

ФГАОУ ВО «МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ «СТАНКИН»

ИНСТИТУТ БИОФИЗИКИ КЛЕТКИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК –
ОБОСОБЛЕННОЕ ПОДРАЗДЕЛЕНИЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ «ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ЦЕНТР «ПУЩИНСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР БИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ –
ФИЦ ПНЦБИ РАН (*ПУЩИНО*)

ФГУ «ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ
МАТЕМАТИКИ им М.В. КЕЛДЫША РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»
(ИПМ им. М.В. КЕЛДЫША РАН)

ИНСТИТУТ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ БИОЛОГИИ РАН –
ФИЛИАЛ ИПМ им. М.В. КЕЛДЫША РАН (*ПУЩИНО*)

ФГБОУ ВО «МУРМАНСКИЙ АРКТИЧЕСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
CENTRO DE MATEMATICA COMPUTACIONAL E ESTOCASTICA INSTITUTO
SUPERIOR TECNICO, LISBON (*PORTUGAL*)

ВОСЬМАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ И СИСТЕМ

The Seventh International Scientific Conference (MNPS-2024)

THE MODELING OF NONLINEAR PROCESSES AND SYSTEMS

**МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ
CONFERENCE PROCEEDINGS**

**Москва
Moscow
2025**

УДК 519.6

Моделирование нелинейных процессов и систем. Материалы пятой международной конференции. – М.: Янус-К, 2025. – 394 с.

ISBN 978-5-8037-0974-9

В сборник включены материалы участников восьмой международной научной конференции «Моделирование нелинейных процессов и систем», проходившей 18–21 декабря 2024 года в Федеральном Государственном Бюджетном (ныне Автономном) Образовательном Учреждении Высшего Образования «Московский Государственный Технологический Университет «СТАНКИН».

© Коллектив авторов, 2025

ISBN 978-5-8037-0974-9

The conference goals and objectives:

- Scientists consolidation, working in various fundamental scientific fields;
- Attraction of the young scientists;
- Organization of discussions and seminars on natural sciences modern problems;
- Discussion of the methodological problems and trends in the modern science;
- Discussion of the prospects and the results of the mathematical modeling methods applying to the biosystems and nanosystems;
- Discussion of the ecology and economy mathematical modeling concepts;
- Discussion problems of natural science and mathematics

Conference Topics:

The conference covers following aspects

- ❖ Methods of mathematical modeling and their applications
- ❖ Nonlinear transport models
- ❖ Interaction of electromagnetic field with nonlinear systems
- ❖ Problems of modern ecology (including the Arctic region)
- ❖ Problems of industrial and natural aerosols spreading over water basins
- ❖ Mathematical models in economics
- ❖ Clusters and nanosystems theoretical and experimental research
- ❖ Molecular and biomolecular systems, Bionanocomplexes
- ❖ Neurosystems modelling
- ❖ Modeling of the information – active systems
- ❖ Synergistic aspects of modern science
- ❖ Numerical methods
- ❖ Difference equations
- ❖ Physical kinetic models
- ❖ Wave processes (including hydrodynamics)
- ❖ Real analysis
- ❖ Management in physical, technical, economic systems
- ❖ Artificial intelligence machine learning and computer vision modeling intelligent systems
- ❖ Managing of the technologies processes and smart manufacturing modeling of physical – chemical and mechanical properties of materials
- ❖ Mathematical models of high-precision processes of the materials handling

INTERNATIONAL SCIENTIFIC COMMITTEE

B.N. Chetverushkin (Russia), A.S. Sigov (Russia), V.D. Lakhno (Russia), G.Yu. Riznichenko (Russia), A.K. Chernyshyov (Russia), M.V. Yakobovsky (Russia), V.V. Komarov (Russia), V.V. Vedenyapin (Russia), V.V. Sokolov (Russia), S.D. Traytak (Russia), L.V. Pletnyev (Russia), N.N. Karabutov (Russia), V.I. Lobanov (Russia), N.N. Kholshchevnikova (Russia), T.A. Sushkevich (Russia), A.A. Namgaladze (Russia), V.A. Zagainov, M.A. Knyazeva (Russia), V.L. Malyshev (Byelorussia), Sandra Pinelas (Portugal, Academia Militar), D. Gramotnev (Australia), S. Stevic (Serbia), I. Agranovski (Australia), Z. Došla, R. Šimon Hilscher (Czech).

INTERNATIONAL PROGRAM COMMITTEE

G. Gramotnev (Australia), P. Lima (Portugal), X. Jiang (China), L.Yu. Vasil'eva, A.V. Shapovalov, O.V. Solyakov, L.V. Yakushevich, I.V. Krivenko, A.M. Sergeev, O.V. Zolotov, G.G. Gogoberidze, T.V. Ryjkova (Russia), M.A. Smirnova.

LOCAL ORGANIZING COMMITTEE

D.Yu. Kolodyajnyi – *co-chairman*, L.A. Uvarova – *co-chairman*, A.B. Nadykto – *co-chairman*, Yu.V. Eliseeva, P.M. Pivkin, E.Yu. Romanova, K.V. Nazarenko, N.A. Korobov – *scientific secretary*, T.V. Kazarova, O.B. Nadykto, E. M. Krasikova – *scientific secretary*, O.V. Stikhova – *scientific secretary*, P.V. Moskaev, V.G. Kirichenko.

THE CONFERENCE PARTICIPANTS MADE PLENARY PRESENTATIONS:

A.V. Shapovalov, A.E. Kulagin, S.A. Siniukov (Tomsk, Russia), Xiaohui Jiang (China, Shanghai), V. D. Lakhno (Pushchino, Russia), L.I. Lapushkina (Moscow, Russia), G.D. Volkova, T.B. Tyurbееva (Moscow, Russia), A. Arinstein (Israel), A.I. Lobanov (Dolgoprudny, Russia), E.N. Terentiev, F.V. Shugaev, N.E. Shilin-Terentyev (Moscow, Russia), Traytak (Moscow, Russia), L.A. Krasnobaeva, L.V. Yakushevich (Tomsk, Pushchino, Russia), Zishan Ding (China, Shanghai), O.V. Germider, V.N. Popov (Arkhangelsk), Chongjun Wu (China, Donghua), Sandra Pinelas (Portugal), N.N. Kholshchevnikova (Moscow, Russia), P.M. Lima (Portugal), A.S. Sigov (Moscow, Russia), Mariya Borodavkina (Russia, Antarctica), P.M. Pivkin (Moscow, Russia), T.A. Sushkevich (Moscow, Russia), Yu.Yu. Tarasevich, A.V. Eserkepov, I.V. Vodolazskaya (Astrakhan, Russia), S.V. Petoukhov (Moscow, Russia), P.V. Moskaev (Moscow, Russia).

MEMORY OF NAJDAN ALEKSIC – PHYSICS AND MATHEMATICS



Найдан Алексич – известный учёный в области физики и математики, в частности в области нелинейной оптики и решения нелинейных уравнений математической физики.

Найдан родился в 1954 году в Сербии. Он окончил гимназию Пирот, а затем физическое отделение факультета естественных наук и математики Белградского университета, где также получил степень магистра и доктора философии. Он работал научным сотрудником в Институте физики Белграда с 1979 года до выхода на пенсию в 2020 году. Н. Алексич добился весьма значительных результатов в своих исследованиях в области теоретической физики, главным образом в области нелинейной динамики и оптики. Он способствовал плодотворному сотрудничеству с многочисленными исследователями в Сербии и за рубежом. Результаты работы Алексича широко известны и были опубликованы более чем в 90 статьях, в основном в известных журналах. Он также опубликовал несколько глав в книгах и монографиях.

Жизнь Найдана Алексича во многом связана с научной жизнью в Советском Союзе, а в 21 веке – с научной жизнью в России. Он работал в Институте теоретической физики в Киеве, постоянно контактировал с Лабораторией теоретической физики в Объединённом институте ядерных исследований в Дубне. Во время событий в Югославии и в СССР связь эта прерывалась, но постепенно в последние 15 лет восстановилась. В эти годы Найдан Алексич постоянно участвовал в проведении и организации нашей международной научной конференции «Моделирование нелинейных процессов и систем» как в качестве докладчика, так и в качестве члена международного программного комитета. Он также активно работал в качестве главного научного сотрудника ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» по грантам РФ.

Все, кто знал Найдана Алексича, будут помнить его как настоящего учёного и прекрасного человека.

Некоторые публикации Н.Б. Алексича

1. V. Skarka, N.B. Aleksić, H. Leblond, B.A. Malomed, D. Mihalache. Varieties of Stable Vortical Solitons in Ginzburg-Landau Media with Radially Inhomogeneous Losses// Physical Review Letters 105 (21), 213901.
2. V.I. Berezhiani, V. Skarka, N.B. Aleksić. Dynamics of localized and nonlocalized optical vortex solitons in cubic-quintic nonlinear media//Physical Review E 64 (5), 057601.
3. V. Skarka, N.B. Aleksić, M. Lekić, B.N. Aleksić, B.A. Malomed, D. Mihalache. Formation of complex two-dimensional dissipative solitons via spontaneous symmetry breaking// Physical Review A 90 (2), 023845.

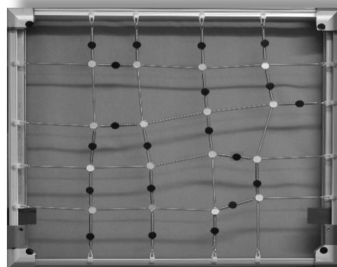
IMITATION MODELING: THE BEHAVIOR ANALYSIS OF THE MIXTURE OF TWO OPPOSITELY CHARGED POLYELECTROLYTES WITH THE HELP OF A MACROSCOPIC MECHANICAL SYSTEM

A. Arinstein

Technion – Israel Institute of Technology, Haifa 32000, Israel
e-mail: mearin@technion.ac.il

To realize the idea of imitation modelling proposed by us recently, a mechanical system consisting of identical quantity of two types springs (20 ones of each type) having different elasticities and equilibrium lengths, was fabricated. To mimic a polymer network, all springs should be connected in such a manner that a quadrangular lattice will formed, in doing so each node of this lattice should contain two springs of each type. As a result of such restriction, the springs of one type form chains at any allowable spring distribution, and these chains can be considered as "polymer macromolecules".

Each random system configuration generated by computer, was assembled inside of metallic frame and photographed with further analysis with the help of the computer program including pattern recognition, image analysis. As a result, the system parameters (energy and order parameter) were calculated and collected for 256 generated configurations, differed by system orientational ordering when more springs of the one type are orientated along one direction (for example, along x-axis), whereas the orientation along other direction (along y-axis) is preferable for the other type springs. The statistical analysis of obtained data allows one to derive the dependence of the system energy vs. spatial distribution of the system springs (more exactly, their orientational ordering). Using the obtained dependence, the statistical weight of each system state characterized by energy and orientation ordering, can be calculated (more exactly, the state portion corresponding to a narrow range of the above system parameters). Thereafter the system entropy as well as the free energy can be introduced, and the minimum of last corresponds to the system equilibrium state.



The above examining allows one to verify experimentally the outcomes of theoretical model analyzing the self-ordering in a 2D two-component system modelling the behavior of a mixture of two oppositely charged polyelectrolytes.

References

1. Martin P., Vasilyev G., Chu G., Boas M., Arinstein A., Zussman E.// Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, v. **57**, 2019. p. 1527–1536.
2. Arinstein A. Self-ordering in a mixture of two oppositely charged polyelectrolytes. 18th International Conference on Chemistry and Physical Chemsitry of Oligomers. Paper Collection. v. **1**. p. 6.
3. Arinstein A., Soukhanov V., Zussman E. 2022 APS March Meeting. Bulletin of the APS, 2022. v. **67** (3), B31.00013.

IONIC HOZHKIN-HASLEY MODEL OF THE III GENERATION IN A DISTRIBUTED EXCITABLE MEDIUM FOR DESCRIBING A REACTION-DIFFUSION SYSTEM

S.T. Belyakin

Department of General Physics, Physics Faculty, Lomonosov MSU, Moscow, Russia
119991, Academician Khokhlov Street, 1(2)

Tel.: (+7 495)939-51-56, e-mail: sergeybelyakin@yandex.ru

Let us consider the simplified ionic model (SIM) of the propagation of the action potential in cardiac tissue, proposed by Hodgkin and Huxley in 1952 [1]. Hodgkin and Huxley proposed a model describing the processes of ion transport through the membrane and the passage of the potential pulse along the membrane. The work of the British scientists was awarded the Nobel Prize in 1963 (together with Sir John Eccles, Australia).

Based on experimental data on the dependence of membrane conductivity for various ions on the membrane potential, A. Hodgkin and E. Huxley described the magnitude of ion currents using functions dependent on the "concentrations" of some hypothetical particles moving in the membrane under the influence of an electric field. The Hodgkin-Huxley model is the following system of nonlinear differential equations (1):

$$\frac{\partial V}{\partial t} = -I_{ion} + \frac{1}{\rho_s SC_m} \frac{\partial^2 V}{\partial x^2}. \quad (1)$$

Where:

$$I_{ion} = I_{Na} + I_{K_r} + I_{Ca,L} + I_{K_1} + I_{t_0} + I_{K_n} + I_{Ca,p} + I_{Na,K} + I_{Na,Ca} + I_{Na,b} + I_{Ca,b},$$

C_m – specific membrane capacity, ρ_s – membrane resistivity, S – specific surface area of the membrane.

In 2D modeling, one of the most important forms of abnormal excitation is the reverse spiral wave [2]. Flickering spiral wave activity in the atria has been experimentally found [3]. Therefore, we originally initiated spiral waves in two-dimensional cardiac tissue and the reformulated model and compared their dynamics (Fig. 1).

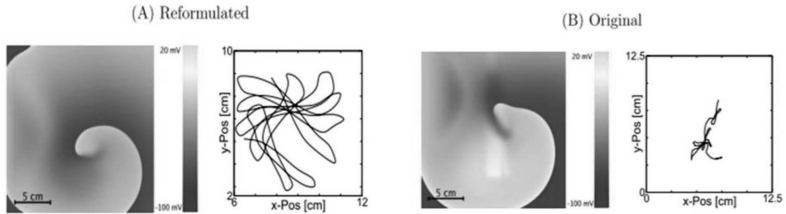


Fig. 1. The shape of the spiral wave and the tip movement in the reformulated (A) and original (B) models. The average size for all cases is 25×25 cm

In Fig. 1 both models of spirals and types of movement for 3 sec are presented. In the original model, the movement of the tip in both cases is quite regular for several rotations, but then the tip and a fairly large piece of the inner spiral of the wave front approaches the previous front, which they lose the ability to excite. The first point up the spiral that still has the ability

to excite becomes the new tip, and immediately begins to move around the first tip, which has now become an unresponsive medium. This results in quite large jumps at the tip of the spiral and results in an irregular and slow period of the spiral. The area covered by the tip is about $6 \text{ cm} \times 6 \text{ cm}$, but it will become considerably larger for longer simulations. The average period of the spiral is $335 \pm 52 \text{ ms}$.

In the reformulated model, the tip can lose the ability to excite as well, but this effect is much less pronounced. The spirals in the reformulated model are more regular and rotate faster. The area traversed by the tip is $6 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$, and the average period of the spiral is $273 \pm 36 \text{ ms}$ (mean $\pm$ standard deviation at all points in the environment).

Excitable cells were first modeled quantitatively in a paper by Hodgkin and Huxley on the squid giant axon [1]. Hodgkin and Huxley viewed the cell as a capacitor and its ion channels as variable resistors. New ion channels were discovered and the characterizations became much more accurate [4, 5]. The fundamental shift in the development of the model was that the intracellular state of the ions has variable parameters. The study of wave propagation using second-generation models is described by the cable equation (2):

$$V_0(x, t) = V_0(x, 0) + D \int \frac{\partial^2 V(x, t)}{\partial x^2} dt . \quad (2)$$

The use of a color scheme to visualize spiral waves is shown in Fig. 2.

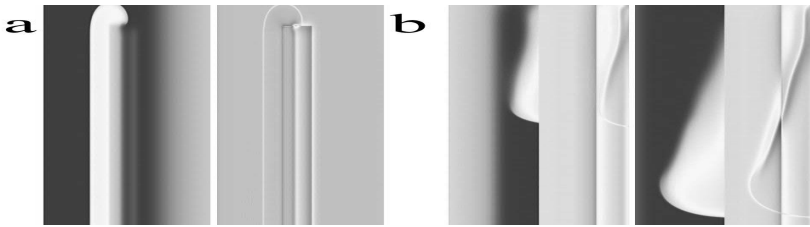


Fig. 2. Using a color scheme to visualize spiral waves: blue for low values, yellow for higher values, and red for even higher values. a) The initial pattern is mostly yellow because there is no significant increase in V_0 . b) The increase in V_0 in the trace of the spiral tip

In Fig. 2,a, we introduce our visualization of changes in V_0 . The left panel shows the early stage of the development of the spiral wave, just after the stimulus has been placed at the rear of the wave. The right panel shows the corresponding distribution of V_0 . In Fig. 2,b, the buildup of V_0 in the wake of the spiral tip. The left two images show the surroundings of the spiral tip and the corresponding distribution of V_0 , the right two images show the same situation 45 ms later.

There is an apparent large loss of V_0 along the forward confining helix of the tip (around 200 mV) as this front cannot move forward because the medium is still relaxed and large diffusion fluxes associated with the steep gradients of the fronts hold back the propagation. Similarly, there is a large accumulation of V_0 in the relaxed medium confined by the stopped front (Fig. 2,b).

Second-generation models that are stimulated by non-specific currents, which is common practice, show non-physiological behavior, which has led to concerns among researchers considering such models for modeling. Mathematically, we show that non-specific currents directly add to the integration constant, which is related to the ion concentration. The integration constant can be considered as a parameter of the model. The Courtemanche cell model of human atria gives similar results. Using the above model, we can quantify the effect of these non-specific stimulations. In one-dimensional propagation, we show that for a pulse

of fixed shape and propagation velocity, there is no effect. If the pulse varies in time, due to inhomogeneities in the medium, a large distortion can be observed.

This defect leads to a number of artifacts. For example, the resting state of the second-generation models is not unique, but depends on the initial conditions of the simulation. A closely related problem is that external stimulation can lead to drift in intracellular concentrations and V_m . Countless single-cell and wave propagation studies have already been conducted using second-generation models, and the question is how reliable the results are. For numerical calculations, we use the Lou-Rudy (LR) model of mammalian myocyte ventricles [6, 7]. At each time step, ion currents through ion channels, pumps, and exchangers are updated, specified according to the model equations. For these ion currents, changes in ion concentrations are calculated as follows (3):

$$\begin{aligned}
\partial_t [K^+]_i &= -\frac{A_{cap} C_m}{V_{myo} F} [I_{K,t} - 2I_{NaK}], \\
\partial_t [Na^+]_i &= -\frac{A_{cap} C_m}{V_{myo} F} [I_{Na,t} + 3I_{NaK} + 3I_{NaCa}], \\
\partial_t [Ca^{2+}]_i &= -\frac{A_{cap} C_m}{V_{myo} F} [I_{Ca,t} - 2I_{NaCa}], \\
\partial_t [Ca^{2+}]_0 &= -\frac{V_{nsr}}{V_{myo}} [I_{K,t} - I_{leak}] + \frac{V_{jsr}}{V_{myo}} I_{rel}, \\
\partial_t [Ca^{2+}]_{jsr} &= I_{tr} - I_{rel}, \\
\partial_t [Ca^{2+}]_{msr} &= I_{up} - I_{leak} - \frac{V_{jsr}}{V_{nsr}} I_{tr}.
\end{aligned} \tag{3}$$

The third generation Hodgkin-Hasley ion model in a distributed excitable inactive medium for describing a reaction-diffusion system is presented by equation (4):

$$\begin{aligned}
\partial_t [K^+]_i &= -\frac{A_{cap} C_m}{V_{myo} F} \left[I_{K,t} - 2I_{NaK} - D \frac{\partial^2 V_m}{\partial x^2}(x, t) \right] \\
\partial_t [Na^+]_i &= -\frac{A_{cap} C_m}{V_{myo} F} [I_{Na,t} + 3I_{NaK} + 3I_{NaCa}] \\
\partial_t [Ca^{++}]_i &= -\frac{A_{cap} C_m}{V_{myo} F} [I_{Ca,t} - 2I_{NaCa}].
\end{aligned} \tag{4}$$

We represent equation (4) by equation (5):

$$\begin{aligned}
\dot{x} &= -\left[x - 2xy - \frac{x^2}{\exp(t/\tau) + \exp(-t/\tau)} \right] \\
\dot{y} &= -(y + 3xy + 3zy) \\
\dot{z} &= -(z - 2zy). \\
\dot{u} &= \frac{x \sin \frac{2\pi}{\tau} t \cos \frac{2\pi}{\tau} t}{\exp(x) + \exp(-x)}
\end{aligned} \tag{5}$$

Where: τ is the relaxation time in an inactive medium.

Fig. 3 shows the time graphs of equation (5).

