.g. Hilbert space). In our opinion, everything that concerns the questions of infinity requires more discussion towards logical correctness and expediency under the modern quantum insight of matter.

How many measurements (coordinate axes) are necessary and/or sufficient to describe both static and dynamic states of an arbitrary system? After all, it is constructively impossible to build models with an infinite number of dimensions. Maybe we should abandon the "infinite-dimensional spaces" in general in the theory of mathematical modeling? What is the essence of the concept of "time"? Is time objectively existing entity? Is time continuous, unidirectional and one-dimensional matter? A reasoned response to each of these questions may require considerable efforts. Without claiming the ultimate completeness, we will formulate some postulates and principles to introduce a system math model in terms of tensor study of complex systems in parts.

Time category in system models

Apparently, any observation or measurement requires finite time. Therefore, the concept of the "instantaneous" state of the system at the "point" of time t we will try to avoid in our math models of systems (considering it only as a theoretical idealization). The time category we will treat mostly as topological coordinates (i.e. discrete consecutive observation intervals, not necessarily of the same magnitude). So, instead of real time, we will simply describe system transitions from one state to another. Time itself next

understood as tags of consequent system states (such a time model is used, for example, in Markov chains). Unlike known models with one-dimensional time, we consider time hierarchy nested intervals of various scales. A system model as an abstract math image of a physical experiment we will consider time as a closed chain of events in which the end time point coincides with initial point by all the controlled factors. This means that, up to unrecorded parameters, the time in a system model will be considered cyclically closed and reversible, i.e. peer the other "purely spatial" coordinates. As an instant static state of system S , we will treat system's averaged state on a discrete observation interval of minimal scale.

State-space of system model

Suppose system S an object observed by N sensors each having own freedom. If all the sensors' readings are pair-wise independent, then the set of object's states maps onto a certain volume of an abstract N -dimensional space V with orthogonal axes (N -dimensional parallelepiped in N -dimensional Euclidean space).

Such a model is often used in applied researches. Though, once sensors readings bound, the non-orthogonal Euclidean space U shall be applied, which defined by the so-called Riemann metric tensor R (square positive Hermitian matrix of dimension $N \times N$). The geometrical meaning of Riemann tensor R is the scalar product of basis vectors (as a formal description of the relationship between all N sensors). If sensor properties and relationships change in time, the so-called local Euclidean space can be used as a tensor function of a "point" (where a "point" understood as different temporal/spatial position of the object).

Is there any fundamental restriction on the number of independent (or at least partially independent) sensors when observing a complex object? Most likely not, therefore we assume that a system S may have a state space of any finite dimension N , depending on the nature of experiment. The states of the system will also be considered discrete points (each of which symbolizes a local uncertainty domain in the state-space), since nothing can be precisely measured. In addition, the fact that the system is in a particular state will also not be considered obvious, but only expected with some probability. The dynamic properties of a system with a similar model are described by unconditional probabilities of states, as well as by conditional probabilities of transition from one state to another. The simplest model of this kind is the scalar function of probability distribution for various object states. This model is valid if none previous states impact future ones.

The model of such a system is one-dimensional array (aka "vector-string") of M probabilities (M is the number of discrete states in the N -dimensional state-space). In a more complicated (but nonetheless, fairly

simple) case, the probability of system state transition depends only on its current state (the so-called Markov discrete random process or a Markov chain). The Markov chain can be described by a square transition matrix H of size $M \times M$. The diagonal cells of matrix H contain unconditional states' probabilities; the off-diagonal elements determine conditional probabilities of state transitions. If H is a positive symmetric matrix, it satisfies the Riemann metric tensor. If the object's dynamic properties gradually evolve over a larger time scale, the model of system S is a looped sequent time-chain (i.e. discrete topological circle) of space-tensors. This space-tensor may be of different rank and complexity. The simplest case is zero-rank tensor presentation (scalar function of discrete time). The deeper probability dependence of system state transitions, the more complex dynamic model of the system looks. More advanced is the first-rank tensor view (vector-function of discrete time). If Markov dynamic system considered, then second-rank tensor applicable (i.e. matrix of states transitions as a function of discrete time).

In the second approximation, the conditional transition to each state depends on two previous states. So, the third-rank tensor shall be used for such a non-Markov process modeling (i.e. $M \times M \times M$ -dimensional table of conditional probabilities for state transitions as a function of discrete time).

Consider the mentioned above multidimensional looped chain in a dynamic system model. The looped time-chain is discrete topological circle which ideal image is continuous geometrical circle. When multilevel-time is used (of nested time-circles of different scales), then geometrical image of such time presentation evolves to multidimensional torus. The fact is known from general topology, that torus is a unique closed manifold, where ubiquitously continuous vector (or tensor) field can be defined. This property of torus is important for tensor modeling of dynamic objects with multidimensional looped time.

Above approach with some variations, remains popular and acceptable for system modeling in certain tasks. Though, it neither provides the system hierarchical architecture nor subject-observer's important role in physical system modeling. An abstract N -dimensional space of object-states model is formed by subject's instruments of observation, as if they did not impact the object observed. These instruments and related state-space look as the "Absolute" towards an object of study (e.g. space is empty if no objects detected). Such vision is challenging in microcosm study, while sensors roughly impact tiny things. For a broader scope of general system theory, the model of passive observation of objects needs enhancement.

5. Space-structure as a generalized system model

Considered above state-space of a physical system (denote it Φ) assumes to be a priori and stable, wherein a system instant state looks like an abstract

"dot", and system behavior in time as a phase-loop of trajectory in Φ . In Kron's tensor analysis, as well as some other works followed him, a fundamentally new category (aka "space-structure") was developed in the theory of math models. Some distinctive features of the "space-structure" in contrast to common "phase state-space" of a physical system are discussed further on. In fact, the "space-structure" concept formalizes the current perception the 'objects of interest' by a "subject-observer". Herewith, the following cognitive categories emerge: S – "subject-observer" which understood as a class of possibly multiple observers; X – class "objects of interest" with respect to given observer; W – class of "dark matter" entities around observer. Relationships among S , X , W in time spot t denote $\mathfrak{R}_t$ and present as a graph in Fig. 2. This graph reflects a single stratum of some rank in a multilayer hierarchy of a system model. Each of the three classes S , X , W may include one or more elements, related to each other.

Compare to conventional system models with "state-space" formalism built on the objects of class X , the graph in Fig.2 includes two additional categories (i.e. class S of subject-observers and class W of dark matter entities). While "state-space" records typically emerge by sensor readings, the only quantitative data supposed in "space-structure" observations are on-pair relations estimation among the members of specified three classes (S , X and W).

On this premise, the "space-structure" appears as mapping relationships $\mathfrak{R}_t$ onto an abstract geometrical form. An instant geometric image of "space-structure" might be a set of vectors (rapper), where each vector corresponds to an object from classes S , X and W .

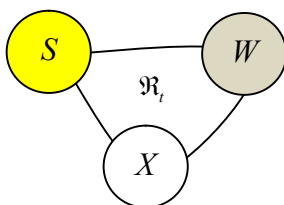


Fig. 2. Relationships among subject, object and dark-matter

Any given set of real vectors V can be determined in diverse forms, e.g. an algebraic array of vector modules along with the matrix of correspondent angles among them; matrix H of scalar product $[V \times V]$; matrix V of normal coordinates in an orthonormal Euclidian basis; matrix of normal coordinates in non-orthogonal Euclidian basis; matrix of either covariant or contra-variant tensor components in non-orthogonal Euclidian basis with known metric).

All these forms of vector-rapper presentations are equivalent, and therefore, can be obtained from each other with some reservations. So, a geometric rapper view of a "space-structure" can be taken from the weighted graph of relationships among the classes S , X and W . Detail consideration of these issues will be the subject of our next publications.

Conclusion

Despite significant advances in system analysis realm, the general systems theory is far from complete as an academic discipline. The difficulties in general theory of systems design are due, among other things, to a wide range of applied system researches – from quantum physics to economics and the humanities. In present work, another attempt is made to further formalize the general theory of systems based on key principles of modern physics and mathematical logic, such as openness and multilevel hierarchy of system architecture, the uncertainty of object's state observations and measurements, relativity concept. The paper also focuses the cognitive aspects of such metaphysical categories as 'temporal and spatial structure' with respect to real world object modeling. In particular is underscored the so called 'space-structure' framework in tensor presentation of experimental data, as well as the principal role of subject-observer in an open system model. In addition to subject-observer, the dark matter formalism has been introduced as extra member of system tensor model.

References:

1. Definitions & Translations [Electronic resource]. – Available: [https:// www.definitions.net/ definition/system](https://www.definitions.net/definition/system).
2. General relativity [Electronic resource]. – Available: <https://science.jrank.org/pages/5790/Relativity-General.html>.
3. The Uncertainty principle [Electronic resource]. – Available: <http://230nsc1.phy-astr.gsu.edu/hbase/uncer.html>.
4. Gödel K. (1913), Über die Vollständigkeit des Logikkalküls, Doctoral dissertation, Univ. of Vienna. – 1929. / A. Einstein, M. Grossmann // Zeitschrift für Mathematik und Physik, vol. 62, pp. 225-261.
5. Cantor, G. (1883), "Ueber unendliche, lineare Punktmannichfaltigkeiten", *Mathematische Annalen*, 21 (4), pp. 545-591.
6. Russell, B. (1980), *The Principles of mathematics*, 798 p.
7. Neumann, Von J. (1927), "Mathematische Begründung der Quantenmechanik", *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse*, pp. 1-57.
8. Neumann, Von J. (1928), "Die Axiomatisierung der Mengenlehre", *Mathematische Zeitschrift*, No. 27, pp. 669-752.
9. Antonov, A.A. (2016), Explaining the phenomenon of dark matter and dark energy by existence of the hidden multiverse [Electronic resource]. – Available: <http://pubs.sciepub.com/faac/2/1/1/index.html>.
10. Kron, G. (1963), *Diakoptics. The piecewise solution of large scale systems*, London, MacDonald, 166 p.

11. Bertalanffy, L. (1969), *General system theory*, George Braziller, New York, 289 p.
12. Kalman, R.E., Falb, P.L., Arbib, M.A. (1969), *Topics in mathematical system theory*, [Electronic resource]. Available: <https://trove.nla.gov.au/work/21064526?selectedversion=NBD4945>.
13. Mesarović, M.D., Macko, D., Takahara, Y. (1970), *Theory of hierarchical multilevel systems*, Academic Press. 294 p. – Available: <https://epdf.tips/theory-of-hierarchical-multilevel-systems.html>.
14. Gigch, J.P. (1978), *Applied general systems theory*, HarperCollins College Div., 2 edition. 602 p.
15. Casti, J. (1979), *Connectivity, complexity, and catastrophe in large-scale systems*, JOHN WILEY & SONS, Chichester – New York – Brisbane – Toronto, 203 p.
16. Nappelbaum, E.L. (1979), *System analysis as a research program*, System studies, Ejegodnik, Moskow, Science, 384 p.
17. Dennis, A., Wixom, B.H., Roth, R.M. (2012), *System analysis and design*, 5 edition. 594 p.
18. Patil, A., More, S. (2014), *Mathematical modeling of physical system*, [Electronic resource]. – Available: https://www.researchgate.net/publication/272713431_Mathematical_modeling_of_physical_system.
19. Murthy, G.R. (2014), *Concurrent cyber physical systems: Tensor state space representation*, [Electronic resource]. – Available: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1303/1303.1597.pdf>.
20. *Generic framework for simulation of cognitive systems: A case study of color category boundaries*, 2014. [Electronic resource]. – Available: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-02309-0_42.
21. Maurice, O. (2016), *Adaptation of Kron's tensorial analysis of network for the EMC design and analysis of systems*, [Electronic resource]. – Available: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01382221/document>.
22. *Multilayer tensor factorization with applications to recommender systems*, 2017. [Electronic resource]. – Available: <https://arxiv.org/pdf/1711.01598.pdf>.
23. *Robust factorization and completion of streaming tensor data via variational Bayesian inference*, 2018. [Electronic resource]. – Available: <https://arxiv.org/pdf/1809.01265.pdf>.
24. Moura, S. (2018), *Energy systems and Control. Chapter 1: Modeling and systems analysis*, [Electronic resource]. – Available: <https://ecal.berkeley.edu/files/ce295/CH01-ModelingSystems.pdf>.
25. *Tensor network simulation of non-Markovian dynamics in organic polaritons*, 2018, [Electronic resource]. – Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/30547635/>.
26. *Tensor network simulation of multi-environmental open quantum dynamics via machine learning and entanglement renormalization*, 2019, [Electronic resource]. – Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6401190/>.
27. Minkowski H. (1908), *The fundamental equations for electromagnetic processes in moving bodies*, [Electronic resource]. – Available: <https://en.wikisource.org/wiki/Translation>.
28. Hawking S.W. Penrose, R. (1996), *The Nature of Space and Time*, [Electronic resource]. – Available: <http://www.theory.caltech.edu/~preskill/pubs/preskill-1996-hawking.pdf>.

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

Received 20.05.2019

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

St. 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

St. Kuznechna 1, Odessa 65029, Ukraine

Tel.: 097-490-56-18, E-mail: [elena.tykhonova @onat.edu.ua](mailto:elena.tykhonova@onat.edu.ua)

УДК 303.732

Когнітивні проблеми математичного моделювання у загальній теорії систем / Тихонов В.І., Тихонова О.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2019. – № 13 (1338). – С. 137 – 154.

Робота присвячена дослідженням у загальній теорії систем. Наведено огляд тематичних публікацій. Досліджено когнітивні аспекти математичного моделювання систем. Розглянуто питання "простору-станів" та "простору-структури" у тензорній моделі відкритої системи. Визначено роль спостерігача і механізм формалізації "темної матерії" у системному аналізі. Ил.: 2. Бібліогр.: 28 назв.

Ключові слова: загальна теорія систем; математичне моделювання; когнітивні аспекти; простір-структура; темна матерія.

УДК 303.732

Когнитивные проблемы математического моделирования в общей теории систем / Тихонов В.И., Тихонова Е.В. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2019. – № 13 (1338). – С. 137 – 154.

Работа посвящена исследованиям по общей теории систем. Приведен обзор тематических публикаций. Исследованы когнитивные аспекты математического моделирования систем. Рассмотрены вопросы "пространства-состояний" и "пространства-структуры" в тензорной модели открытой системы. Определена роль наблюдателя и механизм формализации "темной материи" в системном анализе. Ил.: 2. Библиогр.: 28 назв.

Ключевые слова: общая теория систем; математическое моделирование; когнитивные аспекты пространства-структуры; темная материя.

UDC 303.732

The math modeling cognitive issues of general system theory / Tikhonov V.I., Tykhonova O.V. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2019. – №.13 (1338). – P. 137 – 154.

The paper focuses researches on general system theory. Related publications surveyed. Cognitive aspects of system math modeling studied. The issues of "state-space" and "space-structure" discussed for model of open system. The role of observer and "dark matter" formalism determined in system analysis. Figs.: 2. Refs.: 28 titles.

Keywords: general system theory; math modeling; cognitive aspects; space-structure; dark matter.

УДК 681.5

DOI: 10.20998/2411-0558.2019.13.14

О. И. ШИРЯЕВА, канд. техн. наук, доц., КазННТУ им. К. Сатпаева, Алматы, Казахстан

Т. И. САМИГУЛИН, докторант, КазННТУ им. К. Сатпаева, Алматы, Казахстан

РАЗРАБОТКА ИСКУССТВЕННОЙ ИММУННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОМЕРНЫМ ОБЪЕКТОМ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

В данной работе представлены результаты применения Smart-технологий к синтезу сложных систем управления нефтегазовой отрасли. В частности, рассмотрена многомерная многосвязная (MIMO) система управления процессом перегонки газа через дистилляционную колонну с регулятором, настроенным на основе алгоритма клональной селекции CLONALG искусственных иммунных систем (AIS). Приведены результаты сравнительного анализа применения регуляторов, настроенных на основе других SMART-технологий: генетический алгоритм (GA), алгоритм оптимизации методом колонии муравьев (ACO). Ил.: 2. Табл.: 1. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: генетический алгоритм (GA); метод колонии муравьев (ACO); искусственные иммунные системы (AIS); алгоритм клональной селекции (CLONALG).

Постановка проблемы и анализ литературы. Проблема синтеза управлений многомерными многосвязными технологическими процессами в нефтегазовой отрасли является актуальной задачей. Перспективным направлением при проектировании MIMO-систем является применение биоинспирированных алгоритмов, эффективно использующихся при решении оптимизационных задач.

В настоящее время большое количество публикаций посвящено реализации нахождения оптимальных значений на основе биоинспирированных алгоритмов для одномерных (SISO) систем [1]. Широко используются генетические алгоритмы (GA), алгоритмы колонии муравьев (ACO), алгоритмы роя частиц (PSO), искусственные иммунные системы (AIS) [2 – 4]. Рассматриваемые алгоритмы имеют следующие отличительные особенности: высокая точность вычислений, быстродействие, возможность работы алгоритмов при отсутствии полноты информации об объекте управления.

Например, в исследованиях [2] рассматривается применение алгоритма колоний муравьев для оптимизации расположения проводки электрооборудования в зданиях, что позволяет сократить затраты на монтаж электрооборудования, контролировать падение напряжения и экономить финансовые затраты при строительстве.

В статье [3] представлена интеллектуальная система для оптимизации процесса обслуживания газотурбинных установок при помощи генетических алгоритмов. Исследован процесс технического обслуживания газовой турбины Siemens SGT600. Разработан оптимальный план обслуживания установки, позволяющий сократить время простоя оборудования, что снижает уровень общих затрат на 80%.

Гибридные алгоритмы, включающие в себя несколько технологий, позволяют получить более эффективные результаты. Например, в таких работах, как [4] рассматриваются вопросы управления производственными линиями на основе АСО и GA. Разработан новый подход для оптимизации параллельной сборки продукции и эксперименты доказывают, что применение предложенного алгоритма на основе АСО и GA позволяет находить более качественные решения.

Алгоритмы Smart-технологий в настоящее время широко используются для синтеза типовых регуляторов. В работе [5] исследовано влияние алгоритма роя частиц на оптимизацию параметров ПИД-регулятора в системе автоматического регулирования напряжения (AVR). Произведен сравнительный анализ с настройкой системы при помощи GA. Результаты показали, что система AVR, оптимизированная при помощи PSO обладает большей стабильностью и надежностью.

Особый интерес представляют алгоритмы настройки регуляторов на основе искусственных иммунных систем. В частности, алгоритм клональной селекции (CLONALG), применение которого для решения задач оптимизации и настройки регуляторов даёт более эффективные результаты, чем АСО и GA. В статье [6] результаты моделирования показывают, что алгоритм иммунной системы для настройки ПИД-регулятора имеет высокую точность решения и скорость сходимости.

Все вышеперечисленные алгоритмы представляют интерес в качестве развития их на класс многомерных многосвязных систем управления, в том числе управление процессами нефтегазовой отрасли [7].

Цель статьи. Для изолированных подсистем многомерной многосвязной системы управления процессом нефтегазовой отрасли – перегонки газа через дистилляционную колонну, необходимо синтезировать регулятор на основе биоинспирированных алгоритмов с целью достижения желаемой динамики.

Синтез ММО-системы управления на основе биоинспирированных алгоритмов.

В качестве объекта управления нефтегазовой отрасли рассмотрим процесс очистки газа в дистилляционной колонне. Дистилляционные

колонны состоят из нескольких компонентов [7], каждый из которых используется для передачи тепловой энергии или для увеличения массопереноса. Базовая дисцилляционная колонна состоит из: вертикального аппарата, содержащего тарелки или плиты, которые предназначены для усиления процесса разделения компонентов; ребойлера (котла для повторного нагрева) для обеспечения тепловой энергии с целью достижения необходимого испарения в нижней части колонны; конденсатора для охлаждения и конденсации пара из верхней части колонны; рефлексной емкости (сборника орошения колонны) для удержания конденсированного пара, с целью возврата жидкости обратно из верхней части колонны.

Большинство систем контроля процесса дистилляции, как обычных, так и современных предполагают, что колонна работает при постоянном давлении. Флуктуация давления делает контроль более гибким и обеспечивают его работоспособность. Структура L - V (L – скорость потока жидкости, V – скорость потока пара) может рассматриваться как стандартная структура управления для дистилляции с двойным контролем состава. В такой управляющей структуре скорость потока жидкости L и скорость потока пара V являются управляющими входами. Задача регулятора состоит в том, чтобы поддерживать желаемые концентрации продуктов χ_B, χ_D на выходе агрегата.

Линеаризованная модель объекта управления с уменьшенным порядком может быть представлена системой с двумя входами и двумя выходами:

$$\begin{vmatrix} \chi_D \\ \chi_B \end{vmatrix} = \frac{1}{1 + 1.9588s} \begin{vmatrix} 0.0042 & -0.0062 \\ -0.0052 & 0.0072 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} L \\ V \end{vmatrix}. \quad (1)$$

Постановка задачи формулируется следующим образом. На основании исходной модели объекта управления (1) необходимо разработать Smart-технологии для системы управления процессом очистки газа в дистилляционной колонне. В частности, рассчитать оптимальные параметры ПИД-регулятора с применением алгоритма клональной селекции искусственной иммунной системы с целью минимизации квадратичного интегрального критерия качества.

На рис. 1 представлена схема моделирования системы автоматического управления на базе алгоритма CLONALG для многосвязного процесса очистки газа в среде MATLAB. Блоки Decoupling-Gain являются элементами развязывающего контроллера. При полной развязке многомерная система разделяется таким образом, чтобы в системе больше не было перекрёстных взаимодействий.

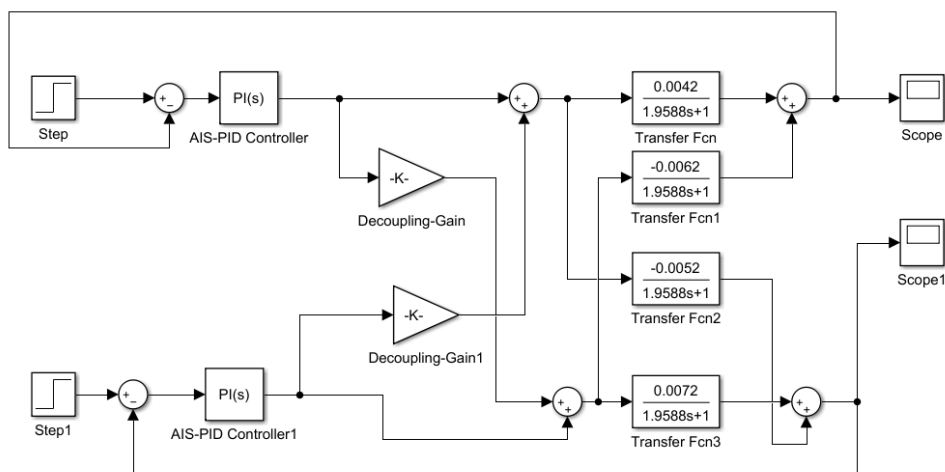


Рис. 1. Схема моделирования сложной системы управления процессом перегонки газа через дистилляционную колонну

Задача разделения системы была решена авторами в работе [8]. Такая система представляется в виде нескольких независимых подсистем, которые могут управляться с помощью одномерных методов и управление производится по двум независимым контурам.

Алгоритм CLONALG настройки ПИД-регуляторов представлен на рис. 2.

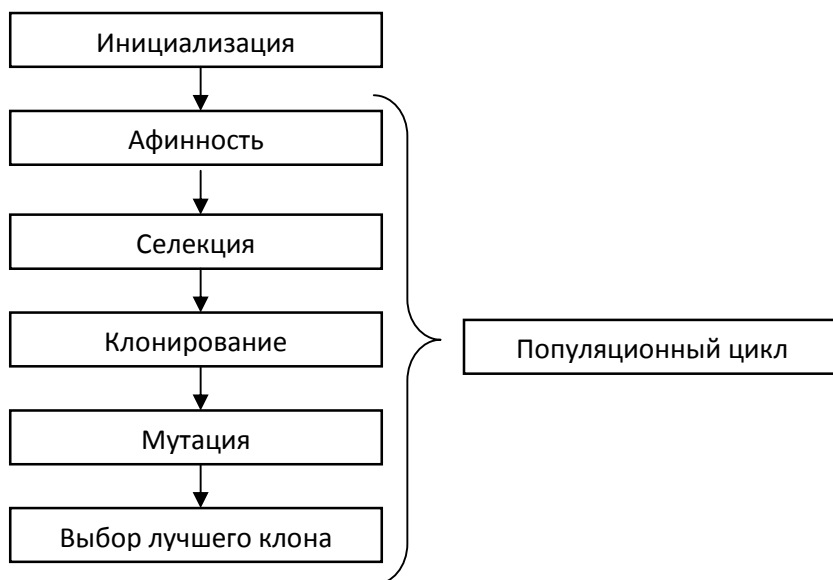


Рис. 2. Алгоритм клональной селекции синтеза ПИД-регуляторов подсистем

Концептуальной основой применения алгоритма CLONALG для технологических систем является теория иммунных систем с механизмами иммунного ответа организма на вторжение чужеродного антигена. При этом происходит распознавание антителами организма образов антигенов. В контексте постановки задачи для системы управления (1), обобщённая форма антител соответствует вектору аргументов, и представляет собой набор решений поставленной задачи; в качестве антигенов используется критерий качества [6].