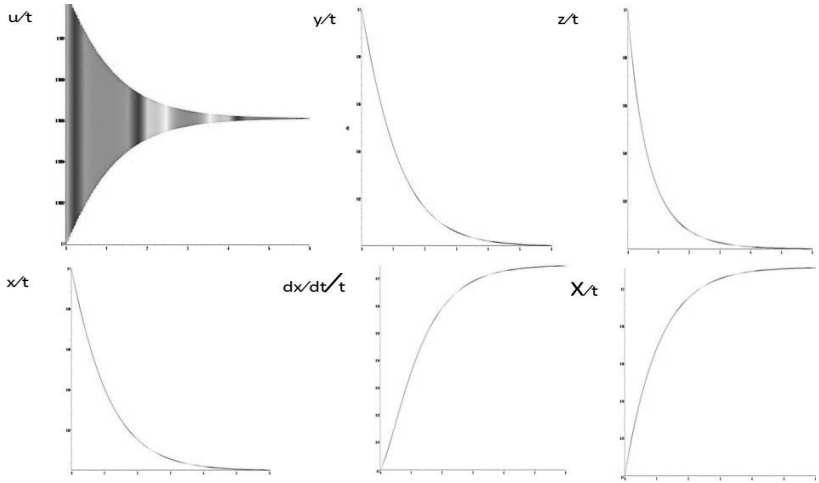


Fig. 3. The time graphs of equation (5) are presented, $u(t)$ is the time dynamics of the soliton, $(x,y,z)(t)$ is the time dynamics of equation (5), (dx/dt) is the derivative of $x(t)$, X is the integral of x ($t \dots 0 \rightarrow t$)

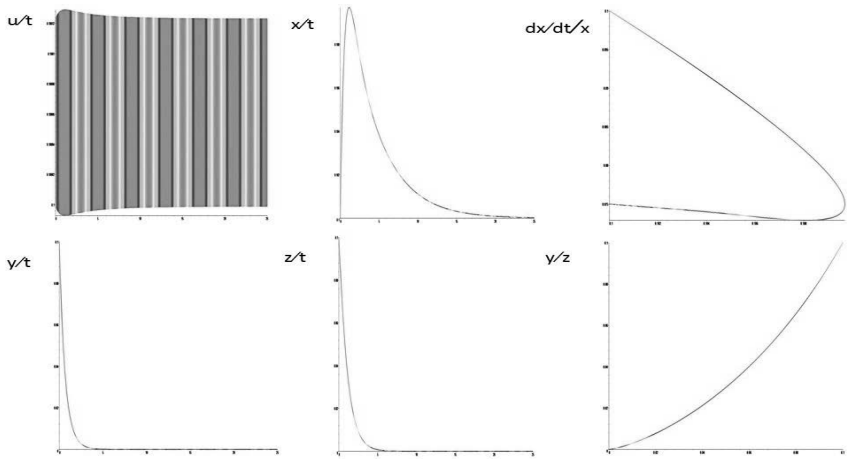


Fig. 4. The time graphs and phase portraits of equation (6) are presented, $a = 0.1$, $u(t)$ is the time dynamics of the soliton, $(x,y,z)(t)$ is the time dynamics of equation (5), (dx/dt) is the derivative of $x(t)$

In the third generation Hozhkin-Hasley ion model, to create an active medium, we introduce an active element ($a = 0.1$), equation (5) will take the form (6).

The introduction of an active element does not change the state of its relaxation state, but introduces white noise, which is observed in a soliton (Fig. 4).

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= - \left[x - 2xy - \frac{x^2}{\exp(t/\tau) + \exp(-t/\tau)} \right] + a \\
 \dot{y} &= - [y + 3xy + 3zy] \\
 4). \dot{z} &= - [z - 2zy]. \\
 \dot{u} &= \frac{x \sin \frac{2\pi}{\tau} t \cos \frac{2\pi}{\tau} t}{\exp(x) + \exp(-x)}
 \end{aligned} \tag{6}$$

In conclusion, this model (3) and its modifications (5, 6) can be used to study the behavior of passive neurons.

References

1. Hodgkin A.L.//Journal Physiol. (Lond.), v.117, 1952, P.500–544.
2. Pertsov A.M.//Journal Circ Res, v.72, 1993, P.631–650.
3. Jalife J.//Journal Cardiovasc Electrophysiol, v.9, 1998, P.S2–S12.
4. Luo C.H.//Journal Circ Res, v.68, 1991, P.1501–1526.
5. Mc Allister R.E.//Journal Physiol (Lond.), v.251, 1975, P.1– 59.
6. Luo C.H.//Journal Circ Res, v.74, 1994, P.1071–1096.
7. Zeng J.//Biophys Journal, v.68, 1968, P.949-964.

USIC NOTE RECORDING SYSTEMS AS STEGANOGRAPHIC CONTAINERS IN THE TASK OF ENSURING CONFIDENTIALITY OF ENTERPRISE INFORMATION RESOURCES

N.M. Kuznetsova

Moscow State University of Technology «STANKIN», Moscow, Russia
127055, Vadkovskii lane, 3a

Tel.: +7 (903)581-80-15, e-mail: knm87@mail.ru

Keywords: information security, automation, confidentiality, steganography, cryptography.

The use of steganographic methods in the task of ensuring the confidentiality of information resources is an effective way to achieve the data protection goal. However, steganography methods have a number of application limitations, in particular, the requirements for minimizing the amount of useful information relative to the size of the container. Today, the Least Significant Bit methods are considered the most effective in using container volume. These methods allow to use up to 1/8 of the container [1–5].

The article presents an approach that allows to increase the «useful volume» of a container, and thereby increase the effectiveness of steganography as a security method.

Figure 1 shows a functional model of an automated system for ensuring the confidentiality of enterprise information resources, the core of which is steganographic methods.

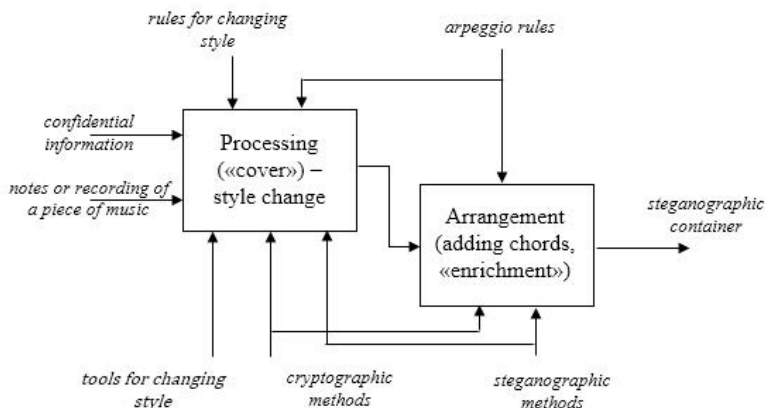


Fig. 1. Functional model of a steganographic automated system (in IDEF notation)

According to Figure 1, the «input» (according to IDEF-natation) of the steganographic automated system receives:

- confidential information;
- notes or recording of a piece of music.

The «methods» (according to IDEF-natation) are:

- tools for changing style of the music composition;

- cryptographic methods;
 - steganographic methods.
- «Control» (according to IDEF-natation) consists of:
- rules for changing style of the music composition;
 - arpeggio rules.

The «output» (according to IDEF-natation) is a steganographic container.

Figure 2 shows the algorithm for obtaining a steganographic container, which is a piece of music composition.

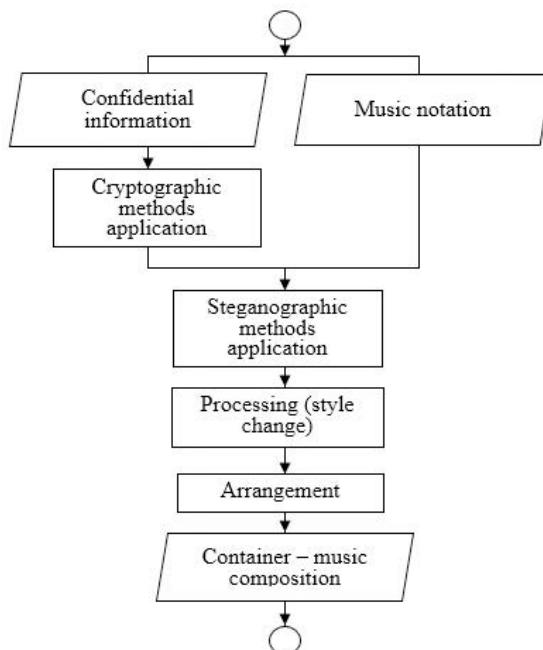


Fig. 2. Algorithm for obtaining a steganographic container – a piece of music composition

The functional model of a steganographic automated system and the algorithm for obtaining musical works as a steganographic container presented in the article increase the level of confidentiality of enterprise information resources.

References

1. Tatyana V. Karlova, Alexander Y. Bekmeshov, Natalia M. Kuznetsova. Protection the Data Banks in State Critical Information Infrastructure Organizations / Proceedings of the 2019 IEEE International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies» (IT&QM&IS), Sochi, Russia // Proceedings Edited by S. Shaposhnikov, St. Petersburg, Russia: Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», 2019, ISBN 9781728125947

2. Horev P.B. Hardware and software information security / P.B. Horev. - 2nd ed., Rev. and add. - M.: FORUM: INFA-M, 2019. – 352p. – (Higher education) ISBN 978 5 00091 709 1 (FORUM)
3. T.V. Karlova, A.Y. Bekmeshov, S.A. Sheptunov, N.M. Kuznetsova Methods Dedicated to Fight Against Complex Information Security Threats on Automated Factories Systems / 2016 IEEE Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&MQ&IS). – M.: «Quality», 2016. pp. 23-27. ISBN 978-5-94768-071-3
4. Kuznetsova N.M., Karlova T.V. Application of Digital Twin Technology for Modelling of Information Security Level of Industrial Plant // EPJ Web of Conferences Volume 248 (2021), V International Conference «Modeling of Nonlinear Processes and Systems» (MNPS-2020) Moscow, Russia Published online: 26 April 2021 id.02007 <https://doi.org/10.1051/epjconf/202124802007>
5. Nataliya M. Kuznetsova, Tatiana V. Karlova, Alexander Y. Bekmeshov Method of Timely Prevention from Advanced Persistent Threats on the Enterprise Automated Systems // 2022 International Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS)

PROTECTION OF INFORMATION RESOURCES OF THE ENTERPRISE BASED ON MODELING OF THE DATA SECURITY MANAGEMENT SYSTEM OF INTELLIGENCE-INTENSIVE PRODUCTS

N.M. Kuznetsova^{1a}, T.V. Karlova^{1b,2}, A.Yu. Bekmeshov^{1c,2},
A.S. Sheptunov^{1d,2}, A.E. Tikhomirov^{2a}

¹Moscow State University of Technology «STANKIN», Moscow, Russia
127055, Vadkovskii lane, 3a

^aTel.: +7 (903)581-80-15, e-mail: knm87@mail.ru

^bTel.: +7 (903)776-90-78, e-mail: karlova-t@yandex.ru

^cTel.: +7 (926)582-34-35, e-mail: b-a-y-555@yandex.ru

^dTel.: +7 (903)166-83-56, e-mail: 1668356@gmail.com

²Institute for Design-Technological Informatics RAS, Moscow, Russia
127055, Vadkovskii lane, 18, building 1A

^aTel.: +7 (962)959-99-96, e-mail: alexey.tikhomirov@list.ru

Keywords: automation, information security, modelling, data protection, intelligent data.

Strategically important resources of modern industrial enterprises are intellectual resources. Possession of this type of resource improves the quality of manufactured products, minimizes losses, and, as a result, ensures the competitiveness of the enterprise. In addition, possession of intellectual data stimulates the enterprise's workforce to be creative and generate new ideas. Therefore, an actual problem is to ensure the proper level of security of intellectual data.

The formation of a model of a system for organizing the security of enterprise resources generally includes three levels of information security management:

- protection of design documentation of developments at all stages of the product life cycle, including software and mathematical support;
- protection from the influence of information manipulation technologies in relation to highly professional human resources;
- protection of materialized objects of science-intensive products (at the level of research and testing).

At the same time, an important aspect is maintaining the proper level of availability of intellectual resources for legal users – employees of the enterprise [1–5].

Figure 1 shows the diagram of the security of an enterprise's intellectual resources – a model of a management system for ensuring the security of intellectual resources, based on methods of protection against unauthorized access (model 1).

The model of the intellectual resource security management system presented in Figure 1 (model 1) is the most effective from the point of view of data protection, but at the same time it is the least convenient from the point of view of its modernization.

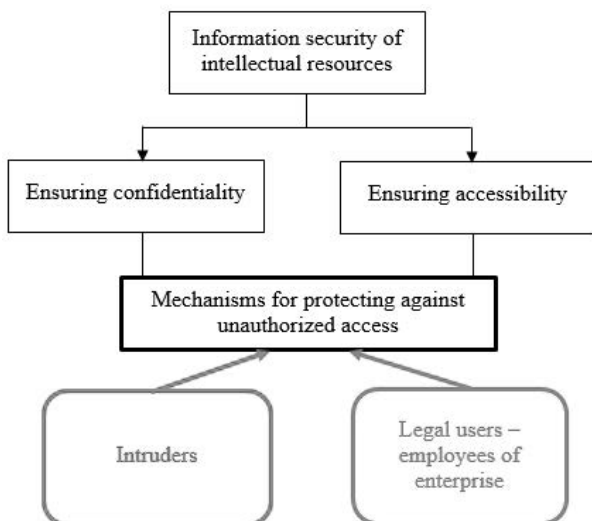


Fig. 1. Security scheme of enterprise intellectual resources (model 1)

Intelligent data is the most modifiable data – technologies are constantly improving and replacing each other. Therefore, the security management system model must include a mechanism for updating data.

The intelligent data updating mechanism should provide:

- checking new data;
- maintaining the integrity of the data structure when adding new ones or modifying existing ones.

Figure 2 shows the model of an intellectual resource security management system that takes into account the maximum number of security aspects.

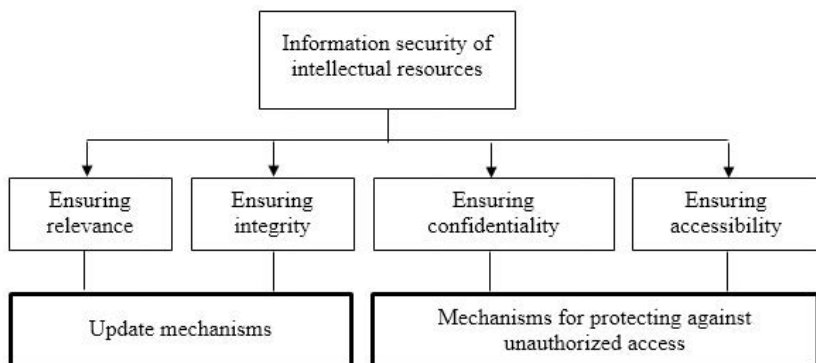


Fig. 2. Security scheme for intellectual resources, taking into account the maximum number of security aspects (model 2)

The use of the intellectual data security management system models presented in the article would increase the level of its protection, and as a result, increase the competitiveness of the enterprise.

References

1. Kuznetsova N.M., Karlova T.V., Bekmeshov A.Yu., Mihailova M.V. Automation of the Collection, Storage and Processing the Information Related to the Developments of High-Tech Industrial Products of High-Risk // The modelling of nonlinear processes and systems // The 6 International Science Conference (MNPS-2022). Conference proceedings / Под редакцией Л.А. Уваровой
2. N.M. Kuznetsova, T.V. Karlova, S.A. Sheptunov Automation of Data Defence Processes in the Corporation Information Systems / Proceedings of the 2017 International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies» (IT&QM&IS) September, 24–30, 2017 – Proceedings Edited by S.Shaposhnikov 2017 St.Peterburg, Russia: Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», pp. 199-202. ISBN 978-1-5386-0703-9.
3. Nataliya M. Kuznetsova, Tatiana V. Karlova, Alexander Y. Bekmeshov Method of Timely Prevention from Advanced Persistent Threats on the Enterprise Automated Systems // 2022 International Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS)
4. Tatyana V. Karlova, Alexander Y. Bekmeshov, Natalia M. Kuznetsova. Protection the Data Banks in State Critical Information Infrastructure Organizations / Proceedings of the 2019 IEEE International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies» (IT&QM&IS), Sochi, Russia // Proceedings Edited by S. Shaposhnikov, St. Petersburg, Russia: Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», 2019, ISBN 9781728125947
5. T.V. Karlova, A.Y. Bekmeshov, S.A. Sheptunov, N.M. Kuznetsova Methods Dedicated to Fight Against Complex Information Security Theats on Automated Factories Systems / 2016 IEEE Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&MQ&IS). – M.: «Quality», 2016. pp. 23–27. ISBN 978-5-94768-071-3

NANOBIOELECTRONICS AND QUANTUM CALCULATIONS

V.D. Lakhno

Institute of Mathematical Problems of Biology RAS – the Branch of Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences

e-mail: lak@impb.ru

Keywords: DNA, data bases, charge transfer, biocomputer

Bioinformatics is the area that develops methods and software tools for understanding of biological data, which includes sequence analysis, gene and protein expression, analysis of cellular organization, structural bioinformatics, data centers etc. A new and more general direction is to consider bioinformatics as informatics on the bases of nanobioelectronics and biocomputer technologies.

DNA molecular is an important example of data storage and biocomputing.

The thermodynamics of DNA double strand in the Peyrard-Bishop-Dauxois model is considered [1]. Performing millions of operations simultaneously DNA – biocomputer allows the performance rate to increase exponentially. The limitation problem is that each stage of paralleled operations requires time measured hours or days. To overcome this problem can nanobioelectronics [2–4].

The central problem of nanobioelectronics is the realization of effective charge transfer in biomacromolecules. The most promising molecule for this goal is DNA. Computer simulation of charge transfer can make up natural experiment in such complex object as DNA. Such processes of charge transport as Bloch oscillations, soliton evolution, polaron dynamics, breather creation and breather inspired charge transfer are modeled. The supercomputer simulation of charge dynamics at finite temperatures is presented. A guanine-based DNA quadruplexes doped with two electrons (holes) is considered as a single qubit for performing quantum computations. Using the Hubbard Hamiltonian, dynamic equations are obtained to simulate the dynamics of quantum qubit on classical computer. Different molecular devices based on DNA are considered. These make the basis for solution of informatics problems on biomolecular technologies.

References

1. I.V. Likhachev*, A.S. Shigaev, V.D. Lakhno On the thermodynamics of DNA double strand in the Peyrard-Bishop-Dauxois model, *Physics Letters A* 510 (2024) 129547
2. V.D. Lakhno, DNA Nanobioelectronics, *Int. J. Quantum Chem.*, v.108, p. 1970-1981, 2008
3. V.D. Lakhno, Theoretical basis of Nanobioelectronics, *EPJ Web of Conferences*, **226**, 01008, 2020
4. V.D. Lakhno, A.V. Vinnikov, Molecular devices based on DNA, *MBB*, v. 16, p. 115-135, 2021

NUMERICAL APPROXIMATION OF TWO-DIMENSIONAL STOCHASTIC NEURAL FIELD EQUATIONS WITH FINITE TRANSMISSION SPEED

P.M. Lima and T. Sequeira

Centro de Matemática Computacional e Estocástica, Instituto Superior Técnico,

Lisboa, Portugal

e-mail: plima@math.tecnico.ulisboa.pt

Neural field equations are intended to model the synaptic interactions between neurons in a continuous neural network, called a neural field [1, 2]. This kind of integrodifferential equations proved to be a useful tool for the spatiotemporal modeling of the neuronal activity from a macroscopic point of view, allowing the study of a wide variety of neurobiological phenomena, such as the processing of sensory stimuli.

The aim of the present talk is to study the effects of additive noise in one- and two-dimensional neural fields, while taking into account finite signal transmission speed.

A Galerkin-type method to approximate such models is presented, which applies the Fast Fourier Transformation to optimise the computational effort required to solve this type of equations. Numerical simulations obtained by this algorithm are presented and discussed.

References

1. Amari S.L., *Dynamics of pattern formation in lateral-inhibition type neural fields*, Biol. Cybernet., 27 (2), 1977. P. 77–87.
2. Wilson, H.R. and Cowan, J.D. Excitatory and inhibitory interactions in localized populations of model neurons, Bipophys. J., 12, 1972. P. 1–24.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ПЕРВОГО РОДА В ДИСПЕРСНОЙ СРЕДЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДИФИКАЦИИ АЛГОРИТМА ХОШЕНА–КОПЕЛЬМАНА

MODELING OF PHASE TRANSITIONS OF THE FIRST KIND IN DISPERSED MEDIA USING THE MODIFICATION OF THE HOSHEN-KOPELMAN ALGORITHM

Пхью Вэй Лин

МГТУ «СТАНКИН»

Рассмотрение фазового перехода первого рода в дисперсных системах является актуальным ввиду распространённости дисперсных систем, а также в связи с эффективным использованием нано- и мезоструктур в различных технологиях. В настоящей работе моделируется фазовый переход вблизи поверхности перехода, что представляется наиболее интересным. В жидкой фазе для определения координат молекул предлагается уравнение с потенциалом Бакингема. На гиббсовской поверхности раздела узлы могут быть размещены в соответствии с функцией распределения, зависящей в общем случае от импульса, координаты, времени, температуры. При рассмотрении перфорированного покрытия узлы располагаются в соответствии с отверстиями. В этом случае в предположении очень малых отверстий не требуется определять корреляционную функцию, что упрощает задачу. В общем случае можно рассматривать как молекулярное, так и кластерное испарение.

Моделирование испарения или сублимации в приповерхностном слое может быть проведено с использованием модификации перколяционного алгоритма Хошена – Копельмана. Рассмотрим модификацию более подробно. Узлы решётки расположены друг от друга на расстоянии числа Кнудсена $\frac{Kn}{2}$. Поскольку длина свободного пробега зависит от температуры, то $Kn = Kn(T)$. Занятые узлы распределяются согласно вероятности q_g .