В алгоритме CLONALG (рис. 2), на этапе инициализации проводится генерирование случайным образом начального множества возможных решений задачи, удовлетворяющих критерию качества. Следующим шагом алгоритма идёт выбор решений (антител) с лучшей аффинностью. В иммунологии, аффинность означает силу связывания между антителом и антигеном. При развитии теории иммунных систем на задачи оптимального управления системами, данная мера определяет, насколько соответствует решение значениям критерия качества и чем меньше расстояние между векторами, тем выше аффинность. Для получения результатов использования алгоритма CLONALG использовалось евклидово расстояние [6].

Следующие шаги алгоритма реализуют процедуры клонирования решений с высокой аффинностью, мутации и выбор решений с высокой аффинностью из популяции изменённых клонов.

Для обоснования эффективности применения алгоритма CLONALG проведён сравнительный анализ результатов моделирования изолированных подсистем управления многомерной многосвязной системы управления процессом перегонки газа через дистилляционную колонну с регуляторами, настроенными на основе Smart-технологий:

- на основе генетического алгоритма [9];
- на основе алгоритма оптимизации методом колонии муравьёв [10].

В ходе сравнения результатов применения алгоритмов были получены следующие оценки качества (таблица).

Из данных таблицы видно, что лучшие оценки качества такие, как время регулирования, перерегулирование и колебательность, получены в ходе применения алгоритма CLONALG. Этот алгоритм уступает алгоритмам GA и ACO только по величине установившейся ошибки.

Таблица

Сравнительный анализ биоинспирированных алгоритмов

Результаты моделирования:	Компонент	GA	ACO	CLONALG
1 – лучший результат;	Время регулирования	1	2	1
2 – средний результат;	Перерегулирование	2	1	1
3 – худший результат	Колебательность	2	1	1
	Установившаяся ошибка	2	1	3

Выводы. В результате проделанной работы получены результаты применения алгоритмов SMART-технологий для решения задач оптимального управления сложными системами нефтегазовой отрасли. Результаты моделирования с использованием различных алгоритмов SMART-технологий позволяют сделать вывод об эффективности использования алгоритма CLONALG искусственных иммунных систем. В перспективе планируется получить результаты применения алгоритмов искусственных иммунных систем для реализации процедуры развязывания ММО-систем.

Работа выполнена по гранту КН МОН РК по теме: "Разработка когнитивной Smart-технологии для интеллектуальных систем управления сложными объектами на основе подходов искусственного интеллекта" № AP05130018 (2018-2020 гг.).

Список литературы:

1. Бобиков А.И. Настройка весовых матриц ЗСУР регулятора с помощью биоинспирированных алгоритмов оптимизации / А.И. Бобиков. – Вестник РГРТУ. – 2016. – № 55. – С. 77-83.
2. Chinjiang L. Optimal design of high-rise building wiring based on ant colony optimization / L. Chinjiang. – Cluster Computing. – 2018. – P. 1-8.
3. Minian F. Gas turbine preventive maintenance optimization using genetic algorithm / F. Minian, H. Sabouhi, J. Hushmand, A. Hallaj, H. Khaledi, M. Mohammadpour. International Journal of System Assurance Engineering and Management. – Springer, 2016. – Vol. 8. – P. 594-601.
4. Changdar Ch. A genetic ant colony optimization based algorithm for solid multiple travelling salesman problem in fuzzy rough environment / Ch. Changdar, R.K. Pal, G.S. Mahapatra // Soft Computing. – Springer, 2017. – Vol. 21, Issue 16. – P. 4661-4675.
5. Wang J. The Application of the Particle Swarm Algorithm to Optimize PID Controller in the Automatic Voltage Regulation System / J. Wang, N. Song, E. Jiang, D. Xu., W. Deng, L. Mao. – Springer Singapore: Advanced Computational Methods in Energy, Power, Electric Vehicles and Their Integration. – 2017. – P. 529-536.
6. Castro L. The Clonal Selection Algorithm with Engineering Applications / L. Castro, F. Zuben. – Las Vegas, USA: Workshop on Artificial Immune Systems and Their Applications. In Workshop Proceedings of GECCO'00. – 2000. – P. 36-37.

7. Minh V.T. Modeling and control of distillation column in a petroleum process / V.T. Minh, A.A. Rani. – Perak.: Hindawi Publishing Corporation. Mathematical problems in engineering. – 2009. – 14 p.
8. Ширяева О.И. Разработка smart-системы управления сложным объектом нефтегазовой отрасли с использованием процедуры развязывания / О.И. Ширяева, Т.И. Самигулин. – Алматы: Вестник КазНУ. – 2017. – № 5. – С. 50-55.
9. Самигулин Т.И. Программное обеспечение Genetic Regulator для решения задач управления сложными объектами / Т.И. Самигулин, О.И. Ширяева, З.И. Самигулина, Г.А. Самигулина. – Астана: Свидетельство о государственной регистрации прав на объект авторского права (на программу ЭВМ). – 2016. – № 005733. – 25 с.
10. Самигулина Г.А. Разработка Smart-технологии для управления сложным объектом с использованием алгоритма муравьиной колонии / Г.А. Самигулина, Т.И. Самигулин. – Алматы: Вестник АУЭС. – 2019. – 92-99 с.

References:

1. Bobikov, A.I. (2016), "Adjustment of the weight matrices of the regulator SURSD using bioinspired optimization algorithms", *Bulletin RGRU*, No. 55, pp. 77-83.
2. Chinjiang, L. (2018), "Optimal design of high-rise building wiring based on ant colony optimization", *Cluster Computing*, pp. 1-8.
3. Minian, F., Sabouhi, H., Hushmand, J., Hallaj, A., Khaledi, H., and Mohammadpour M. (2016), "Gas turbine preventive maintenance optimization using genetic algorithm", *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, Springer, vol. 8, pp. 594-601.
4. Changdar, Ch., Pal R.K., and Mahapatra, G.S. (2017), "A genetic ant colony optimization based algorithm for solid multiple travelling salesman problem in fuzzy rough environment", *Soft Computing*, Springer, vol. 21, Issue 16, pp. 4661-4675.
5. Wang, J., Song, N., Jiang, E., Xu, D., Deng, W., and Mao, L. (2017), "The Application of the Particle Swarm Algorithm to Optimize PID Controller in the Automatic Voltage Regulation System", *Springer Singapore: Advanced Computational Methods in Energy, Power, Electric Vehicles and Their Integration*, pp. 529-536.
6. Castro L., and Zuben, F. (2000), "The Clonal Selection Algorithm with Engineering Applications", *Las Vegas, USA: Workshop on Artificial Immune Systems and Their Applications. In Workshop Proceedings of GECCO'00*, pp. 36-37.
7. Minh, V.T., and Rani, A.A. (2009), "Modeling and control of distillation column in a petroleum process", *Perak.: Hindawi Publishing Corporation. Mathematical problems in engineering*, 14 p.
8. Shiryayeva, O.I., and Samigulin, T.I. (2017), "Development of a SMART control system for MIMO oil and gas industries using decoupling procedures", *Almaty: Bulletin KazNITU*, No. 5, pp. 50-55.
9. Samigulin, T.I., Shiryayeva, O.I., and Samigulina, G.A. (2016), *Software Genetic Controller for solving MIMO objects management tasks*, Astana: Certificate of state registration of rights to the object of copyright (computer program), № 005733, 25 p.
10. Samigulina, G.A., and Samigulin, T.I. (2019), "Development of Smart-technology for managing a complex object using the ant colony algorithm", *Almaty: Bulletin AUES*, pp. 92-99.

Статью представил д-р техн. наук, проф. НТУ "ХПИ" Леонов С.Ю.

Поступила (received) 07.05.2019

Shiryayeva Olga, Cand.Sci.Tech, Assotiate Professor
Satbayev Kazakh National Research Technical University
Str. Satpayev, 22 A, Almaty, Kazakhstan, 050013
Tel: +8(727)2929952, e-mail: o.shiryayeva@satbayev.university
ORCID ID: 0000-0003-2532-0636

Samigulin Timur, doctoral student
Satbayev Kazakh National Research Technical University
Str. Satpayev, 22 A, Almaty, Kazakhstan, 050013
Tel:+8(727)2929952, e-mail: timur.samigulin@yandex.kz
ORCID ID: 0000-0001-9963-6719

УДК 681.5

Розробка штучної імунної системи управління багатовимірним об'єктом нафтогазової галузі / Ширяєва О.І., Самігулін Т.І. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2019. – № 13 (1338). – С. 155 – 163.

У даній роботі представлені результати застосування Smart-технологій до синтезу складних систем управління нафтогазової галузі. Зокрема, розглянуто багатовимірну багатозв'язна (MIMO) система управління процесом перегонки газу через дистиляційну колону з регулятором, настроєним на основі алгоритму клональної селекції CLONALG штучних імунних систем (AIS). Наведено результати порівняльного аналізу застосування регуляторів, налаштованих на основі інших SMART-технологій: генетичний алгоритм (GA), алгоритм оптимізації методом колонії мурах (ACO). Іл.: 2. Табл.: 1. Бібліогр.: 10 назв.

Ключевые слова: генетический алгоритм (GA); метод колонии муравьев (ACO); искусственные иммунные системы (AIS); алгоритм клональной селекции (CLONALG).

УДК 681.5

Разработка искусственной иммунной системы управления многомерным объектом нефтегазовой отрасли / Ширяева О.И., Самигулин Т.И. // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2019. – № 13 (1338). – С. 155 – 163.

В данной работе представлены результаты применения Smart-технологий к синтезу сложных систем управления нефтегазовой отрасли. В частности, рассмотрена многомерная многосвязная (MIMO) система управления процессом перегонки газа через дистиляционную колонну с регулятором, настроенным на основе алгоритма клональной селекции CLONALG искусственных иммунных систем (AIS). Приведены результаты сравнительного анализа применения регуляторов, настроенных на основе других SMART-технологий: генетический алгоритм (GA), алгоритм оптимизации методом колонии муравьев (ACO). Ил.: 2. Табл.: 1. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: генетический алгоритм (GA); метод колонии муравьев (ACO); искусственные иммунные системы (AIS); алгоритм клональной селекции (CLONALG).

UDC 681.5

Development of an artificial immune MIMO-system for plant of the oil and gas industry / Shiryayeva O.I., Samigulin T.I. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2019. – №.13 (1338). – P. 155 – 163.

The results of applying Smart-technologies to the synthesis of MIMO-systems in the oil and gas industry are considered. In particular, a MIMO-system for controlling the process of gas distillation through a distillation column with a controller set up based on the clonal selection algorithm, CLONALG, artificial immune systems (AIS) is considered. The results of a comparative analysis of the use of controllers configured on the basis of other SMART-technologies are presented: the genetic algorithm (GA), the optimization algorithm of the ant colony method (ACO). Figs.: 2. Tabl.: 1. Refs.: 10 titles.

Keywords: genetic algorithm (GA), and colony method (ACO); artificial immune systems (AIS); clonal selection algorithm (CLONALG).

УДК 004.9:612

DOI: 10.20998/2411-0558.2019.13.15

О. М. ДАЦОК, канд. техн. наук, доц. каф. БМІ ХНУРЕ, Харків,

І. В. ПРАСОЛ, д-р техн. наук, проф. каф. БМІ ХНУРЕ, Харків,

О. А. ЄРОШЕНКО, лаборант каф. БМІ ХНУРЕ, Харків

ПОБУДОВА БІОТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ М'ЯЗОВОЇ ЕЛЕКТРОСТИМУЛЯЦІЇ

Розглянуті особливості побудови біотехнічної системи електростимуляції м'язів людини під дією стимулюючих сигналів різної скорочувальної здатності з урахуванням індивідуального стану нервово-м'язового апарату людини. Система дозволяє здійснювати безперервний контроль ефективності проведення терапевтичних процедур за рахунок реєстрації сигналу електроміограми поверхневими електродами та узгодження параметрів сигналу електростимуляції з характеристиками стимульованої мускулатури. Іл.: 3. Бібліогр.: 16 назв.

Ключові слова: електростимуляція; електроміограма; нервово-м'язовий апарат; терапевтична процедура; параметри сигналу; поверхневі електроди.