Вероятность определяется согласно функции распределения, например, функции распределения Максвелла. В общем случае, в приповерхностном слое, кроме молекул газа, могут находиться молекулы или наночастицы постороннего вещества – примеси. Таким образом, в узлах в приповерхностном слое стоят следующие обозначения: 0 – пустой узел, 3 – молекула примеси, 2 – молекула воздуха, 1 – молекула пара. Следовательно, для исследования возможных структур в ограниченной области вблизи мезо- или наноструктуры с испаряющейся поверхностью, используется модификация алгоритма Хошена–Копельмана, в котором метки относятся к 4 видам узлов вместо двух [1]. Кроме того, поскольку процесс изменяется в зависимости от числа Кнудсена, то в общем случае необходимо учитывать столкновение молекул. Сначала область внешней среды разбивается на квадраты размером $\frac{Kn}{2}$. Затем положение узлов выбирается в каждой клетке случайным образом. Далее узлы заполняются и начинается процедура определения структуры: образования кластеров. Может оказаться, что расстояние между некоторыми заполненными узлами расстояние $r < r_{min}$. Тогда для текущего узла возможны следующие случаи:

1. Вблизи, но на расстоянии больше, чем соответствующее условие $r < r_{min}$, имеется пустой узел. Тогда в него переходит соответствующая молекула 1, 2 или 3, а текущий узел становится свободным;

2. Вблизи текущего узла нет свободных узлов. Тогда текущий узел или оба узла, расстояние между которыми меньше r_{min} , переходят в новое положение внутри квадратов так, чтобы выполнялось условие в безразмерном виде $\frac{r}{r_{min}} > 1$.

В процессе поиска кластеров система узлов может изменяться, т. к. учитывается динамика процесса. Модификация алгоритма Хошена–Копельмана предполагает введение трех видов занятых узлов в соответствии с вероятностями q_g, q_{v1}, q_{v2} .

После определения кластеров можно определить энтропию Колмогорова–Синая для данной системы:

$$H(Q) = - \sum_{i=1}^N p(Q_i) \log p(Q_i),$$

где $Q = Q_1 \cup Q_2 \cup \dots \cup Q_r$ – разбиение на кластеры, а также можно определить термодинамические функции.

Данный подход может быть использован для исследования характеристик и структуры фазовых переходов вблизи поверхности в системах «жидкость–газ» и «твёрдое тело – газ» при различных внешних условиях.

Литература

1. Тарасевич Ю.Ю. Перколяция: теория, приложения, алгоритмы: учебное пособие / Ю.Ю. Тарасевич. – Москва: Едиториал УРСС, 2002.

APPLICATION OF SINGULAR VALUE DECOMPOSITION IN NEURAL MACHINE TRANSLATION OPTIMIZATION

A.I. Makars, N.V. Eliseeva

Moscow State University of Technology «STANKIN», Moscow, Russia,

127055, Vadkovskii lane, 3a

E-mail: arturmakars@mail.ru

In the era of globalization and digital transformation, the demand for precise and rapid text translation is increasing exponentially. Traditional machine translation methods, such as statistical machine translation (SMT) and rule-based machine translation (RBMT), encounter limitations in conveying complex semantic structures and various linguistic nuances [1, 2]. Neural machine translation (NMT), based on artificial neural networks, offers a fundamentally new approach to addressing these challenges. NMT is founded on the concept of training a model to transform sequences of words from the source language into sequences of words in the target language, taking into account intricate nonlinear dependencies and contextual relationships between them [3].

Problem Statement and Mathematical Model

The task of machine translation is formulated as a conditional probability modeling problem of sequences. For a given input sentence in the source language $X = (x_1, x_2, \dots, x_{T_x})$, it is required to generate an output sentence in the target language $Y = (y_1, y_2, \dots, y_{T_y})$, by maximizing the conditional probability $P(Y | X)$ [4, 5]:

$$Y^* = \operatorname{argmax} P(Y | X; \theta), \quad (1)$$

where θ – represents the model parameters.

The primary objective is to optimize the parameters θ using the maximum likelihood method on the training corpus:

$$\theta^* = \operatorname{argmax} \sum_{(X,Y)} \log P(Y | X; \theta). \quad (2)$$

Model Architecture and Attention Mechanism

The classical architecture of Neural Machine Translation (NMT) comprises an encoder and a decoder, both typically implemented using Recurrent Neural Networks (RNNs), Convolutional Neural Networks (CNNs), or Transformers [6]. The encoder transforms the input sequence X into a set of hidden states $H = (h_1, h_2, \dots, h_{T_x})$. The decoder generates the output sequence by utilizing information from H and the previously generated words [7].

The Attention Mechanism enables the decoder to dynamically focus on different parts of the input sequence when generating each word [8,9]. The context vector c_t at step t is computed as a weighted sum of the encoder's hidden states:

$$c_t = \sum_{i=1}^{T_x} \alpha_{t,i} h_i, \quad (3)$$

where the attention coefficients $\alpha_{t,i}$ are defined as:

$$\alpha_{t,i} = \frac{\exp(e_{t,i})}{\sum_{k=1}^{T_x} \exp(e_{t,k})}, \quad (4)$$

and the attention score function $e_{t,i}$ is typically defined as:

$$e_{t,i} = \text{score}(s_{t-1}, h_i). \quad (5)$$

Proposed Method for Enhancing the Attention Mechanism

Consider an approach to the attention score function $\text{score}(s_{t-1}, h_i)$ that integrates semantic information through external embeddings and reduces computational complexity by optimizing matrix operations.

Standard scoring functions, such as additive or dot-product methods, can be enhanced by introducing semantic weights:

$$e_{t,i} = \text{score}(s_{t-1}, h_i) + \beta \text{sim}(h_i, h_j), \quad (6)$$

where $\text{sim}(h_i, h_j)$ – is a measure of semantic similarity between the states h_i and h_j , and β is a hyperparameter.

To decrease computational complexity, we introduce matrix weight decomposition using Singular Value Decomposition (SVD):

$$W = U \sum V^T, \quad (7)$$

which allows approximating large matrices with lower rank r , thereby reducing the number of computations from $O(n^2)$ to $O(nr)$.

Training Algorithm

The model is trained by minimizing the cross-entropy loss function:

$$L(\theta) = -\sum_{t=1}^{T_y} \log P(y_t | y_{<t}, X; \theta). \quad (8)$$

Parameter optimization is performed using stochastic gradient descent and its adaptive variants, such as Adam or RMSprop. To ensure convergence and prevent overfitting, regularization methods are employed:

- Dropout: randomly deactivating neurons with probability p ;
- L2 Regularization: adding a penalty for large weight values to the loss function [5, 10].

Experimental Evaluation

To evaluate the effectiveness of the proposed method, experiments were conducted on the WMT 2014 English-German corpus. The model was implemented using the PyTorch framework and trained on an NVIDIA Tesla T4 GPU with 16 GB of video memory.

Experiment Parameters:

- Vocabulary size: 16,000 tokens, obtained using Byte Pair Encoding (BPE);
- Embedding and hidden state dimensions: 256;
- Number of encoder and decoder layers: 4;
- SVD approximation rank r : 64.

Evaluation Metrics:

- BLEU: standard metric for translation quality;
- ROUGE: measures the overlap of phrases and structures between the translation and the reference;
- Время обучения: total time spent on training the model.

Table 1. Experiment Results

Model	BLEU	ROUGE	Training Time (h)
Base transformer	22.8	13.3	36
Transformer with proposed method	24.1	14.2	28

Analysis of Results

The results indicate that the use of the proposed method leads to an improvement in translation quality by 1.3 BLEU points and 0.9 ROUGE points compared to the baseline model. Additionally, the reduction in training time by more than 20% demonstrates the effectiveness of optimizing computational complexity.

Conclusion

This study presents a method for enhancing the attention mechanism in neural machine translators by integrating semantic information and optimizing matrix operations. Experimental results demonstrate an improvement in translation quality and a reduction in computational complexity, thereby making the model more efficient for practical applications.

References

1. Loseva, S. A. (2022). Translation and Artificial Intelligence: Problems and Ways of Development.
2. Tagusheva, N. Y. (2015). Machine Translation. In Proceedings of the Scientific and Practical Conference "Lomonosov 2015". Moscow: Moscow State University.
3. Wang, X., Tu, Z., & Zhang, M. (2018). Incorporating statistical machine translation word knowledge into neural machine translation. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 26 (12), 2255–2266.
4. Kingma, D. P., and Ba, J. "Adam: A method for stochastic optimization." *arXiv preprint arXiv:1412.6980* (2014).
5. Kudo, T., and Richardson, J. "SentencePiece: A simple and language-independent subword tokenizer and detokenizer for neural text processing." *EMNLP* (2018): 66-71.
6. Zhang, Z., Liu, S., Li, M., Zhou, M., & Chen, E. (2018). Bidirectional generative adversarial networks for neural machine translation. In *Proceedings of the 22nd Conference on Computational Natural Language Learning*, pp. 190–199, Brussels, Belgium. Association for Computational Linguistics.
7. Stern, M., Chan, W., Kiros, J. R., & Uszkoreit, J. (2019). Insertion Transformer: Flexible sequence generation via insertion operations. *arXiv preprint arXiv:1902.03249*.
8. Stahlberg, F., Saunders, D., de Gispert, A., & Byrne, B. (2019). In *Proceedings of the Fourth Conference on Machine Translation: Shared Task Papers*. Association for Computational Linguistics.
9. Medina, J. R., & Kalita, J. (2018). Parallel attention mechanisms in neural machine translation. In *2018 17th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA)*, pp. 547–552.
10. McCandlish, S., Kaplan, J., Amodei, D., & Team, O. D. (2018). An empirical model of large-batch training. *arXiv preprint arXiv:1812.06162*.

MATHEMATICAL MODEL AND CONTROL OF AN INVERTED PENDULUM

M. Mosquera Mena

UTE University, Quito, Ecuador

Bourgeois y Rumipamba s/n

Tel.: (+34) 647138728, e-mail: mmme103924@ute.edu.ec

F.R. Freire Carrera

UTE University, Quito, Ecuador

Bourgeois y Rumipamba s/n

Tel.: (+593) 995800212, e-mail: ffreire@ute.edu.ec

Abstract. The mathematical modeling and control of the inverted pendulum is a fairly extended case study due to the nonlinearity of the system, its inherent instability in the equilibrium position and sensitivity to external disturbances. Numerous variations of this problem exist, as well as approaches for obtaining the model and design of control strategies. This work proposes the derivation of the mathematical model and control strategy design of a variant of the inverted pendulum capable of rotating about two axes, mounted at the end of a five-bar mechanism. The approach involves certain simplifications and a strategy to decompose the mechanism into decoupled subsystems, resulting in a linearized mathematical model for a subsystem corresponding to each possible rotation of the inverted pendulum, and its subsequent simulation and control loop analysis.

Keywords: Modeling of dynamic systems, inverted pendulum, State-space.

1 Introduction

The control and modeling of the inverted pendulum is a classical control engineering problem due to its inherent instability at the equilibrium position, the nonlinearity of the dynamic model, and its sensitivity to external disturbances. This problem has been addressed using several approaches [3,4], such as classical control techniques employing PID controllers and state feedback [1,7], artificial intelligence algorithms [2,5,9], indirect state estimation methods [6,8], and models based on nonlinear and adaptive control structures [13,16]. In this work, the mathematical model and control strategy design of a variant of a rotational inverted pendulum [4,10,12] is developed and presented, consisting of two rotations of the pendulum base. To model the pendulum, simplifications were made to decompose the mechanism into two subsystems for subsequent analysis and development.

2 Methodology

A variety of inverted pendulum models exist, such as those analyzed and presented in studies [14,17], along with diverse control strategies [11]. The inverted pendulum variant proposed in this work consists of a two-degree-of-freedom system, with rotations about two mutually perpendicular axes, while the base is positioned at the end of a five-bar mechanism [15, 20] (Fig. 1).

The end of the five-bar mechanism moves within the plane perpendicular to the pendulum, thus it can balance the position of the pendulum through base movement along the X, Y axes. This mechanism employs actuators at joints R2 and R5, while joints R3, R4, R6, and R7 are passive, i.e., they rotate freely and are constrained solely by the mechanism's dynamics. This configuration results in an underactuated system, meaning, there are fewer inputs than degrees of freedom. The inverted pendulum is modeled as a point mass m located

at the center of mass of the rod p , which rotates around the X and Y axes. Links $L2$, $L3$, $L4$, $L5$, and p are assumed to be rigid bodies with their center of mass at their geometric center, while link $L1$ in the five-bar mechanism serves as the frame of reference.

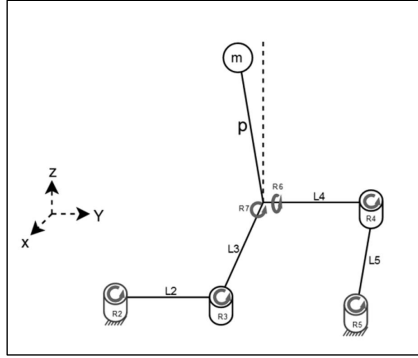


Fig. 1. Inverted pendulum with two degrees of rotation on a five-bar mechanism

The approach to modeling and control design involves separating the process into two subsystems (Fig. 2). The plant can be considered as the superposition of two independent one-degree-of-freedom of rotation inverted pendulum subsystems, each mounted on a two-bar mechanism with a rotational joint. This decomposition reduces the complexity of the system in terms of its dynamic analysis and control. Consequently, the analysis conducted for one of the subsystems is equally valid for the other.

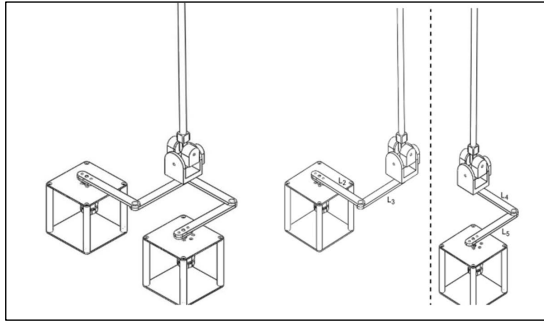


Fig. 2. Model decomposition into subsystems

By analyzing the forces acting on the pendulum (Fig. 3), it can be observed that the force F_m is transmitted through link $L3$, tangentially from the end of arm $L2$ to the base of the inverted pendulum. It is known that if an element is constrained only at its ends and no forces or torques are applied at any other point along its length, the force is transmitted along the direction of the element. Considering the system's motion, restricted to small displacements from its original position, and based on the analysis done for link $L3$, a simplification of the mechanism is introduced to facilitate modeling. The system is treated as an inverted pendulum mounted on a rotary arm orthogonal to it, which corresponds to the Furuta pendulum model [18,19].

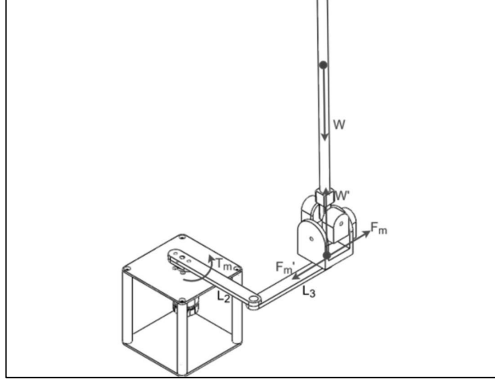


Fig. 3. Analysis of forces acting on the inverted pendulum

The following outlines the procedure for deriving the Furuta pendulum model.

Definition of Generalized Coordinates (q)

$\theta(t)$: rotary arm angular position

$\alpha(t)$: Angular position of the inverted pendulum about the vertical axis

$$q = [\theta(t), \alpha(t)] \quad (1)$$

qd : first-order time derivative of the generalized coordinates (angular velocities).

$$qd = \left[\frac{d}{dt} \theta(t), \frac{d}{dt} \alpha(t) \right]. \quad (2)$$

Homogeneous transformation matrix from the origin of coordinates to the end of the rotary arm $T_{0,2}$

- Rotation in the Z-axis an angle Θ .
- Translation along the Y-axis by a distance Lb (length of the rotary arm).

$$T_{0,2} = T_{y1,Lb} R_{Z0,\theta}. \quad (3)$$

Homogeneous transformation matrix from the end of the rotary arm to the center of mass of the inverted pendulum.

- Rotation in the Y-axis an angle α .
- Translation along the Z-axis by a distance lp (length from the end of the arm to the center of mass of the pendulum).

$$T_{2,4} = T_{Z3,lp} R_{Y2,\alpha}. \quad (4)$$

Therefore, the resulting transformation matrix from the coordinate origin to the center of mass of the pendulum.

$$T_{0,4} = T_{2,4} T_{0,2}, \quad (5)$$

$$T_{0,4} = \begin{bmatrix} \cos(\theta(t)) \cos(\alpha(t)) - \sin(\theta(t)) \cos(\theta(t)) \sin(\alpha(t)) & \cos(\theta(t)) \sin(\alpha(t)) l_p - \sin(\theta(t)) L_b \\ \sin(\theta(t)) \cos(\alpha(t)) & \cos(\theta(t)) \sin(\theta(t)) \sin(\alpha(t)) & \sin(\theta(t)) \sin(\alpha(t)) l_p - \cos(\theta(t)) L_b \\ -\sin(\alpha(t)) & 0 & \cos(\alpha(t)) & \cos(\alpha(t)) l_p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Absolute Cartesian coordinates of the center of gravity of the inverted pendulum

The absolute Cartesian coordinates of the center of mass, in terms of the generalized coordinates, are specified in the first three rows of the final column of the transformation matrix. $T_{0,4}$ i.e.,

$$x_p = \cos(\theta(t)) \sin(\alpha(t)) l_p - \sin(\theta(t)) L_b. \quad (7)$$

$$y_p = \sin(\theta(t)) \sin(\alpha(t)) l_p + \cos(\theta(t)) L_b. \quad (8)$$

$$z_p = \cos(\alpha(t)) l_p. \quad (9)$$

From these expressions, the absolute Cartesian velocities can be obtained as the first derivative with respect to time of each one.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} x_p(t) = & -\left(\frac{d}{dt} \theta(t)\right) \sin(\theta(t)) \sin(\alpha(t)) l_p + \\ & + \cos(\theta(t)) \left(\frac{d}{dt} \alpha(t)\right) \cos(\alpha(t)) l_p - \left(\frac{d}{dt} \theta(t)\right) \cos(\theta(t)) L_b \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} y_p(t) = & \left(\frac{d}{dt} \theta(t)\right) \cos(\theta(t)) \sin(\alpha(t)) l_p + \\ & + \sin(\theta(t)) \left(\frac{d}{dt} \alpha(t)\right) \cos(\alpha(t)) l_p - \left(\frac{d}{dt} \theta(t)\right) \sin(\theta(t)) L_b \end{aligned} \quad (11)$$

$$\frac{d}{dt} z_p(t) = -\left(\frac{d}{dt} \alpha(t)\right) \sin(\alpha(t)) l_p \quad (12)$$

Definition of state-space variables

Let $\underline{x}$ be the state vector defined as $\underline{x} = [X_1, X_2, X_3, X_4]^T$, where:

$$X_1 = \theta(t) \quad (13)$$

$$X_2 = \alpha(t) \quad (14)$$

$$X_3 = \frac{d}{dt} \theta(t) \quad (15)$$

$$X_4 = \frac{d}{dt} \alpha(t) \quad (16)$$

$\dot{\underline{x}}$ can be expressed as:

$$\dot{\underline{x}} = \begin{bmatrix} \frac{d}{dt} \theta(t) \\ \frac{d}{dt} \alpha(t) \\ \frac{d^2}{dt^2} \theta(t) \\ \frac{d^2}{dt^2} \alpha(t) \end{bmatrix} \quad (17)$$

The output vector $\underline{v}$ is defined as equal to the state vector $\underline{x}$.

$$\underline{v} = \underline{x} \quad (18)$$

Finally, for the input vector $\underline{u}$, the only input is taken as the torque τ_m produced by a motor on the rotary arm.

$$\underline{u} = [\tau_m] \quad (19)$$

Total potential and kinetic energy of the system

The potential energy (U) and kinetic energy (T) of the system were calculated to obtain the Lagrangian.

$$L = T - U \quad (20)$$

The gravitational potential energy is with respect to the center of mass of the pendulum.

Kinetic energy is due to the rotation of the arm (Θ), the rotation of the pendulum (α), and the translation in the Cartesian coordinates (x_p, y_p, z_p), the resulting Lagrangian is:

$$L = \frac{J_b \left(\frac{d}{dt} \theta(t) \right)^2}{2} + \frac{J_p \left(\frac{d}{dt} \alpha(t) \right)^2}{2} + \frac{mp \left(\frac{d}{dt} x_p(t)^2 + \frac{d}{dt} y_p(t)^2 + \frac{d}{dt} z_p(t)^2 \right)}{2} - m_p g \cos(\alpha(t)) l_p \quad (21)$$

Where:

mp : mass of the pendulum.

J_b : moment of inertia of the rotary arm.

J_p : moment of inertia of the pendulum.

g : gravitational acceleration.

Generalized forces Q_i .

Only the force corresponding to the motor torque τ_m is considered as non-conservative force, while viscous friction in the joints of the arm and the pendulum is neglected. Thus, we have:

$$\underline{Q} = \begin{bmatrix} \tau_m \\ 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

Euler-Lagrange equations

The definition of the Euler-Lagrange equations for a system with N degrees of freedom is given by the following equation:

$$\frac{\delta}{\delta t} \left(\frac{\delta}{\delta \dot{q}_i} L \right) - \left(\frac{\delta}{\delta q_i} L \right) = Q_i \quad (23)$$

for $i = 1$ through N .

Therefore, two equations of motion are obtained for this system:

$$\begin{aligned} \tau_m = & \left(\frac{d}{dt} \alpha(t) \right)^2 L_b l_p m_p \sin(\alpha(t)) + 2 \left(\frac{d}{dt} \theta(t) \right) \left(\frac{d}{dt} \alpha(t) \right) \sin(\alpha(t)) \cos(\alpha(t)) l_p^2 m_p + \\ & \left(-l_p^2 m_p \cos(\alpha(t))^2 + (L_b^2 + l_p^2) m_p + J_b \right) \left(\frac{d^2}{dt^2} \theta(t) \right) - \left(\frac{d^2}{dt^2} \alpha(t) \right) L_b l_p m_p \cos(\alpha(t)) \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} 0 = & (l_p^2 m_p + J_p) \left(\frac{d^2}{dt^2} \alpha(t) \right) - \left(\frac{d}{dt} \theta(t) \right)^2 \sin(\alpha(t)) \cos(\alpha(t)) l_p^2 m_p - \\ & - \left(\frac{d^2}{dt^2} \theta(t) \right) L_b l_p m_p \cos(\alpha(t)) - m_p g \sin(\alpha(t)) l_p. \end{aligned} \quad (25)$$

Non-Linear state equations

Trigonometric functions are linearized around an operating point close to the unstable equilibrium of the inverted pendulum, that is, $\alpha = 0, \dot{\alpha} = 0$.

Substituting the above equations with the previously defined state variables and solving for $\dot{x}_3$ y $\dot{x}_4$:

$$\begin{aligned}\dot{x}_3 = & \left(\frac{lb \, lp^3 \, mp^2 \sin(x_2(t)) \cos(x_2(t))^2}{\sigma_1} \right) x_3(t)^2 - \\ & - \left(\frac{2 \, lp^4 \, mp^2 + 2 \, lp \, lp^2 \, mp}{\sigma_1 \, 2} \right) \sin(2 \, x_2(t)) x_3(t) x_4(t) - \\ & - \left(\frac{2 \, lb \, lp^3 \, mp^2 + 2 \, lp \, lb \, lp \, mp}{\sigma_1 \, 2} \right) \sin(x_2(t)) x_4(t)^2 + \frac{g \, lb \sin(2 \, x_2(t)) \, lp^2 \, mp^2 + 2 \, U_1 \, lp^2 \, mp + 2 \, lp \, U_1}{\sigma_1 \, 2}\end{aligned}\quad (26)$$

Where:

$$\begin{aligned}\sigma_1 = & lb \, lp + lp^4 \, mp^2 - lp^4 \, mp^2 \cos(x_2(t))^2 + lb^2 \, lp^2 \, mp^2 + lb \, lp^2 \, mp + lp \, lb^2 \, mp + \\ & + lp \, lp^2 \, mp - lb^2 \, lp^2 \, mp^2 \cos(x_2(t))^2 - lp \, lp^2 \, mp \cos(x_2(t))^2 \\ \dot{x}_4 = & \frac{lp \, mp \left(\frac{lp^3 \, mp \sin(2 \, x_2(t))}{2} - \frac{lp^3 \, mp \sin(4 \, x_2(t))}{4} + lb \, lp \sin(2 \, x_2(t)) + lb^2 \, lp \, mp \sin(2 \, x_2(t)) \right)}{\sigma_1} x_3(t)^2 - \\ & \left(\frac{lp \, mp \, (lb \, lp^2 \, mp \sin(x_2(t)) + lb \, lp^2 \, mp \sin(3 \, x_2(t)))}{\sigma_1} \right) x_3(t) x_4(t) - \left(\frac{lb^2 \, lp^2 \, mp^2 \sin(2 \, x_2(t))}{\sigma_1} \right) x_4(t)^2 + \\ & \frac{lp \, mp \left(2 \, lb \, g \sin(x_2(t)) + 2 \, U_1 \, lb \cos(x_2(t)) + 2 \, g \, lb^2 \, mp \sin(x_2(t)) + \frac{3 \, g \, lp^2 \, mp \sin(x_2(t))}{2} - \frac{g \, lp^2 \, mp \sin(3 \, x_2(t))}{2} \right)}{\sigma_1}\end{aligned}\quad (27)$$

Where:

$$\sigma_1 = 2 \left(lb \, lp + lp^4 \, mp^2 - lp^4 \, mp^2 \cos(x_2(t))^2 + lb^2 \, lp^2 \, mp^2 + lb \, lp^2 \, mp + lp \, lb^2 \, mp + \right. \\ \left. + lp \, lp^2 \, mp - lb^2 \, lp^2 \, mp^2 \cos(x_2(t))^2 - lp \, lp^2 \, mp \cos(x_2(t))^2 \right)$$

Thus, two of the four nonlinear state equations are obtained, while the remaining equations can be derived from the definition of $\underline{\dot{x}}$ as:

$$\underline{\dot{x}}_1 = x_3 \quad (28)$$

$$\underline{\dot{x}}_2 = x_4 \quad (29)$$

Linearization

To express the model in state-space form and subsequently design linear control techniques, it is necessary to linearize the system.

The nonlinear state equations derived in (26), (27), (28), and (29) are rewritten in a general form.

$$\dot{x}_1 = f_1(x_1, x_2, x_3, x_4, u_1) = f_1(\underline{x}, \underline{u}) \quad (30)$$

$$\dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2, x_3, x_4, u_1) = f_2(\underline{x}, \underline{u}) \quad (31)$$

$$\dot{x}_3 = f_3(x_1, x_2, x_3, x_4, u_1) = f_3(\underline{x}, \underline{u}) \quad (32)$$

$$\dot{x}_4 = f_4(x_1, x_2, x_3, x_4, u_1) = f_4(\underline{x}, \underline{u}) \quad (33)$$

A more compact representation can be written as:

$$\underline{\dot{x}} = \underline{f}(\underline{x}, \underline{u}) \quad (34)$$

Assuming the system will be controlled around an equilibrium operating point $\underline{x}_0$ and only within a small displacement δx around this point. Considering that at equilibrium $\dot{x}_i = 0$ for all i , the equilibrium values for the state variables can be calculated as follows:

$$0 = \dot{x}_{10} = f_1(\underline{x}_0, \underline{u}_0) \quad (35)$$

$$0 = \dot{x}_{20} = f_2(\underline{x}_0, \underline{u}_0) \quad (36)$$

$$0 = \dot{x}_{30} = f_3(\underline{x}_0, \underline{u}_0) \quad (37)$$

$$0 = \dot{x}_{40} = f_4(x_{40}, u_{40}) \quad (38)$$

A system of four equations in terms of $x_{10}, x_{20}, x_{30}, x_{40}, u_{10}$, can be solved by assuming $u_{10}=0$. The solution is obtained as follows:

$$x_{30} = 0 \quad (39)$$

$$x_{40} = 0 \quad (40)$$

The value of x_{20} can be either 0 rad or π rad, indicating that the system has two equilibrium positions: when the pendulum is in its upright or downward vertical position. For this analysis, 0 rad is chosen, as the control is intended for the unstable equilibrium position.

The value of x_{10} cannot be derived from the system of equations, implying that the system's stability does not depend on x_{10} , i.e., θ . Thus $x_{10} = 0$ is selected.

Once the equilibrium values of the state variables are determined, the system can be linearized using a Taylor series expansion generalized for a multivariable function:

$$\delta \dot{x}_i = \delta x_1 \left. \frac{\partial f_i}{\partial x_1} \right|_{\underline{x}_0, \underline{u}_0} + \delta x_2 \left. \frac{\partial f_i}{\partial x_2} \right|_{\underline{x}_0, \underline{u}_0} + \dots + \delta u_1 \left. \frac{\partial f_i}{\partial u_1} \right|_{\underline{x}_0, \underline{u}_0} + \dots \quad (41)$$

Expressed in matrix form:

$$\delta \dot{\underline{x}} = \begin{bmatrix} \frac{\delta f_1}{\delta x_1} & \frac{\delta f_1}{\delta x_2} & \dots & \frac{\delta f_1}{\delta x_n} \\ \frac{\delta f_2}{\delta x_1} & \frac{\delta f_2}{\delta x_2} & \dots & \frac{\delta f_2}{\delta x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\delta f_n}{\delta x_1} & \frac{\delta f_n}{\delta x_2} & \dots & \frac{\delta f_n}{\delta x_n} \end{bmatrix}_{\underline{x}_0, \underline{u}_0} \delta \underline{x} + \begin{bmatrix} \frac{\delta f_1}{\delta u_1} & \frac{\delta f_1}{\delta u_2} & \dots & \frac{\delta f_1}{\delta u_m} \\ \frac{\delta f_2}{\delta u_1} & \frac{\delta f_2}{\delta u_2} & \dots & \frac{\delta f_2}{\delta u_m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\delta f_n}{\delta u_1} & \frac{\delta f_n}{\delta u_2} & \dots & \frac{\delta f_n}{\delta u_m} \end{bmatrix}_{\underline{x}_0, \underline{u}_0} \delta \underline{u} \quad (42)$$

Abbreviated as:

$$\delta \dot{\underline{x}} = A_L(\underline{x}_0, \underline{u}_0) \delta \underline{x} + B_L(\underline{x}_0, \underline{u}_0) \delta \underline{u} \quad (43)$$

The linearized system expressed in state-space form is as follows:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{gL_b l_p^2 m_p^2}{J_{arm} l_p^2 m_p + J_p L_b^2 m_p + J_{arm} J_p} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{m_p l_p g (L_b^2 m_p + J_{arm})}{J_{arm} l_p^2 m_p + J_p L_b^2 m_p + J_{arm} J_p} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{l_p^2 m_p + J_p}{(l_p^2 m_p + J_p) J_{arm} + J_p L_b^2 m_p} \\ \frac{m_p l_p L_b}{J_{arm} l_p^2 m_p + J_p L_b^2 m_p + J_{arm} J_p} \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$D = [0]$$

$$\dot{\underline{x}} = A \underline{x} + B \underline{u} \quad (44)$$

$$\underline{v} = C \underline{x} + D \underline{u} \quad (45)$$

Control algorithm design

A fourth-order system was obtained. With the system expressed in state-space equations, controllability analysis was carried out, followed by the design of the control loop.

It is not necessary to perform an observability analysis since all the states are physically measurable.

The dimensions and physical characteristics such as lengths, masses, or moments of inertia of the elements were calculated using the mechanical modeling software SolidWorks, after creating the 3D model of the mechanism components as shown in (Fig. 4).

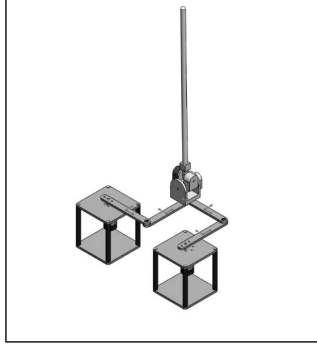


Fig. 4. CAD modeling of the two-degree-of-rotation inverted pendulum system

Thus, the values for the components are:

- J_b : 0.011 Kg m² (46)
- J_p : 0.0068 kg m² (47)
- L_b : 0.14 m (48)
- L_p : 0.161 m (49)
- m_p : 0.168 Kg (50)
- g : 9.81 m/s² (51)

Resulting in the system:

$$\dot{\underline{x}} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & FC_{32} & 0 & 0 \\ 0 & FC_{42} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ FC_{35} \\ FC_{45} \end{bmatrix} u \quad (52)$$

$$v = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + [0]u \quad (53)$$

$$FC_{32} = \frac{g l_b l_p^2 m_p^2}{J_{arm} l_p^2 m_p + J_p l_b^2 m_p + J_{arm} J_p} = 6.9452 \quad (54)$$

$$FC_{42} = \frac{m_p l_p g (L_b^2 m_p + J_{arm})}{J_{arm} l_p^2 m_p + J_p l_b^2 m_p + J_{arm} J_p} = 26.1574 \quad (55)$$

$$FC_{35} = \frac{l_p^2 m_p + J_p}{(l_p^2 m_p + J_p) J_{arm} + J_p l_b^2 m_p} = 76.90 \quad (56)$$

$$FC_{45} = \frac{m_p l_p l_b}{J_{arm} l_p^2 m_p + J_p l_b^2 m_p + J_{arm} J_p} = 26.1178 \quad (57)$$

A controllability analysis can be performed by observing the system's block diagram, Figure 5. It is a under-actuated system; however, the control action affects all the system's state variables, making it possible to maintain the pendulum's equilibrium in the upright vertical position.

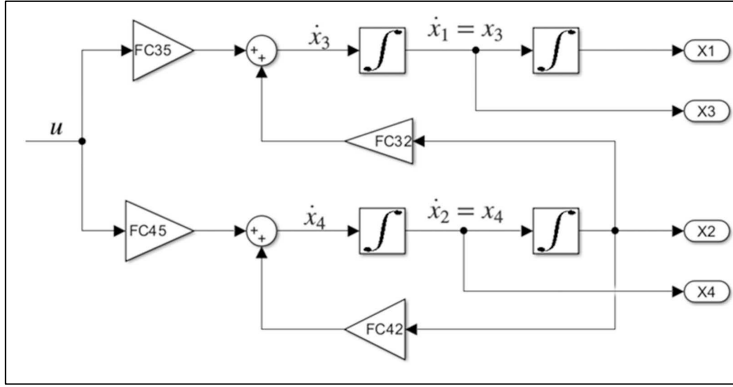


Fig. 5. Block diagram of the linearized mathematical model

The stability of the system can be determined by analyzing its characteristic equation, which is given by the eigenvalues of the matrix A .

$$|A - \lambda I| = 0 \quad (59)$$

From which the polynomial is obtained:

$$\lambda^4 - 26.1574\lambda^2 = 0 \quad (59)$$

With solutions:

$$\lambda_1 = 0 \quad (60)$$

$$\lambda_2 = 0 \quad (61)$$

$$\lambda_3 = 5,1144 \quad (62)$$

$$\lambda_4 = -5,1144 \quad (63)$$

From the eigenvalues of the characteristic equation, it is observed that the system is unstable due to three of its four poles ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$). A control loop is required to place the eigenvalues in the stability region. If the objective is to design a control loop that tracks a reference for the angle θ and rejects disturbances, it is necessary to implement integral control, as state feedback alone does not increase the system type.

For a state-space system, it is possible to move the system's eigenvalues to a desired position using a state feedback loop, as shown in the block diagram in Figure 6.

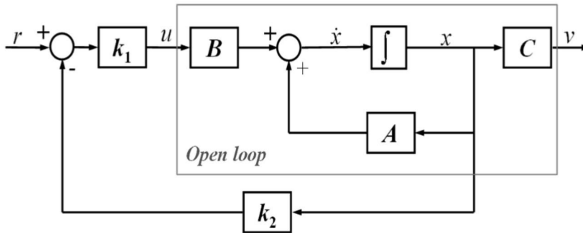


Fig. 6. State feedback block diagram

Open loop system:

$$\begin{aligned}\dot{\underline{x}} &= A \underline{x} + B \underline{u} \\ \underline{v} &= C \underline{x}\end{aligned}$$

State feedback system

$$\underline{u} = k_1 \underline{r} - k_2 \underline{x} \quad (64)$$

$$\underline{u} = k_1 \underline{r} - K \underline{x} \quad (65)$$

Let $K = k_1 k_2$, the feedback matrix that relates the states $\underline{x}$ to the inputs $\underline{u}$. k_1 is simply a gain to compensate for position error, and it can be set to '1'. Consequently, the state-space equation for the closed-loop system becomes:

$$\dot{\underline{x}} = A \underline{x} + B (k_1 \underline{r} - K \underline{x}); \quad \underline{v} = C \underline{x} \quad (66)$$

$$\dot{\underline{x}} = (A - BK) \underline{x} + B k_1 \underline{r}; \quad \underline{v} = C \underline{x} \quad (67)$$

In this new state equation, the eigenvalues are determined by $|(A - BK) - \lambda I| = 0$. By adjusting the values of the feedback matrix K ($K_1 K_2 \dots$), the eigenvalues can be placed in any desired position.

It has been observed that state feedback alone cannot track a specific reference, making it necessary to incorporate an integral action into the control loop. In a state feedback loop, the input $\underline{u}$ must depend solely on the states; thus, the input cannot be directly taken as the integral of the error, as is commonly done in classical control. Instead, the integrator must be included as an additional state of the system (x_I).

$$x_I = \int_0^t (r - v) dt \rightarrow \dot{x}_I = (r - v). \quad (68)$$

For convenience of signs $\dot{x}_I = v - r$ will be used, and the signs are inverted at the summation point to avoid affecting the system, as illustrated in the block diagram in Figure 7.

$$\dot{x}_I = v - r = C \underline{x} - \underline{r} \quad (69)$$

The augmented system with the new integrator state is expressed as follows:

$$\begin{pmatrix} \dot{\underline{x}} \\ \dot{x}_I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & 0 \\ C & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{x} \\ x_I \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B \\ 0 \end{pmatrix} \underline{u} + \begin{pmatrix} 0 \\ -I \end{pmatrix} \underline{r} \quad (70)$$

Rewriting it in another form:

$$\dot{\underline{x}'} = A' \underline{x}' + B' \underline{u} + G' \underline{r} \quad (71)$$

The control design is now carried out using the new matrices A' and B' , applying the same control law previously defined as $\underline{u} = -K \underline{x}'$.

$$\underline{u} = -(k_1 k_2 \dots k_n k_{I1} k_{I2} \dots) \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{I1} \\ \vdots \end{pmatrix} \quad (72)$$

The block diagram of the augmented system is depicted in Figure 7.

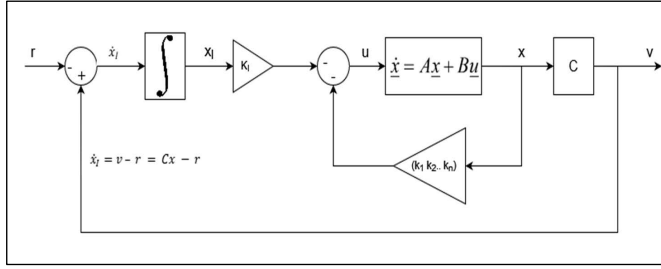


Fig. 7. State Feedback with Integrator State Block Diagram

The system with the newly augmented state becomes:

$$\begin{aligned} \dot{\underline{x}}' &= A' \underline{x}' + B' \underline{u} + G' \underline{r} ; \underline{v} = C' \underline{x}' \\ \dot{\underline{x}}' &= \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 6.9452 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 26.1574 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 76.90 \\ 26.1178 \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} r ; \underline{v} = C' \underline{x}' \end{aligned} \quad (73)$$

The eigenvalues of the new system are analyzed by evaluating the characteristic equation $|A' - \lambda I| = 0$.

Resulting in the polynomial:

$$\lambda^5 - 26.1574\lambda^3 = 0 \quad (74)$$

With eigenvalues:

$$\lambda_1 = 0 \quad (75)$$

$$\lambda_2 = 0 \quad (76)$$

$$\lambda_3 = 0 \quad (77)$$

$$\lambda_4 = 5,1144 \quad (78)$$

$$\lambda_5 = -5,1144. \quad (79)$$

Resulting in the same system, but of higher order, with only one additional eigenvalue at zero. By evaluating the controllability matrix, it is found to have full rank, thus the system is controllable.

$$C' = [B' A' B' A'^2 B' \dots A'^{n-1} B'] \quad (80)$$

Since it is a single-input system, for simplicity, the feedback gains were calculated by expressing the system in its controllable canonical form.

$$\begin{aligned} \dot{\underline{x}}_c &= A_c \underline{x}_c + B_c \underline{u} \\ A_c &= \begin{bmatrix} -a_1 & -a_2 & -a_3 & \dots & -a_n \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} ; B_c = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (81)$$

Where a_i are the coefficients of the system's characteristic polynomial:

$$s^n + a_1 s^{n-1} + a_2 s^{n-2} + \dots + a_n \quad (82)$$

From the expression $|A' - \lambda I| = 0$, we can obtain the coefficients a_i :

$$a_1 = 0; a_2 = 26.1574; a_3 = 0; a_4 = 0; a_5 = 0; \quad (83)$$

Now, the closed-loop equation, using the control law $\underline{u} = -K_c \underline{x}'_c$ yields:

$$A_c - B_c K_c = \begin{bmatrix} -a_1 - K_{c1} & -a_2 - K_{c2} & -a_3 - K_{c3} & -a_4 - K_{c4} & -a_5 - K_{c5} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (84)$$

With $a_i + K_{ci}$, the coefficients of the characteristic polynomial in the closed-loop. If the desired closed-loop eigenvalues λ_i , are known, the coefficients of the polynomial α_i can be calculated.

$$(s - \lambda_1)(s - \lambda_2) \cdots (s - \lambda_n) = s^n + \alpha_1 s^{n-1} + \alpha_2 s^{n-2} + \cdots + \alpha_n \quad (85)$$

Where $\alpha_i = a_i + K_{ci}$.