Постановка проблеми. Процедури електричного масажу широко застосовуються для профілактики захворювань, підвищення ефективності результатів тренувань у спортсменів, а також при різних способах лікування і відновлення організму. Вони виконуються за допомогою спеціальних апаратів, які здійснюють електричний імпульсний вплив на м'язові структури людини.

Параметри стимулюючого впливу не завжди оптимально відповідають конкретному пацієнту або обраній ділянці тіла, що призводить до недостатньої ефективності терапевтичних процедур, подовження термінів реабілітації. Усунення недоліків можливе внаслідок коригування параметрів електричних стимулів залежно від даних міографічних досліджень конкретного пацієнта.

Аналіз літератури. У дослідженні [1] показано, що електрична та/або електромеханічна стимуляція відіграють значну роль в регенерації функціональних можливостей в м'яких тканинах, таких як сухожилля, м'язи і нерви.

В роботі [2] пояснюється, як електрична стимуляція може впливати на об'єм та розмір м'язів, м'язовий тонус, м'язову атрофію і м'язову силу. Розглядається різновиди електричної стимуляції (ES) – нейром'язова електрична стимуляція (NMES) та крізьшкірна електрична стимуляція (TES), коли електричний струм застосовується для стимуляції нервів або нервових закінчень, які іннервують м'язи під шкірою. Електрична

стимуляція може проводитися поверхнево на шкіру (крізьшкірно) або безпосередньо в м'яз або м'язи (внутрішньом'язово). Якщо периферичний нерв можна стимулювати, отриманий імпульс збудження буде передаватися нервом на кінцеві пластини м'язового волокна, що призводить до скорочення м'язів. Аналізується вплив простої електричної стимуляції на м'язову масу і міцність.

У дослідженні [3] показано, що слабкість скелетних м'язів є помітною особливістю у пацієнтів з ревматоїдним артритом (РА). Автори досліджували, чи є тренування за допомогою нервово-м'язової електростимуляції (NMES) захистом від дисфункції скелетних м'язів. Отримані дані свідчать про те, що оптимізація параметрів NMES запобігає м'язовій слабкості при певних видах артритів і може бути ефективним методом лікування дисфункції м'язів у пацієнтів з РА.

Фізіологічні основи адаптивної електром'язової стимуляції.

Електростимуляція (ЕС) скелетних м'язів, які є основою опорно-рухового апарату людини, дає позитивний лікувальний, профілактичний і тренувальний ефекти. ЕС призводить не тільки до збудження нервово-м'язових структур, але й впливає на трофічні процеси в м'язі і в усьому організмі, що обумовлює неспецифічне посилення основних функцій єдиного організму [4].

В основі дослідження м'язів лежить визначення параметрів потенціалів окремих рухових одиниць, що є функціональним елементом кожного скелетного м'яза. Основними параметрами потенціалів рухових одиниць (ПРО) є їх тривалість і амплітуда [5].

Стимуляція м'язової тканини проводиться за допомогою спрямованого збудження і скорочення певної групи м'язів, причому здійснюється це одночасно, щоб посилити обмінно-трофічні процеси, які спрямовані на забезпечення роботи м'язів енергетичним запасом.

Електрична стимуляція успішно поєднується з традиційною лікарською терапією, а в ряді випадків дозволяє домогтися лікувального ефекту там, де інші методи лікування не дають результату. Методи ЕС, що застосовуються в медицині, залежать від конкретного об'єкта впливу.

Залежно від амплітуди сигналів і порога збудження нервово-м'язової структури, що стимулюється розрізняють підпороговий режим електростимуляції, пороговий і надпороговий [6].

Підпороговий режим впливу не викликає скорочення м'яза, який реєструється візуально або за допомогою датчиків. Пороговий режим це такий вплив, при якому відбувається ледь реєстроване скорочення стимульованого м'язу. Надпороговий режим – це вплив, при якому скорочення м'язу, що стимулюється, більше порогового, з різним ступенем вираженості. Безпосередній вплив на нервово-м'язові структури

виявляється сильнішим, чітко виражений еферентний вплив на всі рівні рухового аналізатора і цілісний організм. Викликане максимальне скорочення м'яза може підтримуватися довше і повторюватися більшу кількість разів, ніж при довільних зусиллях. У порівнянні зі звичайним тренуванням електростимуляція нервово-м'язового апарату має певні переваги [6]. Для реалізації адаптивної електром'язової стимуляції необхідно використовувати пороговий режим.

Важливою властивістю нервово-м'язових структур при подразненні електричними сигналами є залежність збуджуваності від швидкості зміни амплітуди стимулюючого сигналу [7].

Електростимуляція збільшує кровотік в м'язах, надає болезаспокійливу і протизапальну дію, попереджає виникнення атрофії від бездіяльності, уповільнює її розвиток при денервації, знижує тонус при наявності спастичності, покращує регенерацію нервів.

Під час проведення ЕС варто враховувати особливості процесів, пов'язаних зі зміною міжелектродного опору. Опір шкіри і підшкірних тканин суттєво розрізняються. Ділянки м'язової тканини, що знаходиться під біполярними електродами, умовно можна вважати гомогенними, проте різні органи і частини тіла не можна характеризувати однаковими значеннями питомого опору, так як між далеко розташованими електродами виявляються різномірні тканини і органи. Доцільним є біполярне накладення пари електродів одного каналу електростимулятора на м'яз, що стимулюється, і небажано (навіть неприпустимо) їх рознесення на різні групи м'язів і тим більше на одноім'язи протилежної сторони тіла.

Опір міжелектродного кола залежить від сили струму, характер залежності відповідає розчину електроліта – чим менше щільність струму, тим більше опір кола.

Таким чином, при проведенні ЕС нервово-м'язового апарату важливий раціональний вибір її режимів і поєднання тонічних і кінетичних скорочень; це суттєво впливає на збільшення маси, розвиток сили, підвищення збудливості і працездатності м'язів.

Мета статті – теоретичний аналіз можливості регулювання параметрів впливу під час проведення процедур електростимуляції м'язів залежно від даних міографічних досліджень пацієнта; розробка структурної схеми біотехнічної системи адаптивної електром'язової стимуляції, формування основних медичних та технічних вимог щодо такої системи.

Спосіб формування сигналу зворотного зв'язку. Для якісної і кількісної оцінки стану нервово-м'язового апарату людини за допомогою

електроміограми (ЕМГ) може бути використаний інформаційний метод частотно-часового аналізу на основі спектрограм.

Сумарна електроміографія є визнаним методом дослідження нервово-м'язової системи, оснований на реєстрації і якісно-кількісному аналізі сумарної біоелектричної активності сукупності рухових одиниць за допомогою нашкірних електродів. Параметри ЕМГ сигналу, що реєструється, служать об'єктивним діагностичним показником функціонального стану м'язових груп [8], [9].

Якісний аналіз структури нестационарного за своєю природою ЕМГ-сигналу і динаміки його параметрів в процесі м'язового скорочення виконується на основі спектрограми, що реалізує графічну візуалізацію амплітудної, частотної та часової складових біомедичного сигналу в реальному режимі часу. Отже, параметри стимулюючих впливів можуть бути підібрані на основі даних ЕМГ-сигналу, що дозволяє реалізувати систему для проведення індивідуальних терапевтичних процедур [10].

Перспективним підходом при цьому є застосування біотехнічного зворотного зв'язку. Контуром біотехнічного зворотного зв'язку передаються електричні параметри, що характеризують біологічний стан об'єкта. На основі цієї інформації відповідно до цільової функції проводиться автоматичне керування параметрами сигналу впливу. Таким чином, здійснюється узгодження параметрів біооб'єкту і технічних компонентів системи, вироблення оптимального лікувального впливу [11].

Розглянемо особливості ЕМГ-сигналу для окремих груп м'язів людини під час виконання фіксованих за інтенсивністю фізичних вправ. На рис. 1 наведено ЕМГ-сигнал тренованого м'язу *m. biceps brachii* в нормі.

ЕМГ-сигнал знімали з двоголового м'яза плеча. Анатомічне розташування м'язів показано на рис. 2, а [12], місця розташування електродів виділено на рис. 2, б. Для запису ЕМГ-сигналу виконувался рух згинання та розгинання руки. Визначення середньої амплітуди ЕМГ-сигналу здійснюється за формулу:

$$A_{cp} = (\sum_{i=1}^N |A_i|) / N, \quad (1)$$

де A_i – амплітуда i -го відліку зареєстрованого сигналу, N – число відліків сигналу.

Середні значення амплітуди ЕМГ-сигналу для тренованих і нетренованих м'язів *m. biceps brachii* становлять:

– середня амплітуда ЕМГ-сигналу для тренованих м'язів дорівнює $345,62 \pm 148,10$ мкВ,

– середня амплітуда ЕМГ-сигналу для нетренованих м'язів дорівнює $189,27 \pm 84,00$ мкВ.

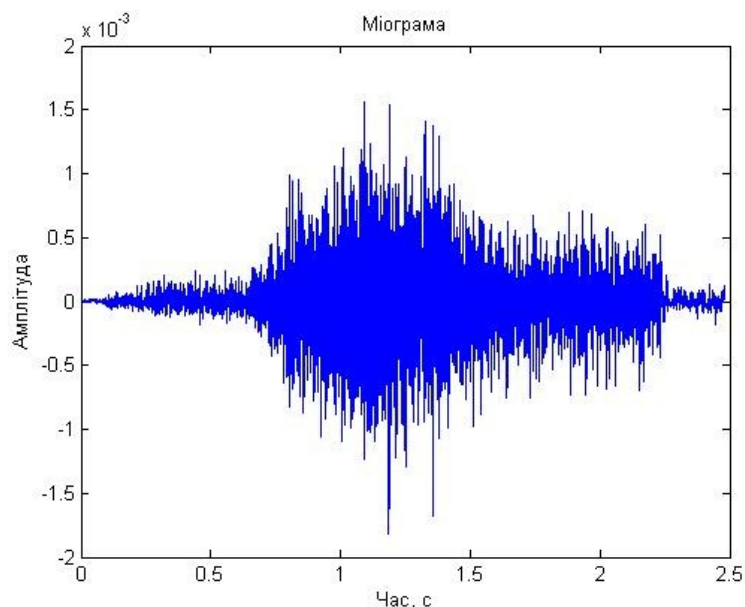
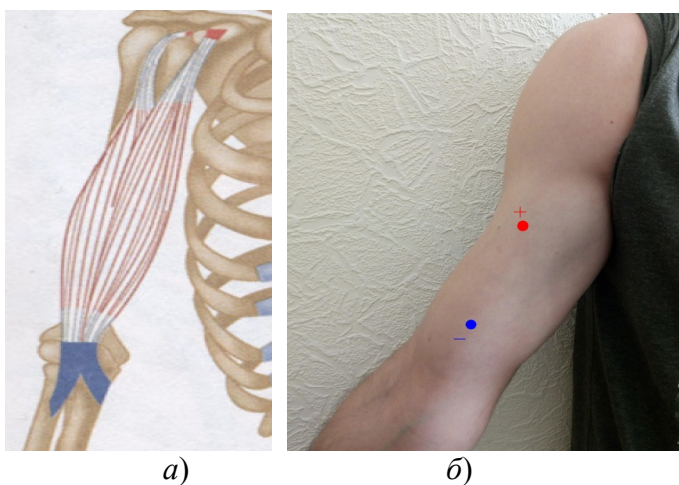


Рис. 1. ЕМГ-сигнал тренованого м'язу *m. biceps brachii*



а) б)

Рис. 2. Двоголовий м'яз плеча,
а – анатомічне розташування двоголового м'яза плеча, б – місце розташування електродів

Таким чином, значення середньої амплітуди окремої групи м'язів пацієнта може слугувати сигналом зворотного зв'язку в системі для проведення індивідуальних процедур ЕС.

Структура біотехнічної системи адаптивної м'язової електростимуляції. З метою підвищення ефективності терапевтичних процедур пропонується структура біотехнічної системи (рис. 3), яка реалізує спосіб формування параметрів впливу міоелектростимуляції пацієнта залежно від поточного стану м'язів.