Since the control requirements do not specify a settling time or maximum overshoot, the desired poles can be chosen arbitrarily, as long as they lie within the stability region.

$$\lambda_1 = -13; \lambda_2 = -14; \lambda_3 = -1; \lambda_4 = -0.5; \lambda_5 = -2 \quad (86)$$

$$\begin{aligned} & s^5 + 30.5s^4 + 280s^3 + 732.5s^2 + 664s + 182 = \\ & = s^5 + \alpha_1 s^4 + \alpha_2 s^3 + \alpha_3 s^2 + \alpha_4 s + \alpha_5 \end{aligned} \quad (87)$$

From this:

$$K_c = [30.5 \ 280 \ 732.5 \ 664 \ 182] \quad (88)$$

In order to apply state feedback to the system in a physically meaningful way, the gain matrix K_c must be transformed from its controllable form to the original form of the system. To do this, the transformation matrix T is used, which is calculated as:

$$T = C_c C'^{-1} \quad (89)$$

Where C_c and C' are the controllability matrices of the system expressed in controllable canonical form and in its physical form (with the added integrator state), respectively.

$$C' = \begin{bmatrix} 0 & 77 & 0 & 181 & 0 \\ 0 & 26 & 0 & 683 & 0 \\ 77 & 0 & 181 & 0 & 4745 \\ 26 & 0 & 683 & 0 & 17870 \\ 0 & 0 & 77 & 0 & 181 \end{bmatrix}; C_c = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 26.15 & 0 & 684.21 \\ 0 & 1 & 0 & 26.15 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 26.15 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.083 & 0 \\ 0 & 0.0383 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.0005 & 0.0016 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0001 & -0.0005 \end{bmatrix} \quad (90)$$

$$K = K_c T \quad (91)$$

$$K = [-0.3628 \quad 12.7905 \quad -0.4044 \quad 3.2586 \quad -0.0944] \quad (92)$$

3 Results

Once the values for state feedback were obtained analytically, a simulated version of the two-degree-of-freedom inverted pendulum was implemented to validate the controller's performance. As shown in Figure 8, an assembly of the mechanism's moving components was created using the Multiphysics simulation environment 'Simulink-Simscape,' adding sensors to read the state variables at each time instant and connecting the controller's output (control action) directly to the system input.

Considering that the control design was done for one of the subsystems initially separated to facilitate the mathematical model and controller design, and that this separation was made into identical subsystems, with the control algorithm being applicable to both subsystems, the complete system has two identical controllers that will act on each of the rotating arms.

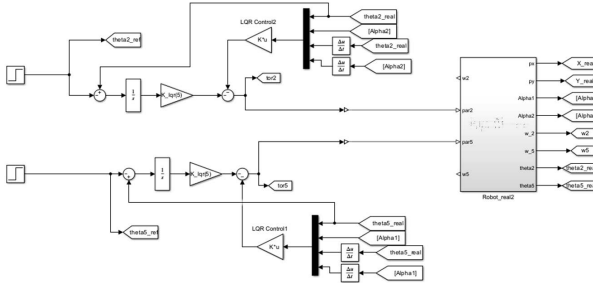


Fig. 8. Simulation implementation of state feedback block diagram

Upon applying a step reference change to each of the rotating arms, the reference tracking by these arms is observed (Fig. 9.), with a settling time of approximately 20 seconds. Since no minimum requirements for reference tracking were specified, the fact that the system tracks the reference while maintaining the inverted pendulum equilibrium is considered a satisfactory result. In Figure 10, the rotation angles of the inverted pendulum are shown, demonstrating that the pendulum remains in equilibrium throughout the entire trajectory performed by the rotating arms.

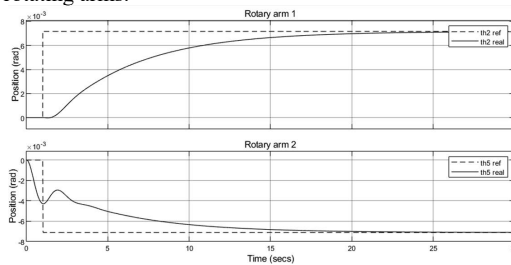


Fig. 9. Reference tracking of the rotating arm

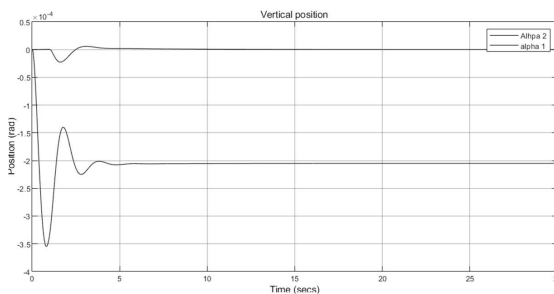


Fig. 10. Vertical position of the inverted pendulum

Although the system meets the objectives of balancing the inverted pendulum in its two degrees of rotation and performing reference tracking in the rotary arms, it is proposed for future work to implement the real physical system and evaluate its behavior.

References

1. L. Gómez-Coronel, A. Alvarado-Algarin, M. J. Marquez-Zepeda, H. Ancheyta-López, F. R. López-Estrada and I. Santos-Ruiz, "Modeling and full-state feedback stabilization of a linear inverted pendulum," 2022 XXIV Robotics Mexican Congress (COMRob), Mineral de la Reforma/State of Hidalgo, Mexico, 2022, pp. 42–47, doi: 10.1109/COMRob57154.2022.9962255.
2. Ma, Y.; Xu, D.; Huang, J.; Li, Y. Robust Control of An Inverted Pendulum System Based on Policy Iteration in Reinforcement Learning. *Appl. Sci.* 2023, 13, 13181. <https://doi.org/10.3390/app132413181>
3. Irfan S, Zhao L, Ullah S, Mehmood A, Fasih Uddin Butt M (2024) Control strategies for inverted pendulum: A comparative analysis of linear, nonlinear, and artificial intelligence approaches. *PLoS ONE* 19(3): e0298093. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0298093>
4. M. Antonio-Cruz, C. A. Merlo-Zapata and C. Márquez-Sánchez, "Review on Technological Developments of the Rotary Inverted Pendulum," 2019 International Conference on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering (ICMEAE), Cuernavaca, Mexico, 2019, pp. 130-133, doi: 10.1109/ICMEAE.2019.00031.
5. Schwab, K.-C., Schröder, L., Mercorelli, P., & Lassen, J. T. (2019). Sliding Mode and Model Predictive Control for Inverse Pendulum. *WSEAS Transactions on Systems and Control*, 14, 190-195.
6. J. Hua, Y. Cui, P. Shi, Y. Yang and H. Li, "Force feedback assisted balancing of inverted pendulum under manual control," 2013 Fourth International Conference on Intelligent Control and Information Processing (ICICIP), Beijing, China, 2013, pp. 776-781, doi: 10.1109/ICICIP.2013.6568177.
7. Prasad, L.B., Tyagi, B. & Gupta, H.O. Optimal Control of Nonlinear Inverted Pendulum System Using PID Controller and LQR: Performance Analysis Without and With Disturbance Input. *Int. J. Autom. Comput.* 11, 661–670 (2014). <https://doi.org/10.1007/s11633-014-0818-1>
8. Pandey, A., Adhyaru, D.M. Robust control design for rotary inverted pendulum with unmatched uncertainty. *Int. J. Dynam. Control* 11, 1166–1177 (2023). <https://doi.org/10.1007/s40435-022-01047-8>
9. Israilov S, Fu L, Sánchez-Rodríguez J, Fusco F, Allibert G, Raufaste C, et al. (2023) Reinforcement learning approach to control an inverted pendulum: A general framework for educational purposes. *PLoS ONE* 18(2): e0280071. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0280071>
10. D. Caradonna, M. Pierallini, C. D. Santina, F. Angelini and A. Bicchi, "Model and Control of R-Soft Inverted Pendulum," in *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 9, no. 6, pp. 5102-5109, June 2024, doi: 10.1109/LRA.2024.3389348.
11. Bayram, A., Kara, F. Design and control of spatial inverted pendulum with two degrees of freedom. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 42, 501 (2020). <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02580-3>
12. Bayram, A., Kara, F. Design and control of spatial inverted pendulum with two degrees of freedom. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 42, 501 (2020). <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02580-3>
13. Pham, DB., Dao, QT., Bui, NT. et al. Robust-optimal control of rotary inverted pendulum control through fuzzy descriptor-based techniques. *Sci Rep* 14, 5593 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-56202-2>

14. G. García-Chávez, "A Control Approach for the Variable-Height Inverted Pendulum Based on Sliding Mode Control With Input Saturation," 2019 IEEE-RAS 19th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), Toronto, ON, Canada, 2019, pp. 208-214, doi: 10.1109/Humanoids43949.2019.9035056.
15. Choudhury R, Singh Y. Planar parallel manipulators: A review on kinematic, dynamic, and control aspects. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2024;238(4):1991-2016. doi:10.1177/09544089231158187
16. Messikh, L.; Guechi, E.-H.; Blažič, S. Stabilization of the Cart-Inverted-Pendulum System Using State-Feedback Pole-Independent MPC Controllers. *Sensors* 2022, 22, 243. <https://doi.org/10.3390/s22010243>
17. Messikh, L.; Guechi, E.-H.; Blažič, S. Stabilization of the Cart-Inverted-Pendulum System Using State-Feedback Pole-Independent MPC Controllers. *Sensors* 2022, 22, 243. <https://doi.org/10.3390/s22010243>
18. A. Bellati, N. P. Blengio, F. Cancela, P. Monzón and N. Pérez, "Modeling and control of a Furuta pendulum," 2021 IEEE URUCON, Montevideo, Uruguay, 2021, pp. 334-338, doi: 10.1109/URUCON53396.2021.9647336.
19. M. Antonio-Cruz, R. Silva-Ortigoza, C. A. Merlo-Zapata, M. G. Villarreal-Cervantes, D. Muñoz-Carrillo and V. M. Hernández-Guzmán, "Modeling and Construction of a Furuta Pendulum Prototype," 2014 International Conference on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering, Cuernavaca, Mexico, 2014, pp. 98-103, doi: 10.1109/ICMEAE.2014.23.
20. Kavala Sen, D.; Yildiz, A.; Kopmaz, O. Optimal Design of a Five-Bar Planar Manipulator and Its Controller by Using Different Algorithms for Minimum Shaking Forces and Moments for the Largest Trajectory in a Usable Workspace. *Machines* 2022, 10, 971. <https://doi.org/10.3390/machines10110971>

MATHEMATICAL MODEL OF AN INVERTED PENDULUM WITH TWO DEGREES OF ROTATION

M. Mosquera Mena

UTE University, Quito, Ecuador

Bourgeois y Rumipamba s/n

Tel.: (+34) 647138728, e-mail: mmme103924@ute.edu.ec

F. R. Freire Carrera

UTE University, Quito, Ecuador

Bourgeois y Rumipamba s/n

Tel.: (+593) 995800212, e-mail: ffreire@ute.edu.ec

Keywords: Modeling of dynamic systems, inverted pendulum, State-space.

The mathematical modeling and control of the inverted pendulum is a fairly extended case study due to the nonlinearity of the system, its inherent instability in the equilibrium position and sensitivity to external disturbances. Numerous variations of this problem exist, as well as approaches for obtaining the model and design of control strategies.

This work proposes the derivation of the mathematical model and control strategy design of a variant of the inverted pendulum capable of rotating about two axes, mounted at the end of a five-bar mechanism.

The approach involves certain simplifications and a strategy to decompose the mechanism into decoupled subsystems, resulting in a linearized mathematical model for a subsystem corresponding to each possible rotation of the inverted pendulum, and its subsequent simulation and control loop analysis

References

1. L. Gómez-Coronel, A. Alvarado-Algarin, M. J. Marquez-Zepeda, H. Ancheyta-López, F. R. López-Estrada and I. Santos-Ruiz, "Modeling and full-state feedback stabilization of a linear inverted pendulum," 2022 XXIV Robotics Mexican Congress (COMRob), Mineral de la Reforma/State of Hidalgo, Mexico, 2022, pp. 42-47, doi: 10.1109/COMRob57154.2022.9962255.
2. Ma, Y.; Xu, D.; Huang, J.; Li, Y. Robust Control of An Inverted Pendulum System Based on Policy Iteration in Reinforcement Learning. Appl. Sci. 2023, 13, 13181. <https://doi.org/10.3390/app132413181>
3. Irfan S, Zhao L, Ullah S, Mehmood A, Fasih Uddin Butt M (2024) Control strategies for inverted pendulum: A comparative analysis of linear, nonlinear, and artificial intel-ligence approaches. PLoS ONE 19(3): e0298093. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0298093>
4. M. Antonio-Cruz, C. A. Merlo-Zapata and C. Márquez-Sánchez, "Review on Technological Developments of the Rotary Inverted Pendulum," 2019 International Conference on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering (ICMEAE), Cuernavaca, Mex-ico, 2019, pp. 130-133, doi: 10.1109/ICMEAE.2019.00031.
5. Schwab, K.-C., Schröder, L., Mercorelli, P., & Lassen, J. T. (2019). Sliding Mode and Model Predictive Control for Inverse Pendulum. WSEAS Transactions on Systems and Control, 14, 190-195.
6. J. Hua, Y. Cui, P. Shi, Y. Yang and H. Li, "Force feedback assisted balancing of inverted pendulum under manual control," 2013 Fourth International Conference on Intelligent Control and Information Processing (ICICIP), Beijing, China, 2013, pp. 776-781, doi: 10.1109/ICICIP.2013.6568177.

7. Prasad, L.B., Tyagi, B. & Gupta, H.O. Optimal Control of Nonlinear Inverted Pendulum System Using PID Controller and LQR: Performance Analysis Without and With Disturbance Input. *Int. J. Autom. Comput.* 11, 661–670 (2014). <https://doi.org/10.1007/s11633-014-0818-1>
8. Pandey, A., Adhyaru, D.M. Robust control design for rotary inverted pendulum with unmatched uncertainty. *Int. J. Dynam. Control* 11, 1166–1177 (2023). <https://doi.org/10.1007/s40435-022-01047-8>
9. Israilov S, Fu L, Sánchez-Rodríguez J, Fusco F, Allibert G, Raufaste C, et al. (2023) Reinforcement learning approach to control an inverted pendulum: A general framework for educational purposes. *PLoS ONE* 18(2): e0280071. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0280071>
10. D. Caradonna, M. Pierallini, C. D. Santina, F. Angelini and A. Bicchi, "Model and Control of R-Soft Inverted Pendulum," in *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 9, no. 6, pp. 5102–5109, June 2024, doi: 10.1109/LRA.2024.3389348.
11. Bayram, A., Kara, F. Design and control of spatial inverted pendulum with two degrees of freedom. *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 42, 501 (2020). <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02580-3>
12. Bayram, A., Kara, F. Design and control of spatial inverted pendulum with two degrees of freedom. *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 42, 501 (2020). <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02580-3>
13. Pham, DB., Dao, QT., Bui, NT. et al. Robust-optimal control of rotary inverted pendulum control through fuzzy descriptor-based techniques. *Sci Rep* 14, 5593 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-56202-2>
14. G. García-Chávez, "A Control Approach for the Variable-Height Inverted Pendulum Based on Sliding Mode Control With Input Saturation," 2019 IEEE-RAS 19th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), Toronto, ON, Canada, 2019, pp. 208–214, doi: 10.1109/Humanoids43949.2019.9035056.
15. Choudhury R, Singh Y. Planar parallel manipulators: A review on kinematic, dynamic, and control aspects. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering.* 2024;238(4):1991–2016. doi:10.1177/09544089231158187
16. Messikh, L.; Guechi, E.-H.; Blažič, S. Stabilization of the Cart–Inverted-Pendulum System Using State-Feedback Pole-Independent MPC Controllers. *Sensors* 2022, 22, 243. <https://doi.org/10.3390/s22010243>
17. Messikh, L.; Guechi, E.-H.; Blažič, S. Stabilization of the Cart–Inverted-Pendulum System Using State-Feedback Pole-Independent MPC Controllers. *Sensors* 2022, 22, 243. <https://doi.org/10.3390/s22010243>
18. A. Bellati, N. P. Blengio, F. Cancela, P. Monzón and N. Pérez, "Modeling and control of a Furuta pendulum," 2021 IEEE URUCON, Montevideo, Uruguay, 2021, pp. 334–338, doi: 10.1109/URUCON53396.2021.9647336.
19. M. Antonio-Cruz, R. Silva-Ortigoza, C. A. Merlo-Zapata, M. G. Villarreal-Cervantes, D. Muñoz-Carrillo and V. M. Hernández-Guzmán, "Modeling and Construction of a Furuta Pendulum Prototype," 2014 International Conference on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering, Cuernavaca, Mexico, 2014, pp. 98–103, doi: 10.1109/ICMAE.2014.23.
20. Kavala Sen, D.; Yildiz, A.; Kopmaz, O. Optimal Design of a Five-Bar Planar Manipulator and Its Controller by Using Different Algorithms for Minimum Shaking Forces and Moments for the Largest Trajectory in a Usable Workspace. *Machines* 2022, 10, 971. <https://doi.org/10.3390/machines10110971>

ON EXISTENCE AND ASYMPTOTIC STABILITY OF TWO-DIMENSIONAL PERIODIC SOLUTIONS WITH AN INTERNAL TRANSITION LAYER IN A PROBLEM WITH A FINITE ADVECTION

E.I. Nikulin

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow , Russia
119991, Kolmogorova st., 1, building 2
Tel.: (+7 499) 939-10-33, e-mail: nikulin@physics.msu.ru

This work is devoted to the following singularly perturbed periodic boundary value problem for a parabolic reaction-advection-diffusion equation

$$\begin{aligned}
 N_\varepsilon(u) &:= \varepsilon \left(\Delta u - \frac{\partial u}{\partial t} \right) - (A(u, x, t), \nabla u) - B(u, x, t) = 0 \\
 \text{for } (x, t) \in \mathcal{D} &:= \{(x, t) \in \mathbb{R}^3 : x = (x_1, x_2) \in \mathcal{G} := \{x \in \mathbb{R}^2 : 0 < x_1 < a\}\}, \\
 \text{where } a &\text{ is a given positive number, } \varepsilon \in \mathcal{E}_0 := \{\varepsilon \in \mathbb{R} : 0 < \varepsilon < \varepsilon_0 < 1\}, \\
 A(u, x, t) &= (A_1(u, x, t), A_2(u, x, t))^T, \\
 u(0, x_2, t, \varepsilon) &= u^{(-)}(x_2, t) \text{ for } (x_2, t, \varepsilon) \in \mathbb{R}^2 \times \mathcal{E}_0, \\
 u(a, x_2, t, \varepsilon) &= u^{(+)}(x_2, t) \text{ for } (x_2, t, \varepsilon) \in \mathbb{R}^2 \times \mathcal{E}_0, \\
 \text{where } u^{(-)} \text{ and } u^{(+)} &\text{ are given functions,} \\
 u(x_1, x_2, t, \varepsilon) &= u(x_1, x_2, t + T, \varepsilon) \text{ for } (x, t, \varepsilon) \in \bar{\mathcal{G}} \times \mathbb{R} \times \mathcal{E}_0, \\
 u(x_1, x_2 + L, t, \varepsilon) &= u(x_1, x_2, t, \varepsilon) \text{ for } (x, t, \varepsilon) \in \bar{\mathcal{G}} \times \mathbb{R} \times \mathcal{E}_0.
 \end{aligned}$$

Our goals are to establish a classical solution $u(x, t, \varepsilon)$ of this task with an interior layer, to determine its stability and to derive an asymptotic expansion of $u(x, t, \varepsilon)$ in ε .

We construct a new interior layer type formal asymptotics which includes an approximation of the location of the interior layer, investigate the order preserving properties of the operators generating the asymptotics and propose a modified procedure to get asymptotic lower and upper solutions. By using sufficiently precise lower and upper solutions, we prove the existence of a periodic solution with an interior layer and estimate the accuracy of its asymptotics. We also prove the asymptotic Lyapunov stability of this solution.

References

1. P. Hess, Periodic-Parabolic Boundary Value Problems and Positivity.-Pitman Res, Harlow: Longman Scientific&Technical, 1991.
2. N. N. Nefedov, E. I. Nikulin//*Russian Journal of Mathematical Physics*, v.25, №1. 2018, P. 88–101.
3. N.N. Nefedov L. Recke , K.R. Schneider// *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, v.405, №1.2013, P. 90–103.

SEMICLASSICALLY LOCALIZED STATES IN SOME OPEN SYSTEMS WITH NONLOCAL INTERACTION

A.V. Shapovalov^{1,2}, A.E. Kulagin^{3,4}, S.A. Siniukov¹

¹ Tomsk State University, Tomsk, Russia
634050, Novosobornaya sq., 1

Tel.: (+7 3822)529843, e-mail: shpv@mail.tsu.ru

² Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia
634050, Lenin ave., 40

³ Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia
634050, 30 Lenin av.

e-mail: ack8@tpu.ru

⁴ V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia
634055, 1 acad. Zuev sq.

Abstract: We apply the developed method of semiclassical asymptotics, based on the ideas of Maslov's complex germ theory, to the Schrödinger equation with cubic nonlocal nonlinearity and anti-Hermitian part responsible for the environment impact on the system and to the generalized Fisher-KPP equation with nonlocal competitive losses and fractional time derivative of the Caputo type which describes memory effects in the system evolution.

Keywords: semiclassical asymptotics; Maslov germ method; nonlinear open systems; NLSE; FKPP equation; weak diffusion; quasiparticles; fractional time derivative.