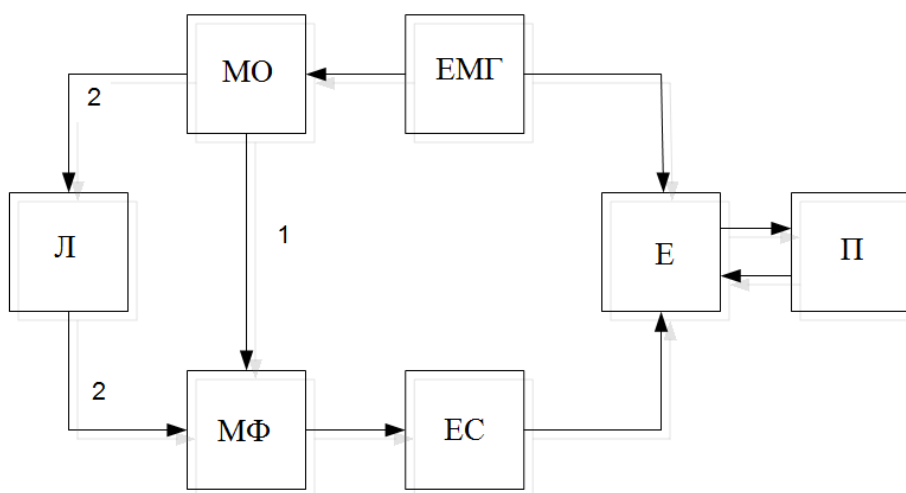


Рис. 3. Структурна схема біотехнічної системи адаптивної м'язової електростимуляції

Л – особа, що приймає рішення (ОПР), лікар; ЕМГ – модуль реєстрації електроміограми; МО – модуль обробки результатів ЕМГ;

ЕС – електростимулятор; МФ – модуль формування параметрів впливу; Е – електродна система; П – пацієнт

Мікропроцесорний електростимулятор (ЕС) формує послідовність електричних імпульсів із заданими параметрами. Електродна система (Е) забезпечує, по-перше, передачу імпульсів на нервові закінчення, що призводить до активного скорочення м'язів, по-друге, реєстрацію сигналів ЕМГ. Модуль (МО) визначає основні параметри ЕМГ, що дозволяє здійснювати автоматичне коригування параметрів стимуляції (коло зворотного зв'язку 1). В системі передбачена можливість попереднього налаштування, зміни та коригування параметрів стимуляції безпосередньо особою, яка приймає рішення (Л) (коло зворотного зв'язку 2). Додаткове коло зворотного зв'язку необхідно, насамперед, у випадках, коли зміна параметрів стимуляції здійснюється внаслідок змін стану пацієнта, що не вимірюються інструментально (почервоніння шкіри, больові відчуття тощо).

Запропонована БТС забезпечує можливість обліку індивідуальних особливостей пацієнтів і вибору форми і параметрів стимулюючих впливів, оптимальних в певному сенсі, для впливу на нейром'язові структури з метою досягнення позитивного терапевтичного і тренувального ефекту.

Медичні та технічні вимоги щодо окремих елементів БТС адаптивної електростимуляції. Для підтримання сталих характеристик ЕМГ-сигналу необхідно здійснювати правильне позиціонування електродів на поверхні шкіри. Для отримання максимальної амплітуди сигналу електроди накладаються на так звані рухові точки. Розташування цих точок достатньо добре відомо. Для отримання стабільного контакту електрод-шкіра і зменшення імпедансу шкірного покриву, місце накладення електродів необхідно належним чином підготувати [13].

Необхідно використовувати електроди з матеріалів, які б забезпечували стабільний контакт шкіра-електрод протягом довгого часу, а також були мало схильні до ефектів поляризації. У цьому випадку доцільно використовувати електроди з срібла, хлорсрібні електроди, або з золота [14].

Геометрія електродів впливає на амплітуду сигналу, що знімається, а також на рівень перехресних перешкод. Основними параметрами є міжелектродна відстань і площа поверхні, зайнята електродом. Амплітуда сигналу буде прямо пропорційна міжелектродній відстані, в той час як смуга пропускання зі збільшенням цієї відстані буде зменшуватися. Оптимальною є відстань в межах 8 – 30 мм [15]. Збільшення площі поверхні електродів веде до збільшення амплітуди одержуваного сигналу, однак зі збільшенням амплітуди різко зростає вплив сусідніх м'язів, що створює перехресні перешкоди в корисному сигналі.

Аналіз залежності амплітуди ЕМГ-сигналу від відстані між електродами прямокутної форми з шириною 1 – 2 мм і довжиною 10 мм дозволяє вважати, що в розглянутому інтервалі м'язове волокно можна вважати однорідним провідником [16].

Для процедури електростимуляції застосовуються електроди у вигляді металевих пластин, які накладаються через серветку, змочену в спеціальному розчині. Електроди на клейовий основі зручні тим, що з ними можна вільно пересуватися, а їх недоліком є швидке забруднення. Оптимальними для процедури адаптивної ЕС є багаторазові електроди з струмопровідною вуглецевою тканиною, що призначені для роботи з усіма типами електрофізіотерапевтичних апаратів.

Висновки. Таким чином, запропонована структура біотехнічної системи електростимуляції м'язів опорно-рухового апарату людини зі

зворотним зв'язком на основі реєстрації поверхневими електродами сигналу ЕМГ пацієнта і подальшої його обробки дозволяє здійснити поточний контроль ефективності терапевтичних впливів за рахунок оптимального підбору параметрів стимулюючих впливів. На прикладі окремої групи м'язів визначений розкид усереднених значень амплітуди ЕМГ-сигналу під час скорочень для тренуваних і нетренуваних м'язів, що може бути підґрунтям для розробки алгоритмів керування параметрами ЕС та критерієм ефективності терапевтичної процедури. Такі пристрої можуть знайти широке застосування в практиці підготовки спортсменів, для оздоровчих процедур, а також в реабілітаційних центрах.

Список літератури:

1. Hoop M. Ultrasound-mediated piezoelectric differentiation of neuron-like PC12 cells on PVDF membranes / M. Hoop, X. Chen, A. Ferrari, F. Mushtaq, G. Ghazaryan, T. Tervoort, D. Poulikakos, B. S. Nelson, Pané // Scientific Reports 7. – 2017. – Article number: 4028.
2. Azman M.F. The Effect of Electrical Stimulation in Improving Muscle Tone (Clinical) / M.F. Azman, A.W. Azman // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2017.
3. Himori K. Neuromuscular electrical stimulation prevents skeletal muscle dysfunction in adjuvant-induced arthritis rat / K. Himori, D. Tatebayashi, K. Kanzaki, M. Wada, H. Westerblad, J.T. Lanner // PLoS ONE. – 2017. – Vol. 12 (6).
4. Ерошенко О.А. О построении системы мышечной электростимуляции для курсантов / О.А. Ерошенко, И.В. Прасол, В.В. Семенец // Застосування інформаційних технологій у підготовці та діяльності сил охорони правопорядку: Матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. – 2018. – Харків: НАНГУ. – С. 120-122.
5. Никитин С.С. Электромиографические стадии денервационно-реиннервационного процесса при нервно-мышечных болезнях: необходимость ревизии / С.С. Никитин // Нервно-мышечные болезни. – Москва. – 2015. – № 2. – С. 16-24.
6. Колесников Г.Ф. Электростимуляция нервномышечного аппарата / Г.Ф. Колесников. – Ленинград: Здоровье, 1977.
7. Ерошенко О.А. Информационные технологии определения параметров стимулов систем электромиостимуляции / О.А. Ерошенко, И.В. Прасол // Застосування інформаційних технологій у підготовці та діяльності сил охорони правопорядку: Матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. – Харків: НАНГУ, 2018. – С. 122-124.
8. Меженная М.М. Метод частотно-временного анализа суммарной электромиограммы в оценке функционального состояния нервно-мышечного аппарата человека / М.М. Меженная, А.Н. Осипов // Проблемы физики, математики и техники. – Минск: БГУИР, 2012. – № 1. – С. 105-112.
9. Меженная М.М. Частотно-временной анализ суммарной электромиограммы в качественной и количественной оценке функционального состояния нервно-мышечного аппарата человека / М.М. Меженная // Биомедицинская радиоэлектроника. – Минск: БГУИР, 2012. – № 2. – С. 3-11.
10. Прасол И.В. Индивидуальный электромассажный терапевтический аппарат / И.В. Прасол, О.А. Ерошенко // 6-й Международный радиоэлектронный форум "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития". – МРФ-2017. Конференция "Проблемы биомедицинской инженерии. Наука и технологии". Сборник научных трудов. – Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ. – Издательство "Точка", 2017. – С. 43-44.

11. Осипов А.Н. Сложная биотехническая обратная связь в системах электростимуляции / А.Н. Осипов, С.К. Дик, К.Г. Сеньковский. // Медицинская техника. – Москва. – 2002. – № 6. – С. 27-29.
12. Джерми К. Атлас скелетно-мышечной анатомии / К. Джерми // Издательство АСТ. 2008. – 382 с.
13. Luca De C.J. The use of surface electromyography in biomechanics / C.J. Luca De // Journal of Applied Biomechanics. – 1997. – Vol. 13 (2).
14. Сафин Д.Р. Оценка эффективности различных конструкций электродов и усилителей биосигналов в системах управления протезами / Д.Р. Сафин, И.С. Пильщиков, М.А. Ураксеев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – Пенза: ГОУ ВПО "ПГУ". – 2009. – № 2 (10). – С. 88-101.
15. Roy S.H. Electro-Mechanical stability of surface EMG sensors / S.H. Roy, G. Luca De, S. Cheng, A. Johansson, L.D. Gilmore, C.J. Luca De // Medical and biological engineering and computing. – 2007. – Vol. 45.
16. Осипов А.Н. Влияние межэлектродного расстояния на энергетические характеристики электромиограмм / А.Н. Осипов, В.М. Бондарик, Д.Ф. Кузнецов // Международная научно-техническая конференция, приуроченная к 50-летию МРТИ-БГУИР (Минск, 18-19 марта 2014 года): материалы конф. в 2 ч. Ч. 2. – Минск: БГУИР, 2014. – С. 115-116.

References:

1. Hoop, M., Chen, X., Ferrari, A., Mushtaq, F., Ghazaryan, G., Tervoort, T., Poulikakos, D., Nelson, B. and Pané, S. (2017), "Ultrasound-mediated piezoelectric differentiation of neuron-like PC12 cells on PVDF membranes", *Scientific Reports* 7, Article number: 4028.
2. Azman, M.F. and Azman, A.W. (2017), "The Effect of Electrical Stimulation in Improving Muscle Tone (Clinical)", *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*.
3. Himori, K., Tatebayashi, D., Kanzaki, K., Wada, M., Westerblad, H., Lanner, J.T., et al. (2017), "Neuromuscular electrical stimulation prevents skeletal muscle dysfunction in adjuvant-induced arthritis rat", *PLoS ONE*, Vol. 12 (6).
4. Yeroshenko, O.A., Prasol, I.V., and Semenets, V.V. (2018), "On building a system of muscle electrostimulation for students", *Application of information technologies in the preparation and operation of law enforcement forces*, Kharkiv, pp. 120-122.
5. Nikitin, S.S. (2015), "Electromyographic stages of the denervation-reinnervation process in neuromuscular diseases: the need for revision", *Neuromuscular disease*, Moscow, No. 2, pp. 16-24.
6. Kolesnikov, G.F. (1977), *Electrical stimulation of the neuromuscular apparatus*, Health, Leningrad.
7. Yeroshenko, O.A., and Prasol, I.V. (2018), "Information technologies for determining parameters of stimuli of electromyostimulation systems", *Application of information technologies in the preparation and operation of law enforcement forces*, Kharkiv, Materials International sci. pract. conf, pp. 122-124.
8. Mezhen, M.M., and Osipov, A.N. (2012), "The method of time-frequency analysis of total electromyogram in assessing the functional state of the human neuromuscular apparatus", *Problems of physics, mathematics and technology*, Minsk, BSUUR, pp. 105-112.
9. Mezhen, M.M. (2012), "Time-frequency analysis of the total electromyogram in the qualitative and quantitative assessment of the functional state of the human neuromuscular apparatus", *Biomedical electronics*, Minsk, BSUUR, No. 2, pp. 3-11.
10. Prasol, I.V., Yeroshenko, O.A. (2017), "Individual electromassage therapeutic apparatus", *The 6th International Radioelectronic Forum "Applied Radioelectronics. State and development prospects"*, Publisher "Tochka", Kharkiv, pp. 43-44.

-
11. Osipov, A.N., Dick, S.K., Senkovsky, K.G. (2002), "Complicated biotechnical feedback in electrostimulation systems", *Medical equipment*, Moscow, No. 6, pp. 27-29.
 12. Jermi, K. (2008), *Atlas of musculoskeletal anatomy*, AST, 382 p.
 13. Luca De, C.J. (1997), "The use of surface electromyography in biomechanics", *Journal of Applied Biomechanics*, Vol. 13 (2).
 14. Safin, D.R., Sawers, and I.S., Urakseev, M.A. (2009), "Evaluation of the effectiveness of various designs of electrodes and biosignal amplifiers in prosthetic control systems", *Proceedings of higher educational institutions. Volga region. Technical science*, Penza, pp. 88-101.
 15. Roy, S.H., Luca De, G., Cheng, S., Johansson, A., Gilmore, L.D. and Luca De, C.J. (2007), "Electro-Mechanical stability of surface EMG sensors". *Medical and biological engineering and computing*, Vol. 45.
 16. Osipov, A.N., Bondarik, V.M., and Kuznetsov, D.F. (2014), "Influence of interelectrode distance on the energy characteristics of electromyograms", *International Scientific and Technical Conference dedicated to the 50th anniversary of MRTI-BSUIR*, Conferences materials in 2 Parts. Part 2, Minsk, pp. 115-116.