The method of semiclassical asymptotics based on the ideas of the Maslov complex germ theory [1,2] can be effectively applied to model equations describing open systems of various natures with nonlocal nonlinear interactions. We consider two such models, namely the nonlinear Schrödinger equation (NLSE) with a cubic nonlocal nonlinearity and an anti-Hermitian term which is widely used model for the study of open quantum systems, and the generalized Fisher-Kolmogorov-Petrovskii-Piskunov (FKPP) population equation with nonlocal competitive losses and fractional time derivative of the Caputo type which describes memory effects in the system evolution.

The NLSE considered here reads

$$\begin{aligned} & \{-i\hbar\partial_t + H(\hat{z}, t)[\Psi] - i\hbar\Lambda\tilde{H}(\hat{z}, t)[\Psi]\} \Psi(\vec{x}, t) = 0, \\ & H(\hat{z}, t)[\Psi] = V(\hat{z}, t) + \kappa \int_{\mathbb{R}^n} d\vec{y} \Psi^*(\vec{y}, t) W(\hat{z}, \hat{w}, t) \Psi(\vec{y}, t), \\ & \tilde{H}(\hat{z}, t)[\Psi] = \tilde{V}(\hat{z}, t) + \kappa \int_{\mathbb{R}^n} d\vec{y} \Psi^*(\vec{y}, t) \tilde{W}(\hat{z}, \hat{w}, t) \Psi(\vec{y}, t). \end{aligned} \quad (1)$$

Here, $\vec{x} \in \mathbb{R}^n$, $t \geq 0$, $\hat{p}_x = -i\hbar\partial_{\vec{x}}$, $\hat{z} = (\hat{p}_x, \vec{x})$, and $\hat{w} = (\hat{p}_y, \vec{y})$. The operators $V(\hat{z}, t)$, $W(\hat{z}, \hat{w}, t)$, $\tilde{V}(\hat{z}, t)$, $\tilde{W}(\hat{z}, \hat{w}, t)$ are pseudo-differential operators with smooth symbols growing not faster than polynomial [1, 2, 3] given in the coordinate representation. The coefficient $\hbar$ plays the role of a small parameter for the semiclassical asymptotics, κ is the real nonlinearity parameter, and Λ is the real non-Hermiticity parameter.

For the NLSE under consideration, we have developed a formalism [3] that allows one to construct asymptotic solutions as $\hbar \rightarrow 0$ with special geometric properties. Such solution is a function localized in the neighborhood of several points in the phase space of the dynamic

system of moments of the function. Each local part of the solution is interpreted as a quasiparticle. From the equation (1), we deduce the dynamic system governing the evolution of quasiparticles, which can be considered as the "equations of classical mechanics" of the quasiparticles. The general formalism is illustrated with an example.

The nonlocal FKPP for the population density $u(x, t)$, $x \in \mathbb{R}^1$, $t \geq 0$, with fractional time-derivative of the Caputo type is written in the form

$$-{}^C D_{0+,t}^\alpha u(x, t) + \varepsilon u_{xx}(x, t) + a(x, t)u(x, t) - \kappa u(x, t) \int_{-\infty}^{+\infty} b(x, y, t)u(y, t)dy = 0. \quad (2)$$

The Caputo derivative ${}^C D_{0+,t}^\alpha$ (left-side derivative) with respect to a variable t of order α , $0 < \alpha \leq 1$, of some real function $f(t)$ is given by the expression

$${}^C D_{0+,t}^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \int_0^t (t-\xi)^{-\alpha} f'(\xi) d\xi, \quad f'(\xi) = df(\xi)/d\xi, \quad t \geq 0.$$

Here, $\Gamma(x)$ is the gamma function, the population rate function $a(x, t)$ (>0) and the influence function $b(x, y, t)$ are given real functions depending smoothly on their arguments and can increase no faster than polynomials as $|x|, |y| \rightarrow \infty$. For convenience, the real nonlinearity parameter κ (>0) is explicitly identified in equation (2), and ε (>0) denotes the diffusion coefficient which will play the role of a small asymptotic parameter, $\varepsilon \rightarrow 0$. The integral term $-\kappa u(x, t) \int_{-\infty}^{+\infty} b(x, y, t)u(y, t)dy$ in (2) describes nonlocal competition losses in the population, and the influence function $b(x, y, t)$ characterizes nonlocality of interaction in the population.

In the present work, we modify the semiclassical formalism considered in [4] for the nonlocal FKPP with the usual time derivative of the first order as applied to the equation (2). Based on the modified semiclassical formalism for the equation (2), we deduce the dynamic system of moments of the solution $u(x, t)$ in the class of trajectory concentrated functions [4]. The dynamic system obtained is the fractional Einstein-Ehrenfest (EE) system of the second order according to the terminology of [4]. An illustrative example of the fractional EE system for spatially homogeneous coefficients of equation (2) linearly dependent on time is considered. An approximate solution to the EE system is constructed in the form of iterations obtained from the Volterra integral equation representing the Cauchy problem for the system under consideration. A comparison of the approximate and numerical solutions is carried out.

The study is supported by Russian Science Foundation, project no. 23-71-01047, <https://rscf.ru/en/project/23-71-01047/>.

References

1. Maslov V.P., The Complex WKB Method for Nonlinear Equations. I. Linear Theory. - Basel: Birkhauser Verlag, 1994.
2. Belov V.V., Dobrokhotov S.Yu.//Teor. Mat. Fiz., v.92. 1992, P.215-254 (English transl.: Theoret. and Math. Phys., v.92, 1992, P.843-868).
3. Kulagin A.E., Shapovalov A.V.//arXiv:2408.08532, 2024, 38 pp.
4. Shapovalov A.V., Trifonov A.Yu.//Int. J. Geom. Methods Mod. Phys. (IJGMMP), v.15, 2018, 1850102. 30 pp.

A COMPARATIVE OF FEEDFORWARD ANN EVOLUTIONARY MODEL IMPLEMENTATION TO ADDRESS THE RECOGNITION PROBLEM

Ivan Stepanyan¹ and Safa Hameed²

¹Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy
of Sciences (IMASH RAN)
Moscow, Russian Federation
e-mail: neurocomp.pro@gmail.com

^{1,2}Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering
Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (RUDN University)
Moscow, Russian Federation
e-mail: sa.programmer1@gmail.com

Abstract

This paper develops an artificial neural network (ANN) using the characteristics of an evolutionary algorithm (EA). In the learning process, selection, crossover, and mutation played the role of optimization after a crucial phase, which is breaking up ANN into multiple ANNs. Two different categories of data were used to implement the system: human movement type and human health status. The outcomes were compared when satisfactory results were attained. The system's accuracy in identifying the different types of human movement and in analyzing the human situation's health achieved a high rate.

Keywords: feedforward ANN, breaking up, evolutionary algorithms, crossover, mutation.

1. Introduction

Daily life in contemporary life requires smart systems with high speed and accuracy in analysis and decision-making [1]. ANN and EA have an impact on the smart techniques provided in smart cities [2-6]. The ANN learning process can be strengthened by the EA, which also enhances outcome validation [7]. A significant part of the use of such systems is to address critical issues like identifying human motion [8] and checking human health [9]. The research aims to use an intelligent system that combines two powerful algorithms that have effective features to find appropriate solutions. In this research, the system was implemented on two types of data: one to distinguish normal and aggressive human movements, and the other to check the human health condition.

2. Method and Implementation

The proposed model was applied to two different datasets, which are human movement type and human health status. The first dataset is the identification of aggressive or normal human behavior. Ten activities that correspond for each [10]. Each database has ten activities with 1061 samples for each. In the second data set for human health status [11], the stabilometric data for each indication is a range of values. To create the data collection, a specialist selected 19-second intervals with a recording frequency of 250 Hz. This allowed us to have many tracks, each having 4750 parameters.

To maximize the classifiers' performance in classification for both used data, Quantile Transformer implements the normalization function by using scikit-learn [12]. Eleven hidden layers, each having three neurons, make up the ANN algorithm. The sigmoid function is used to extract the output from each neuron. The identity function transfers the output from the final hidden layer to the output layer [13]. Two neurons make up the output layer by using the

identity function, and their combined output classifies the required state. The result is compared to the actual result using the mean square error.

The first phase is the breaking ANN into multiple ANNs according to the number of hidden layers; the breaking-up procedure is equivalent to assuming the output layer after each hidden layer. Equation (1) represents the identity function and must be used to obtain the output from each hidden layer to calculate the classification result. Equation (2) shows the errors obtained from each ANN are retained in a list, which is referred to as a fitness list.

$$\hat{y}_{ANN_j} = layer_j = \sum_{k=1}^m \left(\sigma_i \left(\sum_{i=1}^n W_{ij} \cdot X_i + B \right) \cdot w_{ik} \right) \quad (1)$$

$$Error_{ANN_s} = [MSE_{layer_{j_1}}, MSE_{layer_{j_2}}, \dots, MSE_{layer_{j_n}}] \quad (2)$$

Where i is the index of feature for each sample of data, n is the number of features, m is the number of samples, W represents the weight, X are the features, B is the bias, σ is the activation function (sigmoid), and MSE is the result of mean square error.

The evolutionary algorithm has been proposed in the learning process. The next steps adopt the selection stage, which is thought to be significant. At this point, the layer with the best weight is investigated. The process of breaking the algorithm into multi-ANNs made it easier to look at the layers with the best weights. The sorting method used in the evaluation process, which ranks ANNs from best to worst, the best ANNs have the chance to endure and be utilized by the following generation during the crossover stage, as in Equations (3) and (4)

$$F(ANN_{11}, ANN_1) = F(ANN_{11}(W_{ijk}), ANN_1(G_{ijk})) = ANN_{11}(W_{ijk}) \Leftrightarrow ANN_1(G_{ijk}) = ANN_{11}(G_{ijk}), ANN_1(W_{ijk}) \quad (3)$$

$$F(ANN_{10}, ANN_2) = F(ANN_{10}(W_{ijk}), ANN_2(G_{ijk})) = ANN_{10}(W_{ijk}) \Leftrightarrow ANN_2(G_{ijk}) = ANN_{10}(G_{ijk}), ANN_2(W_{ijk}) \quad (4)$$

Where W is the coefficient weights for ANN11 and 10, G is the coefficient weights for ANN1 and 2, i, j are the rows and columns for W and G , and k represents the last layer.

The phase of mutation enhances the remaining ANNs with poor accuracy by randomly altering the weights of the neurons and layers, then ANNs combine to the new feedforward ANN.

3. The results

Satisfactory results were obtained from the proposed model on two different datasets [12, 13]. For each system, we implemented two phases, which are the training and testing phases. For the first dataset represented by aggressive and normal activities, in the training phase, the system was trained on 80% of the data; after obtaining satisfying results from the final generation, the system was tested with an additional dataset with 20% to test the validity of the results. The accuracy of the obtained result from the first dataset is explained in Table 1. It explains the accuracy from the training and testing phases for both aggressive and normal actions. In Fig. 1, explain the obtained accuracy for the training phase. Fig. 2 explains the accuracy obtained from the testing phase.

The system was applied to the stability dataset. In the training phase, the system was trained on 60% of the given data; Table 2. explains the obtained accuracy from the last iteration. After getting satisfying outcomes from the final generation, additional data was passed, representing 40% of the given dataset, for the purpose of testing the validity of the results. In Fig. 3, it explains the accuracy obtained from the suggested system of stability data for health and illness status for both training and testing phases.

Table 1. The accuracy of action's types for training and testing phase

Action type	Training phase Accuracy		Testing phase Accuracy	
	Aggressive action	Normal action	Aggressive action	Normal action
Elbowing	90.1025128792373	95.80998342067372	90.1025128792373	95.80998342067372
Front kicking	90.19938857405185	95.84703273049617	90.19938857405185	95.84703273049617
Hammering	90.07054597042153	95.81886603538128	90.07054597042153	95.81886603538128
Headering	90.16571001436769	95.80954030619128	90.16571001436769	95.80954030619128
Kneeing	90.12284456715794	95.83650059179078	90.12284456715794	95.83650059179078
Pulling	90.14963238522873	95.81277914701054	90.14963238522873	95.81277914701054
Punching	90.16285100579768	95.81280403067018	90.16285100579768	95.81280403067018
Pushing	90.1859157467853	95.81367414731535	90.1859157467853	95.81367414731535
Side kicking	90.22045859213586	95.82832186869689	90.22045859213586	95.82832186869689
Slapping	90.26098322451188	95.84257945491301	90.26098322451188	95.84257945491301

Table 2. The accuracy of status health for training and testing phase

Inputs' samples	Training phase		Inputs' samples	Testing phase	
	Accuracy of Health	Accuracy of ill		Accuracy of Health	Accuracy of Health
[0]	99.86102006225896	99.58463064162841	[6]	99.72814054679223	99.5
[1]	78.22962545287474	99.5	[7]	79.46523262849048	99.5
[2]	88.0831801967212	83.49108901317373	[8]	96.2777987368821	84.20209584176736
[3]	99.4451004637835	99.97950335246995	[9]	99.94926435046678	99.86053456923555
[4]	94.5870155093393	99.11359339801307			
[5]	95.95630302552227	99.5			

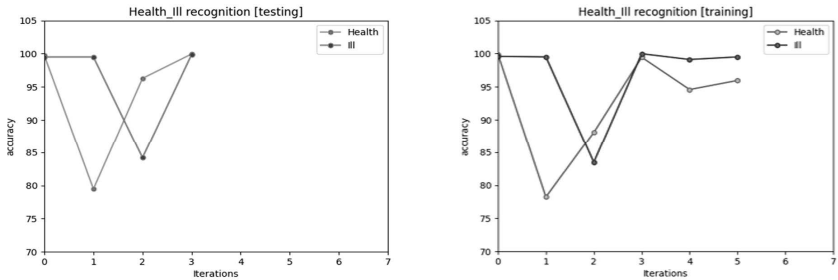


Fig. 1. The training accuracy of the first dataset

The suggested system gave satisfying accuracy when implemented on two datasets. The overall obtained accuracy of the implemented neuroevolutionary system on human movement types for aggressive activity in the testing phase was 90.16408429596957, and for normal activity it was 95.82320817331393, whereas the overall obtained accuracy of the implemented neuroevolutionary system on human health status in the testing phase for health status was 93.8551090656579, and for ill status it was 95.76565760275074. The accuracy of the implemented suggested system on both data sets was satisfactory for the required classification.

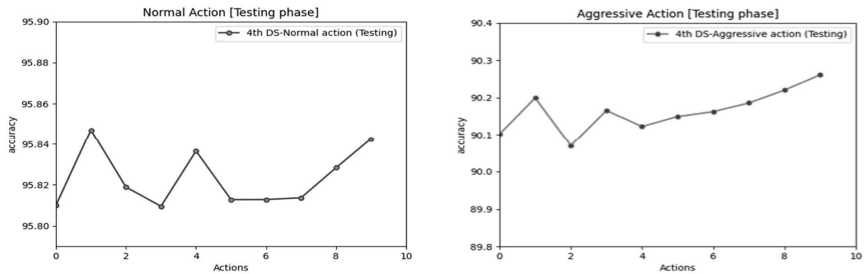


Fig. 2. The testing accuracy of the first dataset

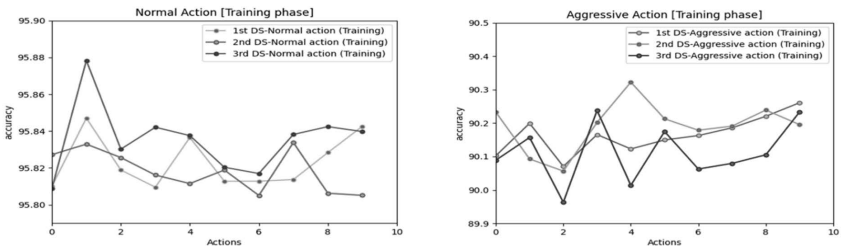


Fig. 3. The training and testing phases accuracy of the second dataset

Conclusion

An intelligent model that combines the EA and the ANN algorithms was suggested. The system was applied to two different datasets, which are human movement type and human health status. The ANN was optimized by EA, which starts with splitting the ANN into multiple ANNs. EA sorts the obtained errors from each ANN to do the selection phase, which determines which two ANNs are the best and worst to do the crossover stage. By means of mutation, the remaining ANNs take the chance to enhance it. After completing these steps, ANNs merge to form a single ANN, which is then fed data until the outcome is confirmed. The system obtained accuracy with high efficacy.

References

1. Jie C., Jian S, Gang W. From Unmanned Systems to Autonomous Intelligent Systems. //Engineering. v. 12. 2022, P. 16–19.
2. Raid R.A., Fawaz S.A., Ali N.H. Design a Technology Based on the Fusion of Genetic Algorithm, Neural network and Fuzzy logic. // arXiv preprint arXiv:2102.08035. 2021.
3. Xiaoyang L., Jian Q., Kai Z., Carol A.F., David K., Yucai J., Guotao Y. Design optimization of laminated composite structures using artificial neural network and genetic algorithm. // Composite Structures. v.305. 2023. P. 116500.
4. Abdullah A.Y., Mehmet S.G., Erkan B., Iman A. A novel action recognition framework based on deep-learning and genetic algorithms. //IEEE Access. V. 8. 2020, P. 100631–100644.

5. Tormozov V.S., Zolkin A.L., Vasilenko K.A. Optimization of neural network parameters based on a genetic algorithm for prediction of time series. // proceeding 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). IEEE. 2020.
6. Junjie Z., Guangmin S., Yuge S., Huijing D., Anas B. Hyper-parameter optimization by using the genetic algorithm for upper limb activities recognition based on neural networks. //IEEE Sensors Journal. V. 21.2. 2020, P. 1877–1884.
7. Paola A.C., Enrico v., Emiro D., Marlon P., Ana O., Fulvio P. Unsupervised human activity recognition using the clustering approach: A review. // Sensors. V. 20.9. 2020.
8. Stepanyan I.V., and Hameed S. A. An improved neurogenetic model for recognition of 3D kinetic data of human extracted from the Vicon Robot system. //Baghdad Science Journal. V.20.6 (Suppl.) 2023. P. 2608–2608.
9. Hiroki T., Rentarou O., Kohki N., Fumiya K., Meiho N. (eds) Bio-information for Hygiene. // Ser. Current Topics in Environmental Health and Preventive Medicine. Springer, Singapore. 2021. P. 93–111.
10. UCI Machine Learning Repository. [Online]. Available: <https://archive.ics.uci.edu>.
11. MERA Research Center; 141002, Russia, Moscow region.
12. Dalwinder S., Singh B. Feature wise normalization: An effective way of normalizing data. // Pattern Recognition. V. 122. 2022. P. 108–307.
13. H. Pothina and K.V. Nagaraja, Artificial neural network and math behind it. Smart Trends in Computing and Communications, Ser. Part of the book series: Lecture Notes in Networks and Systems ((LNNS, volume 396)), Proc. SmartCom 2022. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022, P.205–221.

THE ENERGY SYSTEMS INDUSTRIAL PRODUCTION FACTOR DERIVATIVES MATHEMATICAL ESTIMATION MODEL

O.V. Stikhova

MSTU "STANKIN", Moscow, Russia

127055, Vadkovsky lane, 3a

Tel.: (+7 499)972-42-55, e-mail: olgast2011@mail.ru

The relationships between wind and photovoltaic energy mathematical modeling, the joint probability distribution modeling of generation uncertainties associated with, productivity calculation, the equipment production and utilization cost models are currently increasing actual. It is natural that the real dependence structure of the financial differs from the Gaussian one in conditions of market fluctuations. There is an obvious need to find an optimal planning, risk and cost reduction model for thermal energy storage systems. The copula functions can be a useful and simple tool for implementing efficient algorithms and to simulate the financial asset returns distribution more realistically. Currently there are various electric vehicles production and operation mathematical estimation models based on the copula functions allowing to manage risks and reduce the charging electric vehicles cost, while increasing the renewable energy and load stability absorption, as well as risk estimation models for managing uncertainties in the renewable energy sources production and solving dispatching economic problems.

The producing them industrial companies factor derivatives mathematical estimation models remain relevant due to their multiparametric properties. The factor calculating models for the derivative credit instruments market in relation to these industrial products manufacturers are considered in this paper [1]. An important part in calibration models is to select and calibrate the most adequate copula function based on real financial data. The multiparametrical model based on generalized hyperbolic copula with generalized hyperbolic borders (CGH) takes into account the various mixed distribution and various boundary areas distributions, keep desirable one-dimensional distribution GH properties [2]. The estimation functional characteristics required for solving the problems of forecasting the behavior of some collateralized debt obligations (CDO) and credit default swaps (CDS) problem are given in this paper [3]. The concept "derivative" of standard financial actives is allocated and the industry obligations secondary market control are considered. The credit derivatives tranches risk mathematical modeling task is solved. The copulas allow us to model the dependence structure independently from the marginal distributions. In this way we construct a multivariate distribution with different margins and the dependence structure given from a particular type of copula function [4].

A group of useful methods for calibrating and simulating copula functions is presented. The synthetic debt instruments portfolio is compiled according to the required parameters. In calibration models early defaults reduce the equity tranches payment required sums with high spreads, late defaults work absolutely opposite.