Статтю представив д-р фіз-мат. наук, проф. ХНУРЕ Бих А.І.

Надійшла (received) 30.04.2019

Datsok Oleh, Cand.Sc.Tech, Associate Professor
Kharkiv National University of Radio Electronics
Nauky Ave. 14, Kharkiv, Ukraine, 61166
Tel: (057) 7021-364, e-mail: oleh.datsok@nure.ua
ORCID ID: 0000-0003-4489-3819

Prasol Igor, Dr.Sc.Tech, Professor
Kharkiv National University of Radio Electronics
Nauky Ave. 14, Kharkiv, Ukraine, 61166
Tel: (057) 7021-364, e-mail: igor.prasol@nure.ua
ORCID ID: 0000-0003-2537-7376

Yeroshenko Olha, Laboratory assistant
Kharkiv National University of Radio Electronics
Nauky Ave. 14, Kharkiv, Ukraine, 61166
Tel: (057) 7021-364, e-mail: olha.yeroshenko@gmail.com
ORCID ID: 0000-0001-6221-7158

УДК 004.9:612

Побудова біотехнічної системи м'язової електростимуляції / Дацок О.М., Прасол І.В., Єрошенко О.А. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2019. – № 13 (1338). – С. 165 – 175.

Розглянуто особливості побудови біотехнічної системи електростимуляції м'язів людини під дією стимулюючих сигналів різної скорочувальної здатності з урахуванням індивідуального стану нервово-м'язового апарату людини. Система дозволяє здійснювати безперервний контроль ефективності проведення терапевтичних процедур за рахунок реєстрації сигналу електроміограми поверхневими електродами та узгодження параметрів сигналу електроміостимуляції з характеристиками стимульованої мускулатури. Ил.: 3. Бібліогр.: 16 назв.

Ключові слова: електроміостимуляція; електроміограма; нервово-м'язовий апарат; терапевтична процедура; параметри сигналу; поверхневі електроди.

УДК 004.9:612

Построение биотехнической системы мышечной электростимуляции / Дацок О.М., Прасол И.В., Єрошенко О.А. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2019. – № 13 (1338). – С. 165 – 175

Рассмотрены особенности построения биотехнической системы электростимуляции мышц человека при воздействии стимулирующими сигналами различной сократительной способности с учетом индивидуального состояния нервно-мышечного аппарата человека. Система позволяет осуществлять непрерывный контроль эффективности проведения терапевтических процедур за счет регистрации сигнала электромиограммы поверхностными электродами и согласовывать параметры сигнала электромиостимуляции с характеристиками стимулируемой мышцы. Ил.: 3. Библиогр.: 16 назв.

Ключевые слова: электромиостимуляция; электромиограммы; нервно-мышечный аппарат; терапевтическая процедура; параметры сигнала; поверхностные электроды.

UDC 004.9:612

Construction of biotechnical system of muscular electrical stimulation / Datsok O.M., Prasol I.V., Yeroshenko O.A. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2019. – № 13 (1338). – P. 165 – 175.

The features of the construction of the biotechnical system of human muscle stimulation when exposed to stimulating signals of various contractility taking into account the individual state of the human neuromuscular apparatus. System allows continuous monitoring of the effectiveness of therapeutic procedures by recording the electromyogram signal with surface electrodes and matching the parameters of the electromyostimulation signal with the characteristics of the muscle being stimulated. Figs.: 3. Refs.: 16 titles.

Keywords: electrical stimulation; electromyogram; neuromuscular apparatus; therapeutic procedure; parameters of the electromyostimulation signal; surface electrodes.

УДК 004.89:004.4

DOI: 10.20998/2411-0558.2019.13.16

Г. А. САМИГУЛИНА, д-р техн. наук, зав. лаб. "Интеллектуальные системы управления и прогнозирования", Институт информационных и вычислительных технологий, Алматы, Казахстан,

З. И. САМИГУЛИНА, ассоц. проф., Ph.D, Казахстанско-Британский Технический Университет, Алматы, Казахстан

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ МОЛЕКУЛЯРНОГО ДИЗАЙНА ЛЕКАРСТВЕННЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ОСНОВЕ МОДЕЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА

Статья посвящена разработке информационной системы ведения научных исследований на базе модельно-ориентированного подхода MDA (Model Driven Architecture) и модифицированного алгоритма искусственных иммунных систем (AIS). Предложен модифицированный алгоритм AIS на базе метода оптимизации серых волков (Gray Wolf Optimization, GWO) для решения задачи прогнозирования зависимости "структура-свойство/активность" лекарственных соединений. Осуществлён сравнительный анализ результатов моделирования с использованием пакета прикладных программ Rapid Miner. Ил.: 5. Табл.: 3. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: молекулярный дизайн, модельно-ориентированный подход (MDA), модифицированный алгоритм искусственных иммунных систем, метод оптимизации серых волков.

Постановка проблемы. В последнее время большинство ведущих мировых фармакологических компаний сотрудничают с исследовательскими организациями, занимающимися разработками в области искусственного интеллекта (ИИ). Последние достижения ИИ и современные информационные технологии способствуют значительному прогрессу в области компьютерного молекулярного дизайна лекарственных препаратов. Внедрение инновационных модифицированных алгоритмов с использованием модельно-ориентированного подхода позволяет автоматизировать процесс обработки многомерной химической информации и значительно снизить временные и финансовые затраты при прогнозировании зависимости "структура-свойство/активность" (Quantitative Structure-Activity Relationship, QSAR) лекарственных соединений.

Синтез новых лекарственных препаратов состоит из ряда этапов, в которые вовлечены специалисты из различных областей науки, таких как: биоинформатика, фармакология, химия, хемоинформатика и т.д. Очень часто у исследователей в данной области возникают трудности при работе с современными программными продуктами и IT-

технологиями. Информационная система ведения научных исследований на основе подхода MDA нацелена на специалистов, не владеющих навыками программирования, но позволяющая использовать последние достижения в области искусственного интеллекта для прогнозирования зависимости "структура-свойство/активность" лекарственных соединений.

Методология MDA успешно применяется при разработке лекарств. В работе [1] представлено использование подхода MDA для поиска нового применения существующих лекарственных препаратов и прогнозирования их побочного эффекта. Исследования [2] посвящены объединению методов анализа больших данных "Big Data Analytics" и моделирования больших данных "Implementation of data modeling" под управлением архитектуры MDA для разработки новых лекарственных соединений. В работе [3] рассматривается применение модельно-ориентированной инженерии (Model-Driven Engineering) к сервис-ориентированным разработкам на основе Grid – архитектуры для исследований в области биомедицины (прогнозирование рака молочной железы, исследование заболеваний сердца, разработка систем персонализированной медицины в области педиатрии, создание нейровизуальных биомаркеров и т.д.).

Алгоритмы ИИ являются перспективными, но не универсальными. Актуальны исследования по улучшению прогнозирующих моделей за счёт удаления избыточных данных из исходного набора признаков.

Анализ литературы. Хорошо зарекомендовали себя генетические алгоритмы, а также модификации на их основе для решения подобного рода задач. В работе [4] представлен гибридный генетический алгоритм, в котором используется алгоритм локального поиска всемирного потопы (Great deluge algorithm, GDA) вместо операции мутации. Произведён сравнительный анализ полученных данных с использованием различных классификаторов (k -ближайших соседей, многослойного персептрона, метода опорных векторов и т.д.), который показал эффективность предложенного алгоритма. В статье [5] представлен гибридный бинарный алгоритм чёрной дыры (Black hole algorithm, BHA) и модифицированный бинарный алгоритм оптимизации роя частиц (Particle swarm optimization, PSO) для решения задачи прогнозирования возникновения рака. Исследования [6] посвящены разработке модифицированного алгоритма искусственной иммунной сети для выделения информативных признаков с целью применения в качестве метода предварительной обработки данных с функциями сжатия и очистки данных. В работе [7] рассмотрены существующие алгоритмы AIRS и предложена модификация, которая учитывает параметр

numRepAg (количество обучающих агентов), не используемый в предыдущих версиях. Моделирование проводилось на основе данных репозитория "UCI machine learning" и показало хороший результат.

Таким образом, анализ литературы подтверждает актуальность разработок в области искусственного интеллекта для компьютерного молекулярного дизайна новых лекарственных препаратов.

Цель статьи – разработка информационной системы ведения научных исследований на основе подхода MDA и модифицированного алгоритма искусственных иммунных систем для прогнозирования зависимости "структура-свойство/активность" лекарственных соединений. Предложенный модифицированный алгоритм состоит из предварительной обработки химической информации на основе алгоритма оптимизации серых волков (GWO) и решения задачи прогнозирования с помощью AIS.

Информационная система ведения научных исследований на основе подхода MDA и модифицированного алгоритма AIS.

Подход MDA впервые был предложен консорциумом Object Management Group (OMG) и является удобным инструментом для реализации информационных систем на любых платформах. Построение архитектуры MDA основывается на разработке моделей, описываемых с помощью UML (Unified Modeling Language) языка. Разработка MDA архитектуры делится на два этапа: создание платформу-независимой модели (Platform Specific Model, PSM) и платформу-зависимой модели (Platform Specific Model, PSM). Данная стратегия позволяет специалистам в определённой предметной области, не владеющим навыками программирования разрабатывать информационные системы для различных приложений в фармакологии, биоинформатике и биомедицине.

Модифицированные алгоритмы искусственного интеллекта описываются в виде моделей предметной области, которые составляют основу MDA архитектуры. В качестве научно-исследовательской платформы для моделирования разработанных алгоритмов удобно использовать программный продукт Rapid Miner. Данная программа в настоящий момент занимает лидирующие позиции на мировом рынке для работы с большими данными, содержит в себе статистические методы анализа данных, оптимизационные модели, современные модели прогнозирования на основе алгоритмов искусственного интеллекта и т.д. Программное обеспечение Rapid Miner позволяет разрабатывать графические модели, имеет встроенные функции предварительной

обработки данных (Turbo Preparation), а также мощный инструмент визуализации.

Рассмотрим разработанную MDA архитектуру для компьютерного молекулярного дизайна лекарственных препаратов на базе Rapid Miner (рис. 1).

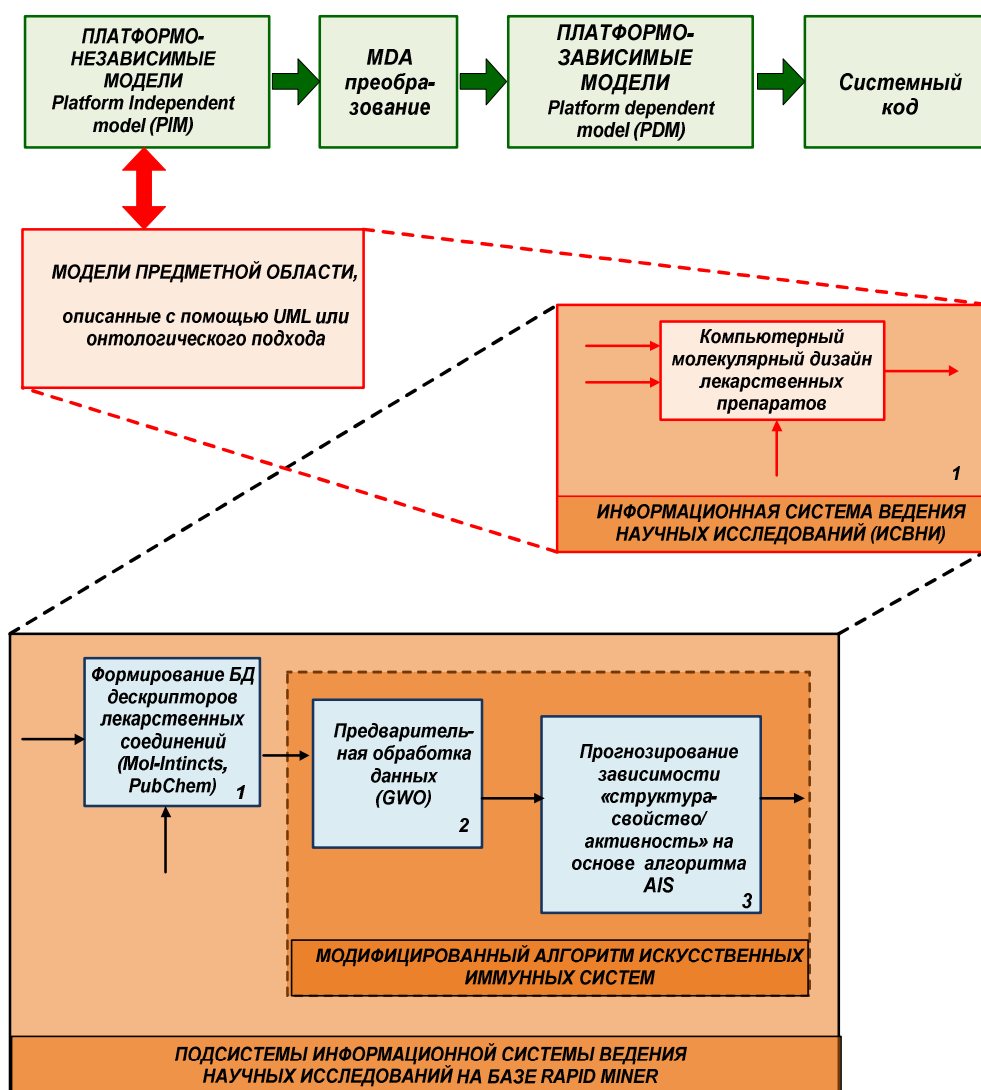


Рис.1. Архитектура информационной системы ведения научных исследований на основе MDA технологии для компьютерного молекулярного дизайна лекарственных препаратов