The single-name non-repayment credit risk estimation models help us to estimate the default opportunity and avoid it. With the portfolio losses $x \in [0, 1]$ and the default threshold value $K(t) = F_{GH}^{-1}(p(t))$, where $p(t)$ is neutral to risk default probability of each portfolio emitter, the portfolio loss distribution is:

$$F_{\infty}(t, x) = 1 - F_{GH_d} \left(\frac{1}{a} \left(K(t) - \sqrt{(1-a^2)} F_{GH_1}^{-1}(x) \right) \right)$$

For the basic portfolio CDO valuation the multiple-name default probability model is used [4].

$$V_{prot}(0) = E \left[\begin{matrix} T & -\int_0^T r_u du \\ \int_0^T e^{-\int_0^u r_s ds} & N_{tr} dL_s^{(K_1, K_2)} \\ 0 & \end{matrix} \right].$$

In the work accumulated payments are accepted the premium part calculating based on CDS rates, the default time distribution is calculated, and the single-name default probability model is used to determine the underlying portfolio CDS price. The value of protection is determined by the size of the expected tranche default losses and the value of tranche premium part is calculated as the current price of all expected payments on spread, where an interval in payments is $\Delta_i = T_i - T_{i-1}$:

$$V_{prem}(0) = \sum_{i=1}^M E \left[e^{-\int_0^{T_i} r_u du} s \Delta_i N_{tr} \frac{2 - L_{T_{i-1}}^{(K_1, K_2)} - L_{T_i}^{(K_1, K_2)}}{2} \right]$$

For the tranche expected losses estimation in generalized hyperbolic copula multiparametrical model [5]:

$$EL_{(K_1, K_2)}(t) = \frac{1}{K_2 - K_1} \int_{K_1}^{K_2} (x - K_1) dF_{\infty}(t, x) + (1 - F_{\infty}(t, K_2)).$$

Calibration functions have been also implemented in the field of the integrated measurement of the different financial risks by modeling the dependence structure among the market, credit, and operational losses.

In this work the computing experiments and results verification on market products industrial sector companies credit default derivatives value are carried out both with the generated samples and with the real data. The calibration functions may be implemented to a portfolio of n financial assets traded on different stock markets such as the American, European and Asian ones.

The iTraxx indices of Europe, Asia, the Middle East and Africa with maturities of 3, 5, 7 and 10 years are considered, a new series is determined on the basis of liquidity every six months. The basic iTraxx Europe index includes 125 European names with the same weight in the effectiveness of the corresponding current iTraxx CDS contracts.

This paper calculation methods allow to simultaneously model the tail dependence and various distributions of boundary areas.

The copula functions are used for estimating the marginal contribution of each financial institution to the systemic risk, that is the instability of the global financial system. Copula functions more flexibly fix the dependence structure between random variables in the multidimensional stochastic models construction, taking into account nonlinear effects. The implications in terms of macro-prudential policy and supervisory choices on financial and industrial companies are evident. The carried out enterprises calculation results have shown high efficiency [7].

References

1. Stikhova O.V. Mathematical modeling of the industrial companies credit derivatives default process / Vestnik MSTU «STANKIN». Scientific referenced journal. M.: MSTU «STANKIN», №4(23), 2012, pp.81–84.
2. Stikhova O.V. Mathematical modeling double normal inverse gaussian copula and large portfolio approximation. «The Fundamental physics and mathematical problems and techno-technological systems modeling ». Annual collected scientific papers, 16. Ed.by. L.A.Uvarova. – M.: «Janus-K», 2014. pp. 97–102.
3. Schetinin E.Yu, Stikhova O.V. Mathematical modeling of default credit derivatives by copula models. / Scientific-practical and information-analytical collection "Financial analytics: problems and solutions", "Publishing House FINANCE AND CREDIT", 7(49)-2011, pp.16–25.
4. Stikhova O.V. «Mathematical Estimation Methods and Models for Industrial Companies» EPJ Web of Conferences 248, 03001 (2021) MNPS-2020 <https://doi.org/10.1051/epjconf/202124803001>.
5. Stikhova O.V. Industrial Companies Mathematical Estimation Methods And Models. / The Fifth International Scientific Conference “The Modeling of Nonlinear Processes and Systems (MNPS-2020)”. Ed.by. L.A.Uvarova. – M.: «Janus-K», 2021, pp.70–71.
6. Stikhova O.V. Mathematical Calibrating And Simulating Functions In Industrial Companies Application. / The International Scientific Conference “The Samarsky Readings (In Memory Of Academician A.A. Samarsky) (SR-2021)” and The Fifth International Scientific Conference “The Modeling of Nonlinear Processes and Systems (MNPS-2020)”. Ed.by. L.A.Uvarova. – M.: «Janus-K», 2023, pp.60–62.

IMAGES OF GRAVITATIONAL WAVES FROM ACCRETION DISKS OF BLACK HOLES AND NEUTRON STARS EXPLOSIONS

E.N. Terentiev, F.V. Shugaev, N.E. Shilin-Terentyev

Faculty of physics M.V. Lomonosov MSU, Moscow, Russia

119991, Vorobyovy Gory, Building 1-2, <http://www.phys.msu.ru>, fax.: (+7 495)932-88-20, e-mail: en.teren@physics.msu.ru; shugaev@phys.msu.ru, nikolay.terentyev@gmail.com ;

Annotation

The LIGO/Virgo Gravitational Wave Detectors (GD) have detected Gravitational Waves (GW) from accretion disks of Black Holes (BH) and two interacting Neutron Stars (NS). The paper presents the results of the analysis of BH and NS data from the Chandra X-ray telescope using our Mathematical Microscope (MM). At the output of the MM, in super-resolved images, we observe for the first time GWs that were simultaneously detected by GDs located on Earth.

From Euclide to Einstein

The idea about the curvature of space concerns the fifth Euclidean postulate. The first result in regard to geometry was made by Lobachevsky. Later on, analogous works were done by Gauss and Bolyai. The geometry of Lobachevsky was fully acknowledged thanks to Beltrami and Klein. The further development was carried out owing to Riemann. In 1916 Einstein [1] published the idea about existence of gravitational waves and wrote corresponding equations. In accordance with Einstein, geometry depends on mass distribution. After that Schwarzschild [2] found a solution for field equations. That solution may describe a black hole. In 2016 gravitational waves were detected [4].

Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merge

B.P. Abbott... et al. Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Merger. Physical Review Letters, 116, 061102 (2016), DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.061102

The LIGO detectors [4] have observed gravitational waves from the merger of two stellar-mass black holes. The waveform they detected matches the predictions of general relativity for the merger of a pair of black holes to form a single black hole.

These observations demonstrate the existence of binary systems of stellar-mass black holes. This is the first direct detection of gravitational waves and the first observation of a binary black hole merger [4]

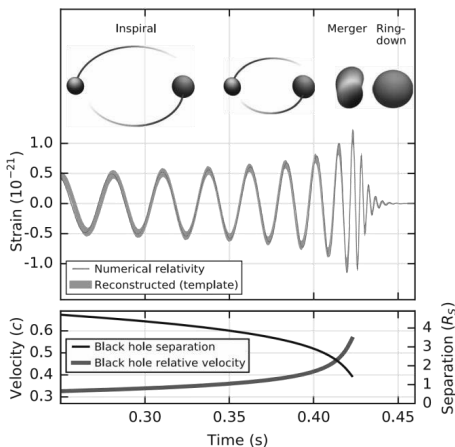


Fig. 1. Information from the first report of the observation of gravitational waves [4].

Mathematical Microscope Methods

Problem MM: Given: discrete image $Y|A$ and a set of discrete reversible Apparatus Functions (AF) $\{O\}$. We need to find solutions to a set of systems of linear equations of convolution type $Y|A=\{O\} X$. Note that we do not know the AF A , and the parametric set of

discrete invertible AF $\{O\}$ is our idea of how the unknown discrete AF A is structured in these discrete $Y|A$ measurements.

We take vectors, images P, Y, X, A, O from the finite-dimensional linear space L^2 with the standard scalar product $(X, Y) = \sum X_{ij} Y_{ij}$ and limited energy $\|P\|^2 = (P, P) < \infty$.

The solution $Y|A = \{O\}X$ can be found if the Delta Kronecker Condition (DKC) is satisfied: in $X = O^{-1}Y$, there are individual isolated point objects (asterisks) or DK symbols, this means $AF A \sim O$. It is clear that if DK is one in X , then $Y|A = A \text{ DK} = A$.

For $AF A, O$, the Modulation Transfer Functions (MTF) $MA = MTF(A)$, $MO = MTF(O)$ and Conditionality DI for $AF A$ are calculated: $DI = 1/\min|MA|$. Back from MTF MA and MO we can go back to $AF A$ and O .

The solution to the MM problem is a pair: a reversible $AF O \sim A$ and a Super-Resolved (SR) image $X = RY$, $R = O^{-1}$, if in the resulting super-resolved image X , we detect individual point objects according to the DKC.

The meaning of MM methods: the inversion $R = O^{-1}$ is equivalent to the numerical inversion $MTF(R) = 1/MTF(O)$, $MR \text{ MO} = 1$ or $MTF(DK) = 1$, $R \text{ O} = DK$, i.e. **reversibility in convolution** $Y = A \text{ X}$ is standardly implemented in the frequency domain.

Theorem: If the value of the Invertibility Indicator $II(R \text{ O})(0,0) = (R; O) = 1$, then $R = O^{-1}$, $pR = pO^{-1}$. The expression $(R; O)$ is the scalar product of $AF R$ and O in the domain of definition - a square with side length Loc . The equality $(R; O) = 1$ is satisfied with an accuracy of the order of the error of the mantissa, i.e. 10^{-14} at short lengths Loc .

Conditioned Super-Resolution AF O

A description of the principles of tuning the MM based on the conditionality $DI = 1/\min|MTF(A)|$, the formulation of the problem of selecting an $AF A$ from a cell $\{O\}$ based on the minimum response to noise $\min\|R\| \sim DI$ and the value of SR achieved the Super-Resolution can be found in our papers [8-10].

The main problem of the Conditioned Super-Resolution $AF O \text{ pO} = pR^{-1}$ is set as a minimum task:

$$\min\|R\| = \min_{LO} \{ \|pR\| \mid Err(pO) \leq \text{err} \}, LO = \{ pO(\bigcup Par) \mid [Loc, SDx, \bigcup DI] \}, \|pR\| \sim DI \quad (1)$$

The meaning of setting the main problem (3) is that we want to obtain a MM model with minimum response to noise- $\min\|R\|$.

If the input image Y contains additive white noise v with Standard Deviation $SD(v) = \sigma$, then in the resulting SR $X = RY$ image the SD of noise Rv will be equal to $\text{err} = \sigma * \min\|R\| \sim \sigma * DI$.

Mathematical Microscope Instruments

$AF DK$ is the most conditioned AF : $MTF(DK) = 1$, $DI = 1$ and the property of not changing the image: $DK P = P$.

Conditionality $DI \geq 1$, since for even $AF A$ and normalization $\sum A = 1$, $0 \leq |MTF(A)| \leq 1$. A larger DI number indicates less conditioning.

In the formulation of the main MM problem (3), we high-light the parameters Par (13 parameters of one paraboloid, four Gaussoids, length Loc) and the model coarsening parameter - conditionality DI .

With the DKC condition we will associate the Physical Turning Principle (PTP) for the usual or conditioned local inversion $R = A^{-1}$ on the parameters Par , DI and Loc . This all reminds us of the adjustment of opera glasses for small details of images.

In order to Super-Resolve - to see objects smaller than a pixel of the original image, we use the SDx parameter to split pixels of the type into 7×7 , 13×13 in order to see objects smaller than a pixel. It is clear that in this case the original image Y is interpolated into smaller pixels in addition to AF . We were able to see single grains of sand (less than a pixel) on the Martian rock and artifacts in the upper part of the rock - coral-type structures [8].

To compare the results of Super-Resolution we introduce the value SR [8]: If there is a normalization of AF $O: \sum O=1$, then at zero MTF $M(O)(0,0)=1$, then we will evaluate Super-Resolution (SR) by the value:

$$SR=pSR=\sum M(pR)M(O)/\sum M(O)\geq 1 \text{ and } SR=1 \text{ only for AF } O=DK \quad (2).$$

In the formulation of the main MM problem (3), pairs of AFs O and $R=O^{-1}$ with $\min\|R\|$ are selected. We believe that if DKC occurs, then the unknown AF is $A\sim O$. This is the whole essence of MM methods, instruments.

Basic Functions of MM

MM is tuned according to the rough solution of problem (3) with the conditionality $DI=1300$, $R\sim O\sim DK$. More powerful computers are required for more precise tuning of MM with full inversion $R\sim O=DK$, $O=A$, $R=A^{-1}$.

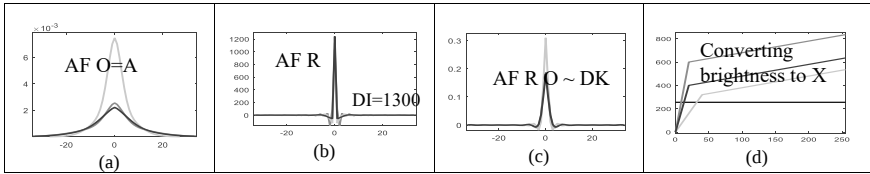


Fig. 2. (a-c) sections of AF MM, (d) – amplification of weak brightnesses in X.

Gravitational Waves at quasars he1104

Below in Figure 2(a) shows two images of the quasar he1104 obtained after GL using the Chandra telescope. Note that two GL images of the quasar he1104 [5] were further improved by the microlensing method, which takes into account information about the rotation speed of the accretion disk and the BH itself, presented in [7]. This improvement allowed us, using MM (+ also taking into account AF A MM for the Chandra telescope, see Fig. 2(a)) to identify local features - GW in quasars.

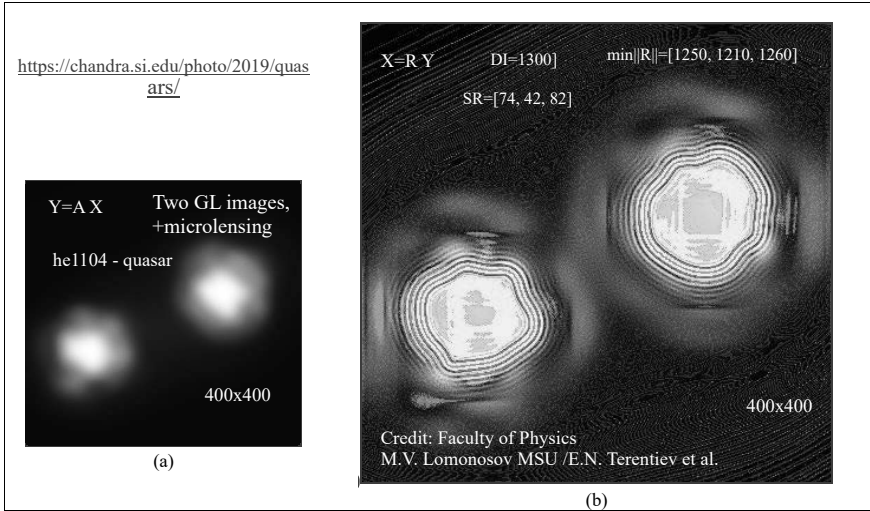


Fig. 2. (a) - Y – image from the Chandra telescope, (b) - X – SR image from the MM output

In the formulation of the main MM problem (3), pairs of AFs O and $R=O^{-1}$ with $\min\|R\|$ are selected. We believe that if DKC occurs, then the unknown AF is $A \sim O$. This is the whole essence of MM methods, instruments.

Gravitational Waves at quasars Q2237

Gravitational Lensing from one quasar in the Chandra telescope image makes four and as a result we have the image of the Einstein Cross, well known to astronomers.

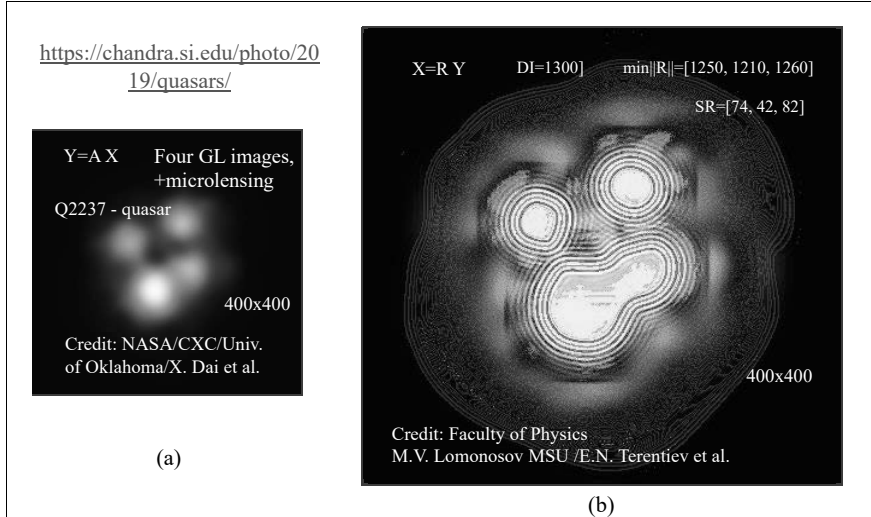


Fig. 3. (a) -Y – image from the Chandra telescope, (b) – X – SR image from the MM output.

GW of Two NSs Before Explosion

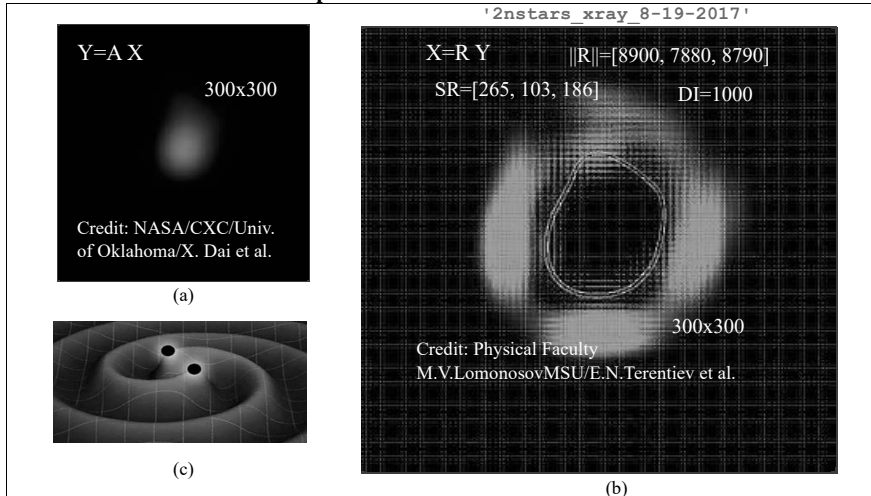


Fig. 4. (a) -Y – image from the Chandra telescope, (b) – X – SR image from the MM output, (c) - science fiction.

In SR image X, pink GW and Event Horizon (a closed line of a pair of light stripes) of two NSs are visible. The original data from Chandra here are not of high quality. At the time of recording the information, the sensor apparently was not cooled well; the mesh from the sensor is visible.

GW of Two NSs During the Explosion

The solution $Y|A=\{O\}X$ can be found by implementing the Physical Tuning Principle (PTP): if for some $AF O \in \{O\}$, $R=O^{-1}$, in $X=R Y|A$ separate isolated objects-points (stars) are revealed, then $AF A=O$ with $\min\|R\|$ (1) [8].

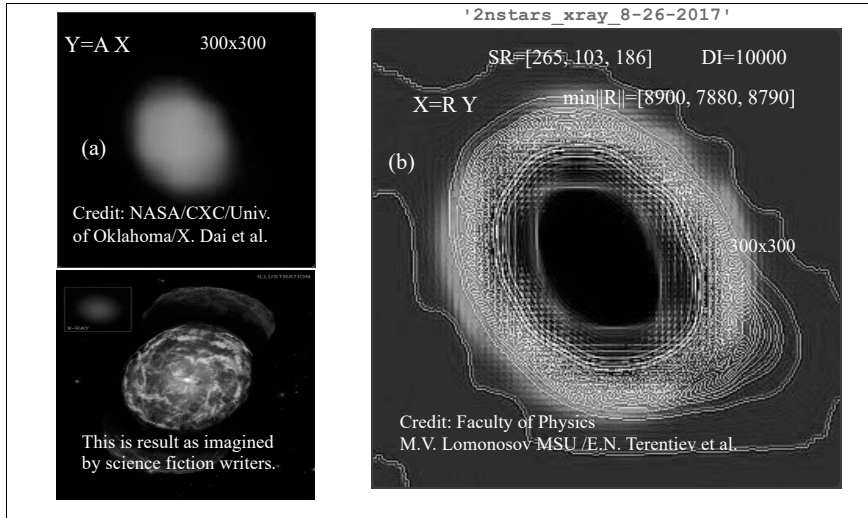


Fig. 5. (a) -Y – image from the Chandra telescope, (b) – X SR image from the MM: explosion into the interior or into the shadow of the BH.

We consider the application of MM in the GL+Telescope+MM complex to be successful. MM technologies are very complex at the stages of determining (thirteen parameters [8]) the shape of the AF O in “ $Q=A$ ”, with the PTP and the usual local inversion $R=A^{-1}$.

Acknowledgements. The authors of the article [7] Xinyu Dai, Shaun Steele, Eduardo Guerras, Christopher Morgan and Bin Chen for the microlensing method.