Модель предметной области для информационной системы ведения научных исследований состоит из следующих этапов: 1 этап – формирование базы данных дескрипторов, описывающих химическое соединение (подключение к мировым банкам данных химической информации); 2 этап – предварительная обработка данных с помощью алгоритма оптимизации серых волков, 3 этап – прогнозирование зависимости "структура-свойство/активность" на основе алгоритма AIS. Этапы 2 и 3 формируют модифицированный алгоритм GWO-AIS для прогнозирования зависимости "структура-свойство/активность" лекарственных соединений.

Рассмотрим алгоритм GWO для предварительной обработки данных. Метод оптимизации серых волков впервые был предложен в 2014 году Mirjalili et al [8] и описывает поведение серых волков в природе. Иерархия волков представлена в виде следующей структуры: α – волки лидеры; β – волки советчики, помогающие α в принятии решений; δ – подчиняются группе α и β , но доминируют над последним уровнем; ω – последний уровень иерархии, подчиняется всем вышестоящим уровням.

Математическая модель поведения волков во время охоты имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}\vec{D} &= \left| \vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t) \right|, \\ \vec{X}(t+1) &= \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D},\end{aligned}\quad (1)$$

где t – текущая итерация; $\vec{A}, \vec{C}$ – векторы коэффициенты, рассчитываемые по формулам: $\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a}$; $\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2$, значение $\vec{a}$ линейно уменьшается от 2 до 0, согласно порядку итерации и $\vec{r}_1, \vec{r}_2$ – случайные векторы $[0, 1]$; $\vec{X}_p$ – позиция вектора добычи, $\vec{X}$ – позиция вектора волков [9].

Процесс охоты инициируется α , в то время как β и δ могут помогать. В математической модели (1) показано, что α , β и δ представляют собой наилучшее решение относительно потенциального расположения добычи. Первые три лучших решения сохраняются и другие агенты (agents) обязаны обновлять свои позиции согласно позиции агентов наилучшего поиска (best search agents) на основе уравнений вида:

$$\vec{D}_\alpha = \left| \vec{C}_1 \cdot \vec{X}_\alpha - \vec{X} \right|, \quad \vec{D}_\beta = \left| \vec{C}_2 \cdot \vec{X}_\beta - \vec{X} \right|, \quad \vec{D}_\delta = \left| \vec{C}_3 \cdot \vec{X}_\delta - \vec{X} \right|, \quad (2)$$

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot (\vec{D}_\alpha), \quad \vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \cdot (\vec{D}_\beta), \quad \vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \cdot (\vec{D}_\delta), \quad (3)$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3}, \quad (4)$$

где вектор $\vec{A}$ представляет собой случайное значение, лежащее в диапазоне $[-2a, 2a]$, а значение параметра a уменьшается от 2 до 0, согласно текущей итерации.

Далее прогнозирование QSAR осуществляется с помощью алгоритма AIS. Механизм AIS основан на принципах теоретической иммунологии и описывает реакцию организма на попадание в него различного рода патогенов. В настоящее время наиболее известными подходами AIS являются: клональная селекция (Clonal Selection, CS), отрицательный отбор (Negative selection, NS) и иммунные сети. Широко известны следующие алгоритмы AIS: алгоритм распознавания искусственной иммунной системой (Artificial Immune Recognition Systems, AIRS), предложенный Andrew B. Watkins и Jon Timmis; алгоритм клональной селекции (CLONALG), разработанный Leandro N. de Castro и Fernando J. Von Zuben; алгоритм классификации на основе клональной селекции (Clonal Selection Classification Algorithm, CSCA) созданный Jason Brownlee и т.д.

Перспективным является иммунносетевой подход, в котором используется механизм молекулярного узнавания [10]. В основе алгоритма лежит понятие формального пептида и определение минимума энергии связи между формальными пептидами (антиген-антитело) на основе сингулярного разложения матриц. Данный метод используется для разработки модифицированного алгоритма GWO-AIS при прогнозировании зависимости "структура-свойство/активность" лекарственных соединений.

Моделирование и сравнительный анализ работы модифицированного алгоритма GWO-AIS.

Рассмотрим моделирование модифицированного алгоритма GWO-AIS на примере лекарственных соединений сульфаниламидной группы. Сульфаниламиды представляют собой антибактериальные средства широкого спектра действия. В таблице 1 представлен фрагмент базы данных (БД) сульфаниламидов, составленный на основе крупнейшего мирового репозитория химической информации Mol-Instincts. База данных состоит из дескрипторов различного уровня, описывающих структуру химических соединений, например: number of atoms – число атомов, molecular weight – молекулярный вес, Gravitation index – гравитационный индекс; Cubic root of Gravitation index – корень кубический гравитационного индекса и т.д. Размерность БД составляет $R_1=15 \times 1500$, всего 22 000 атрибутов данных.

Таблица 1

Фрагмент базы данных сульфаниламидов

Вещество	Дескрипторы, описывающие структуру химического соединения						
	Number of atoms	Molecular weight	Average molecular weight	Gravitation index	Cubic root of Gravitation index	...	Polarity parameter
Sulfadiazine	27	250.2751	9.2700	1980.800	12.5588	...	0.1576
Sulfadimidine	33	278.3287	8.4400	1916.900	12.4222	...	0.2407
Sulfafurazole	31	267.3018	8.6200	1874.900	12.3308	...	0.2798
Sulfamethizole	27	270.3240	10.0100	1856.900	12.2913	...	0.2712
Sulfamethoxazole	46	311.4416	6.7700	2335.900	13.2684	...	0.1854
...	...	...	...	...	...	...	...
Sulfaperin	30	264.3018	8.8100	1843.000	12.2605	...	0.2439

Для решения задачи прогнозирования сульфаниламиды можно разделить на следующие классы: 1 класс – сульфаниламиды короткого действия (менее 10 ч); 2 класс – сульфаниламиды средней длительности действия (10 – 24 ч); 3 класс – сульфаниламиды длительного действия (24 – 48 ч). Визуализация фрагмента БД сульфаниламидов в 2D форме для соединения sulfadiazine средней продолжительности действия представлена на рис. 2.

Для тестирования эффективности применения алгоритма оптимизации серых волков в качестве метода для редукции малоинформативных дескрипторов сульфаниламидов и формирования оптимальной БД дескрипторов рассмотрим сравнительный анализ с различными алгоритмами машинного обучения. В качестве алгоритмов сравнения выбраны следующие методы: наивный Байесовский алгоритм (Naive Bayes), глубокое обучение (Deep Learning), деревья решений (Decision Tree), случайный лес (Random Forest), метод опорных векторов (Support Vector Machine). Моделирование осуществлялось в среде Rapid Miner.

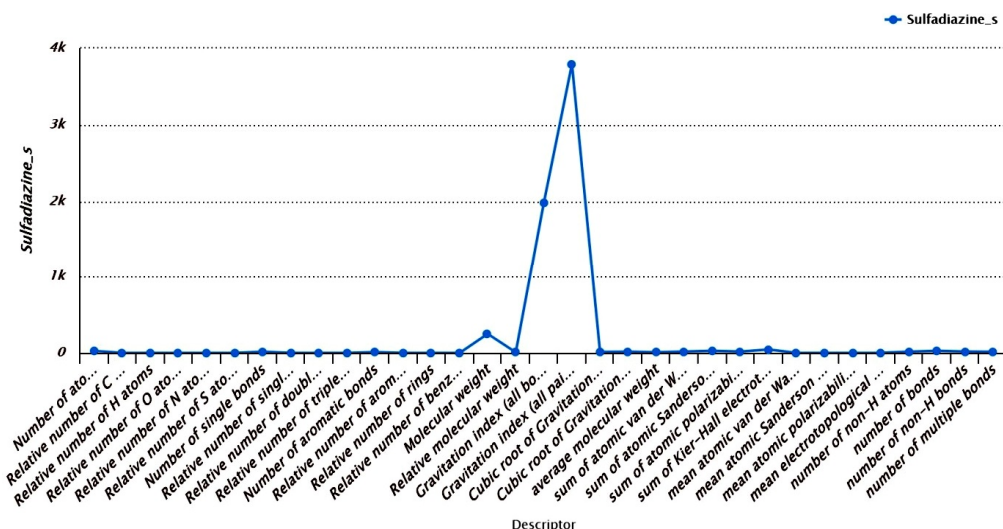


Рис. 2. Фрагмент базы данных дескрипторов sulfadiazine

На рис. 3 представлены графики эффективности применения представленных алгоритмов по критериям: точность (ассигасу) и быстродействие (Runtime) для полной БД дескрипторов сульфаниламидов размерности R_1 без предварительной обработки данных на основе GWO.

В табл. 2 представлена детализация результатов моделирования.

Таблица 2

Сравнительный анализ результатов прогнозирования

Модель прогнозирования	Точность распознавания	Ошибка распознавания	Время моделирования
Наивный Баесовский алгоритм	62,5%	37,5%	2 сек.
Глубокое обучение	69,8%	30,2%	34 сек.
Деревья решений	64,2%	35,8%	3 сек.
Случайный лес	86,4%	13,6%	1 мин. 1 сек.
Метод опорных векторов	87,8%	12,2%	15 сек.

Далее рассмотрим статистику после обработки БД дескрипторов сульфаниламидов с помощью алгоритма оптимизации серых волков.

Размерность новой БД дескрипторов сульфаниламидов составляет $R_2 = 15 \times 200$, 3000 атрибутов. На рис. 4 представлены результаты моделирования с использованием БД размерности R_2 .

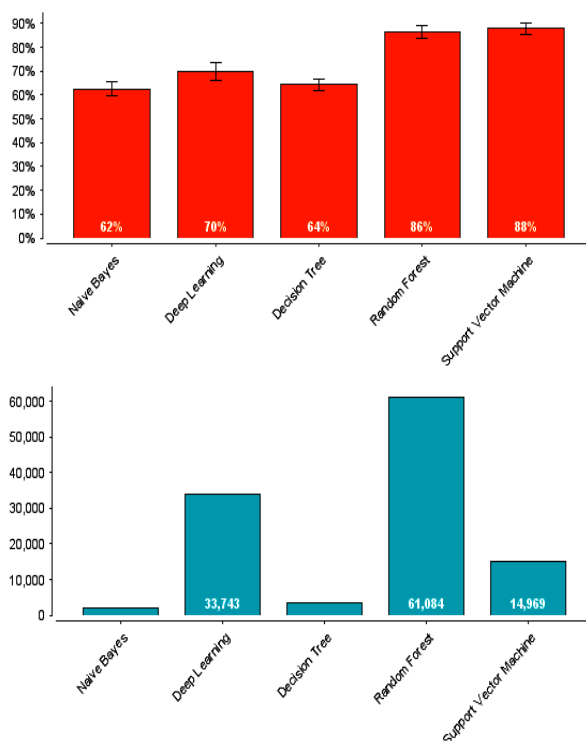


Рис. 3. Решение задачи распознавания образов с использованием БД дескрипторов сульфаниламидов без предварительной обработки данных

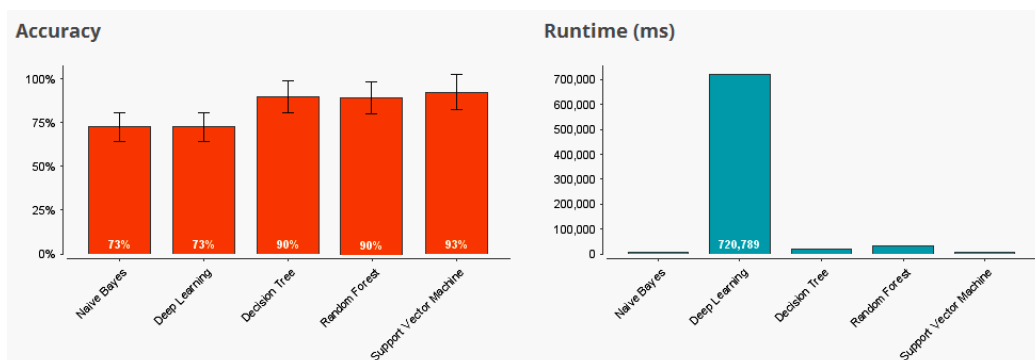


Рис. 4. Решение задачи распознавания образов с использованием БД дескрипторов сульфаниламидов после предварительной обработки данных на основе GWO

Статистика эффективности применения рассмотренных алгоритмов представлена в табл. 3.

Таблица 3

Сравнительный анализ результатов прогнозирования БД сульфаниламидов

Модель прогнозирования	Точность распознавания	Ошибка распознавания	Время моделирования
Наивный Баесовский алгоритм	72,7%	27,3%	7 сек
Глубокое обучение	72,7%	27,3%	12 мин 0 сек
Деревья решений	90%	10%	20 сек
Случайный лес	90%	10%	32 сек
Метод опорных векторов	92,7%	7,3%	7 сек

Таким образом, алгоритм оптимизации серых волков может быть применён при разработке модифицированного алгоритма AIS в рамках архитектуры MDA для молекулярного дизайна лекарств.

Рассмотрим результаты моделирования модифицированного алгоритма GWO-AIS для решения задачи прогнозирования QSAR сульфаниламидов. Для оценки эффективности работы предложенного модифицированного алгоритма GWO-AIS проведен сравнительный анализ (рис.5) результатов моделирования с алгоритмом GWO-AIRS в программной среде WEKA (Waikato Environment for Knowledge Analysis).

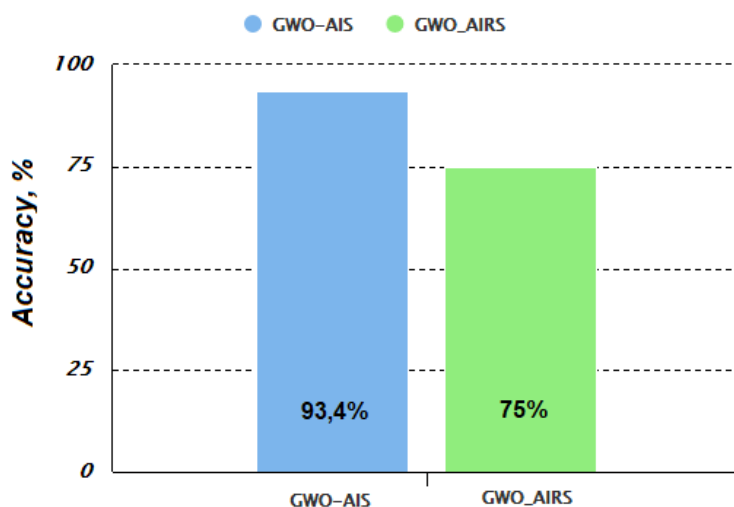


Рис. 5. Прогнозирование сульфаниламидов с помощью модифицированных алгоритмов GWO-AIS и GWO-AIRS

Точность GWO-AIS составляет 93,4% (время моделирования 3 сек.), эффективность алгоритма GWO-AIRS составляет 75% (время моделирования 5 сек.).

Полученные результаты показывают перспективность применения предложенного модифицированного алгоритма GWO-AIS для прогнозирования QSAR новых лекарственных соединений сульфаниламидной группы.

Выводы. Разработанная архитектура информационной системы ведения научных исследований на основе подхода MDA и модифицированного алгоритма ИИС является эффективным инструментом для исследователей в области компьютерного молекулярного дизайна новых лекарственных препаратов, не владеющих навыками программирования. Предложенная архитектура, на основе разработки моделей предметной области может дополняться новыми перспективными алгоритмами и успешно подходит для исследований в области фармакологии и биоинформатики.

Работа выполнена по гранту Комитета Науки Министерства Образования и Науки Республики Казахстан AP05130019 по теме: "Разработка и анализ баз данных для информационной системы прогнозирования зависимости "структура-свойство" лекарственных соединений на основе алгоритмов искусственного интеллекта" (2018 – 2020 гг.).

References:

1. Banpatte, S., Shinde, U., Patil, R., Manole, K., Patil, R., and Aldar, K.M. (2017), "Drug Discovery Based On Model Driven Architecture", *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 4, № 4, pp. 886-893.
2. Etani, N. (2015), "Database application model and its service for drug discovery in Model-driven architecture", *Journal of Big Data*, vol. 2, № 16, pp. 1-17.
3. Manset, F.M. (2012), "A formal architecture-centric and model-driven approach for the engineering of science gateways", *Centre for Complex Cooperative Systems*, pp.1-71.
4. Guha, R., Ghosh, M., Kapri, S., Shaw, S., Mutsuddi, S., Bhateja, V., and Sarkar, R. (2019), "Deluge based Genetic Algorithm for feature selection", *Evolutionary intelligence*, pp. 1-11.
5. Elham, E., and Aydin, P. (2018), "Gene selection using hybrid binary black hole algorithm and modified binary particle swarm optimization", *Genomics*, pp. 1-18.
6. Ge, H., and Yan, X. (2011), "A Modified Artificial Immune Network for Feature Extracting", *Advances in Swarm Intelligence*, pp. 408-415.
7. Jenhani, I., and Elouedi, Z. (2014), "Re-visiting the artificial immune recognition system: a survey and an improved version", *Artificial Intelligence Review*, vol. 42, № 4., pp. 821-833.
8. Mirjalili, S., Mirjalili, and S.M, Lewis, A. (2014), "Gray wolf optimizer", *Advances in Engineering software*, vol. 69, pp. 46-61.
9. Faris, H., Aljarah, I., Al-Betar, M., and Mirjalili, S. (2018), "Gray wolf optimizer: a review of recent variants and applications", *Neural Computing and Applications*, vol. 30, №2., pp. 413-435.

10. Samigulina, G., and Samigulina, Z. (2017), "Immune Network Technology on the basis of random forest algorithm for computer-aided drug design", *Bioinformatics and Biomedical Engineering*, vol. 10208, pp. 50-61.

Статью представил д.т.н., проф. Национального технического университета "Харковский политехнический институт" С.Ю. Леонов

Поступила (received) 27.05.2019

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

Samigulina Zarina, Ph.D,
Kazakh British Technical University
Str. Tole bi, 59, Almaty, Kazakhstan, 050000,
Tel:+7(702)218-97-73, e-mail: zarinasamigulina@mail.ru
ORCID ID: 0000-0002-5862-6415

УДК 004.89:004.4

Інформаційна система для молекулярного дизайну лікарських сполук на основі модельно-орієнтованого підходу / Самігуліна Г.А., Самігуліна З.І. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2019. – № 13 (1338). – С. 176 – 188.

Стаття присвячена розробці інформаційної системи ведення наукових досліджень на базі модельно-орієнтованого підходу MDA (Model Driven Architecture) і модифікованого алгоритму штучних імунних систем (AIS). Запропоновано модифікований алгоритм AIS на базі методу оптимізації сірих вовків (Gray Wolf Optimization, GWO) для вирішення задачі прогнозування залежності "структура-властивість/активність" лікарських сполук. Здійснено порівняльний аналіз результатів моделювання з використанням пакета прикладних програм Rapid Miner. Іл.: 5. Табл.: 3. Бібліогр.: 10 назв.

Ключові слова: молекулярний дизайн; модельно-орієнтований підхід (MDA); модифікований алгоритм штучних імунних систем; метод оптимізації сірих вовків.

УДК 004.89:004.4

Информационная система для молекулярного дизайна лекарственных соединений на основе модельно-ориентированного подхода / Самигулина Г.А., Самигулина О.И. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2019. – № 13 (1338). – С. 176 – 188.

Статья посвящена разработке информационной системы ведения научных исследований на базе модельно-ориентированного подхода MDA (Model Driven Architecture) и модифицированного алгоритма искусственных иммунных систем (AIS). Предложен модифицированный алгоритм AIS на базе метода оптимизации серых волков (Gray Wolf Optimization, GWO) для решения задачи прогнозирования зависимости "структура-свойство/активность" лекарственных соединений. Осуществлен сравнительный анализ результатов моделирования с использованием пакета прикладных программ Rapid Miner. Ил.: 5. Табл.: 3. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: молекулярный дизайн; модельно-ориентированный подход (MDA); модифицированный алгоритм искусственных иммунных систем; метод оптимизации серых волков.

UDC 004.89:004.4

Information system for molecular design of drug compounds based on a model-based approach / Samigulina G.A., Samigulina Z.I. // Herald of the National Technical University "KhPI". Series of "Informatics and Modeling". – Kharkov: NTU "KhPI". – 2019. – № 13 (1338). – P. 176 – 188.

The article is devoted to the development of an information system for conducting scientific research based on the model-based approach MDA (Model Driven Architecture) and the modified algorithm of artificial immune systems (AIS). A modified AIS algorithm based on the Gray Wolf Optimization (GWO) is optimization method for solving the problem of predicting the "structure-property/activity" dependence of medicinal compounds is proposed. A comparative analysis of simulation results using the Rapid Miner application software package was carried out. Figs.: 5. Tabl.: 3. Refs.: 10 titles.

Keywords: molecular design of drug; model-based approach MDA; modified algorithm of artificial immune systems; gray wolf optimization.

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.</i> О единственности решения задачи типа Франкля для уравнения эллипτικο-гиперболического типа второго рода	<i>5</i>
<i>Атамирзаев М., Юлдашев Н.</i> Численное моделирование трехмерных турбулентных струй реагирующих газов	<i>13</i>
<i>Бабіченко А.К., Подустов М.О., Кравченко Я.О., Бабіченко Ю.А.</i> Формування інформаційного масиву ідентифікатора адаптивної системи управління блоку конденсації виробництва аміаку за невизначеностей	<i>25</i>
<i>Гусейнзаде С.О., Гадимов И.К.</i> Об одной модели нестационарного течения слабосжимаемой жидкости в трубопроводе	<i>34</i>
<i>Тойиров А.Х., Холтураев Х.Ф.</i> О проблеме гидродинамической устойчивости	<i>48</i>

Компьютерная инженерия

<i>Дмитриенко В.Д., Заковоротный А.Ю., Леонов С.Ю., Главчев Д.М.</i> Программная компонента для поиска решений системы уравнений в частных производных в ГТУ методом группового учета аргументов	<i>61</i>
<i>Lomovoy V.I., Pavlenko V.D.</i> Identification Nonlinear Dynamic Systems Based on Volterra Polynomials with USING Polyharmonic Test Signals	<i>74</i>

Автоматизация и компьютерно-интегрированные технологии

<i>Бобух А.О., Герман Е.Є., Болотинська О.О., Переверзева А.М.</i> Дослідження перехідних процесів управління температурою гідрокарбонатної суспензії виробництва кальцинованої соди	<i>86</i>
--	-----------

Мороз В.В., Швандт М.А. Дослідження руху та поведінки лабораторних тварин методами детектування і трекінгу об'єктів	93
Повхан І.Ф. Задача загальної оцінки складності максимального побудованого логічного дерева класифікації	104

Информационные технологии

Сіряк Р.В., Скарга-Бандурова І.С., Шумова Л.О. Особливості реалізації технології обробки даних для розпізнавання жестів	117
Суздаль В.С., Тавровский И.И. Инвариантные по выходу системы управления выращиванием щелочногалоидных монокристаллов	128
Tikhonov V.I., Tykhonova O.V. The math modeling cognitive issues of general system theory	137
Ширяева О.И., Самигулин Т.И. Разработка искусственной иммунной системы управления многомерным объектом нефтегазовой отрасли	155

Биологические и медицинские приборы и системы

Дацок О.М., Прасол І.В., Єрошенко О.А. Побудова біотехнічної системи м'язової електростимуляції	165
Самигулина Г.А., Самигулина З.И. Информационная система для молекулярного дизайна лекарственных соединений на основе модельно-ориентированного подхода	176