References:

1. A. Einstein. Zur eingemeinen Relativitats Theorie. Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss., 46, 2, 799-801 (1916).
2. K. Schwarzschild. Ueber das Gravitationsfeld eines Mas-senpunktes nach der Einsteinschen Theorie. Reimer, Berlin S. 189 (1916)
3. Yu.S. Vladimirov. Classical Theory of Gravitation. M., LENAND (2015) (in Russian).
4. B.P. Abbott...V.B. Braginsky, I.A. Bilenko, V.P. Mitrofanov, S.P. Vyatchanin et al. Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Merger. Physical Review Letters, 116, 061102 (2016), DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.061102
5. <https://chandra.si.edu/photo/2019/quasars/> , quasars_he1104.
6. <https://chandra.harvard.edu/photo/2022/gw170817>
7. Dai, X. et al. 2019, AJ, 879, 35, arXiv:1901.06007
8. Terentiev E.N. <https://orcid.org/0000-0003-1024-2575>

GRAVITATIONAL LENSING + TELESCOPE + MATHEMATICAL MICROSCOPE IN THE STUDY OF THE INTERACTION OF THE QUINUPLET OF STARS, THE STRUCTURE OF NEUTRON STARS AND QUASARS

E.N. Terentiev, F.V. Shugaev, N.E. Shilin-Terentyev

Faculty of physics M.V. Lomonosov MSU, Moscow, Russia

119991, Vorobyovy Gory, Building 1-2, <http://www.phys.msu.ru>, fax.: (+7 495)932-88-20,
e-mail: en.teren@physics.msu.ru; shugaev@phys.msu.ru, nikolay.terentyev@gmail.com ;

Annotation

The Mathematical Microscope (MM) has revealed subtle details of the mutual absorption of colliding young stars at the center of our galaxy and the mechanisms of colliding stellar winds that produce diffusive X-ray emissions observed between the stars of the Quintuplet itself. The MM also revealed the complex structures of an isolated neutron star and the complex structures of quasars in Gravitational Lensing (GL).

Mathematical Microscope

Main Problem of M: given: rgb color discrete image $Y|A=[Y_r, Y_g, Y_b]$ and a set of discrete reversible Antenna Patterns (AP) or Apparatus Functions (AF) $\{O\}$. It is required to find a solution to a set of systems of linear algebraic equations $Y|A=\{O\} X$.

Note that we do not know AP or AF $A=[A_r, A_g, A_b]$, and the parametric set of discrete reversible AF $\{O\}$ is our idea of how the unknown discrete AF A is structured in the discrete measurement data $Y|A$.

The solution $Y|A=\{O\} X$ can be found in the following Physical Tuning Principle (PTP): in $X=[X_r, X_g, X_b]$ separate isolated objects-points (stars) or colored Delta-Kronecker (DK) symbols are distinguished. It is clear that if there is only one DK in X , then $Y|A=A \text{ DK}=A$.

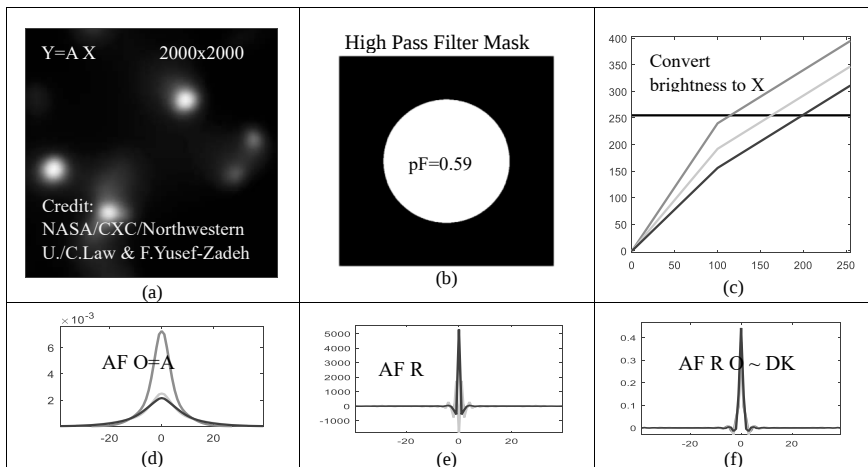


Fig. 1. (a) -Y – Quintuplet image at the MM input [1], (b) – zeroing of high-frequency noise, (c) – transformation of brightness into X, (d-f) – AF MM sections [3].

The solution of the MPMM is a pair: invertible AF $O=[O_r, O_g, O_b] \sim A$ and Super-Resolved image (SR) $X=R Y$, $R=O^{-1}$. If in the resulting SR X we detect individual point objects, DK

symbols. In this case, the PTP becomes a fact and this indicates that we have solved the inverse problem correctly.

Mutual absorption of young stars

First detection of X-rays from stars in the Quintuplet Cluster. More massive stars are losing gas from their surfaces faster in high-speed stellar winds. Bright point concentrations of gas are caused by collisions of high-speed winds in massive stars with closely orbiting partners. The collision of stellar winds also explains the diffuse X-ray emission observed between the stars of the Quintuplet.

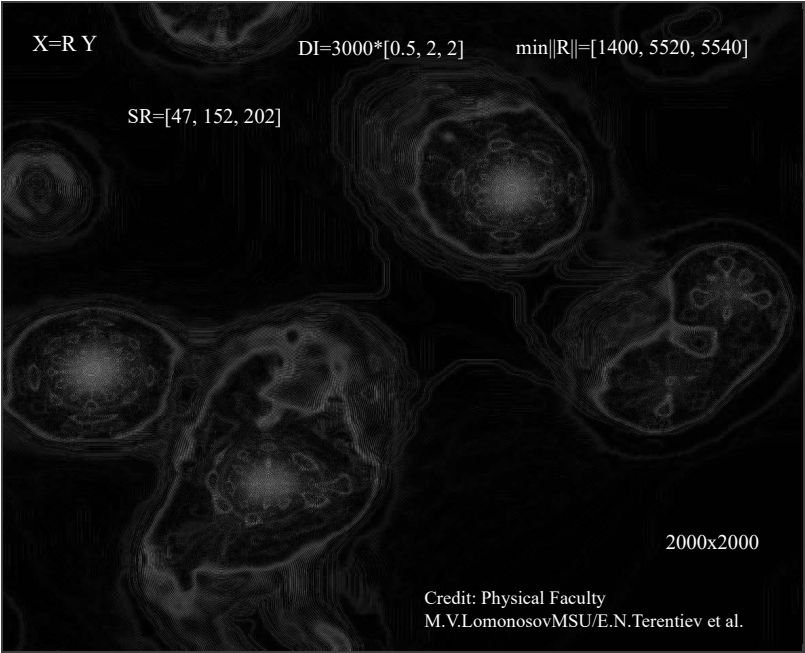


Fig. 2 (a-c) – AF MM sections [3], X=R Y – image at the MM output.

The collision of stellar winds also explains the diffuse X-ray emission observed between the Quintuplet stars.

Structure of a Neutron Star

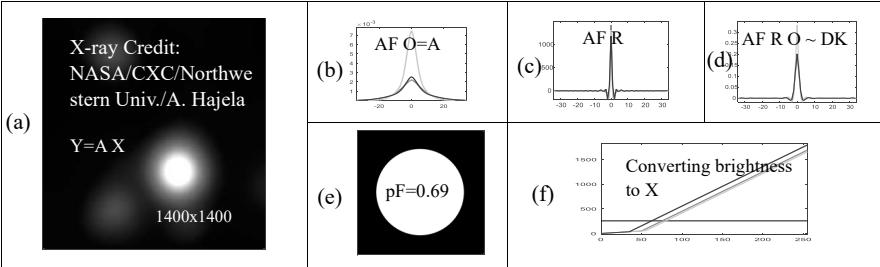


Fig. 3. (a) -Y=A X – image of the NS [2], AF MM, (e) – zeroing of the HF noise, (f) - converting brightness

In the NS, a wide range of super-extreme states of matter are realized [3].

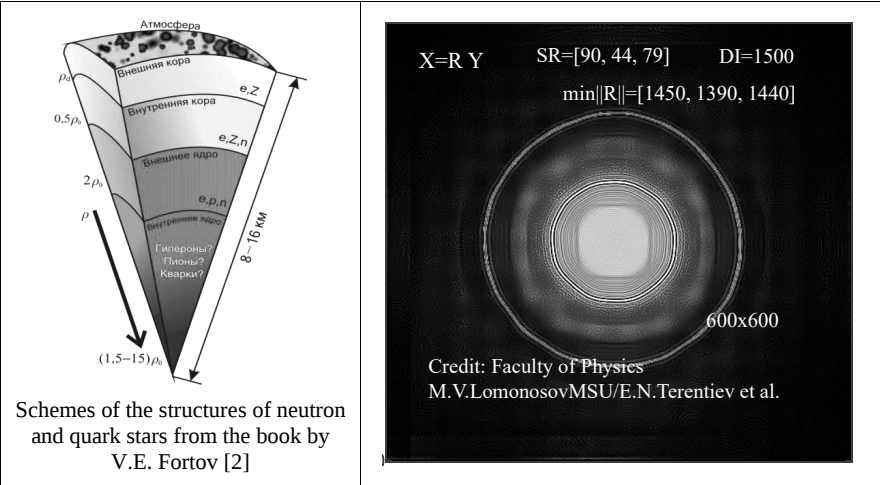


Fig. 4. X=R Y – image at the MM output.

Ultra-extreme states of matter are realized in neutron and quark stars: at super-nuclear densities, super-strong magnetic fields, with superfluidity of the baryon component and intense nuclear transformations of ultra-compressed matter. The atmosphere of a neutron star has a thickness from tens of centimeters to several millimeters, it consists of non-ideal plasma and has a gigantic magnetic field. The outer crust of a neutron star is hundreds of meters thick and consists of dense plasma. At the boundary with the core of a neutron star, atomic nuclei disappear, and neutrons in the inner crust can be superfluid [2].

Cosmic Four-Leaf Clover and Gravitational Lensing

The famous “Cosmic Four-Leaf Clover” Gravitational Lensing (GL) scheme for observing a quasar at a distance of 11 billion light years with the Chandra X-ray telescope [1,2].

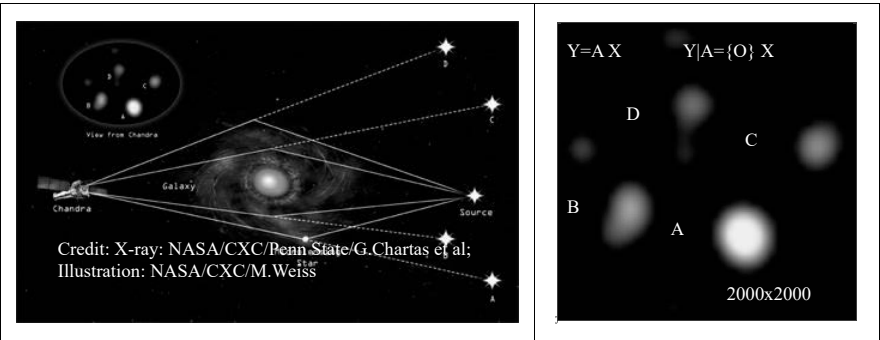


Fig. 5. Schematic diagram of the GL “Space four-leaf clover” [1]

Structures of the observed quasar

Quasars - mysterious objects in our universe, X output with GL+MM, see below.

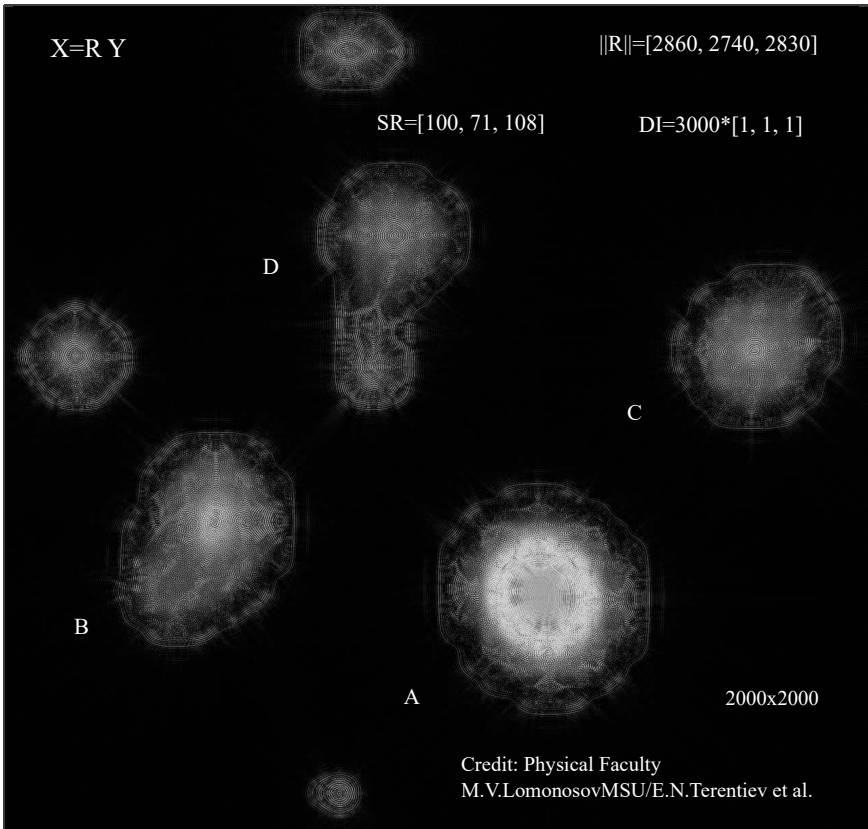


Fig. 6. X – image from the output of the GL+Telescope+MM complex.

Physical Principles of MM Tuning

We are all familiar with the “outgoing rays’ effect” from bright streetlights against a dark sky.

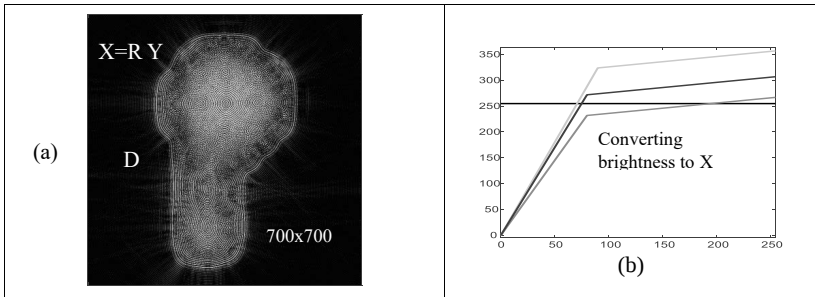


Fig. 7. (a) -X with fragment D of a quasar with the “outgoing rays effect”, (b) – brightness enhancement in X by approximately 3 times for the SR image of X in Fig. 6.

The effect of our visual system (outgoing rays turn with the head turn) is also present in MM if the brightness gain in the over-resolution image X is unbalanced with the suppression of high-frequency noise – the parameter pF , the conditionality value $DI=1/\min MTF(A) \sim \|R\|$, ($AF \ O=A$), which determines the value of the over-resolution SR [2].

The effect of outgoing rays in Fig. 7(a) in our case takes place if we implement the amplification of weak brightnesses by 6-7 times, i.e. implement the amplification 2 times greater than in Fig. 6 (a-b). There is an analogue of MM in our visual system.

We consider the application of the GL+MM complex to be successful. This entire technique is complex, for determining the situation with “ $O=A$ ”, with PTP and the local inversion $R=A^{-1}$.

References:

1. <https://chandra.si.edu/photo/2019/quasars/>, quasars_he1104
2. <https://chandra.harvard.edu/photo/2022/gw170817/>
3. Fortov V.E. Study guide: Extreme states of matter on Earth and in Space, ISBN 978-5-9221-0963-5, Physmatlite, 2008 y.
4. Terentiev E.N. <https://orcid.org/0000-0003-1024-2575>
5. Terentiev, E.N., Terentiev, N. E. ISSN 1062-8738, Bulletin of the Russian Academy of Science. Physics, 2015, Vol.79, No 12, pp.1427-1431, DOI 10.3103/S1062873815120229
6. Terentiev, E.N., Terentiev, N.E., Farshakova, I.I. DOI: 10.1007/978-3-319-77788-7_19
7. Terentiev, E.N., Shilin-Terentyev N.E. doi.org/10.1007/978-3-030-11533-3_44
8. Terentiev, E.N., Farshakova, I.I., Prikhodko, I.N., Shilin-Terentyev, N.E. doi: 10.11648/j.sjams.20190705.12, ISSN: 2376-9491 (Print); ISSN: 2376-9513 (Online).
9. Terentiev, E.N., Farshakova, I.I., Shilin-Terentyev, N.E. <http://www.sciencepublishinggroup.com/journal/paperinfo?journalid=301>
10. &doi =10.11648/j.ajaa.20190703.11
11. Terentiev, E.N., Prikhodko, I.N., Farshakova, I.I. Concept of mathematical microscope, AIP Conference Proceedings 2171, 110010(2019); <https://doi.org/10.1063/1.5133244>
12. E.N. Terentiev, N.E. Shilin-Terentyev, Applications of Math Microscope in the Event Horizon Telescope, Science PG, International Journal of Astrophysics and Space Science, 2021, 9(2), 21-31, <http://www.sciencepublishinggroup.com/j/ijass>, doi: 10.11648/j.ijass.20210902.11, ISSN:2376-7014 (Print); ISSN: 2376-7022 (Online)
13. Evgeni Nikolaevich Terentiev, Fedor Vasilievich Shugaev, Nikolay Evgenievich Shilin-Terentyev. (2022) The Analysis of Action Mechanisms of Black Holes. Journal of Applied Mathematics and Computation, 6(4), 499-507. DOI: 10.26855/jamc.2022.12.012

RESULTS OF APPLICATION OF GRADIENT MORPHOLOGY METHODS

E.N. Terentiev, R.D. Gagarin, E.D. Balaban, D.R. Romanov, I.A. Shatscov

Faculty of physics M.V. Lomonosov MSU, Moscow, Russia

119991, Vorobyovy Gory, Building 1-2, <http://www.phys.msu.ru>, fax.: (+7 495)932-88-20,
e-mails: en.teren@physics.msu.ru; shugaev@phys.msu.ru; nikolay.terentyev@gmail.com ;

Annotation

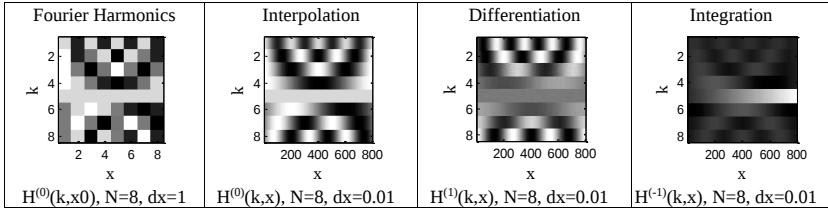
The results of applying the methods of Gradient Morphology (GM) in field theory and in the analysis of vortices, fire plumes, ship wakes are considered.

Introduction

The methods of Gradient Morphology (GM) are based on the Finite Dimensional Sampling Theorem (FDST) [1,4], which allows us to calculate partial derivatives of arrays of numbers, almost with the accuracy of the mantissa (without the use of finite difference schemes), in particular, to calculate gradient fields $B = \text{grad } P$ from scalar images P .

1D FDST

Theorem (Terentiev): 3 objects are given: an array (row) of samples $D=f(x_0)$ and two matrices: Fourier harmonics $H^{(0)}(k, x_0)$, $x_0=0:N-1$ и $H^{(n)}(k, x)$, $x=0:dx:N-dx$. Then the “continuous” function $dx < 1$ $f^{(n)}(x) = (H^{(0)}(x_0) * D) * H^{(n)}(x)$ for $n=0$ passes through the samples points $D=f(x_0)$ [1,4].



In $f^{(n)}(x)$ the first asterisk implements the direct Fourier Transform with harmonics $H^{(0)}(x_0) = \{H^{(0)}(k, x_0), dx=1\}$ and the second asterisk implements the inverse FT with $H^{(n)}(x) = \{H^{(n)}(k, x), dx < 1\}$.

For $n > 0$, we realize the n -th order derivative, and for $n < 0$, the $-n$ order integral with the result in the form of an interpolated “continuous” function with digitization step $dx < 1$ [1-4].

General scheme of application of the GM method

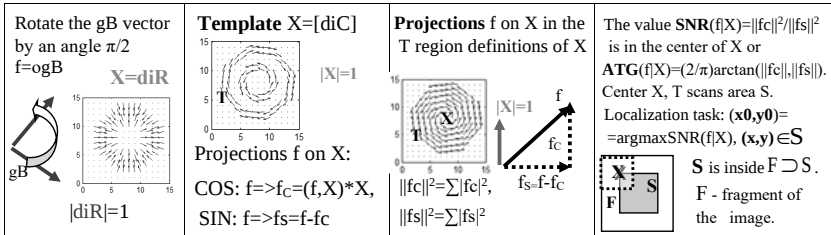


Fig. 1. Operations on vector fields, templates, COS-SIN projections, SNR function and statement of the localization task (template X) of the object.

3D FDST

Theorem (Terentiev): 3 objects are given: an array of samples $D=f(x_0,y_0, z_0)$, the matrices are the Fourier harmonics $H^{(0)}(x_0)$, $x_0=0 : N-1$ and $H^{(n)}(x)$, $x=0 : dx : N-dx$, then the “continuous” function ($dx < 1$)

$$f^{(nx,ny,nz)}(x,y,z) = \sum_{kx,ky,kz=1}^N c_{kx,ky,kz} * H^{(nx)}(kx,x) * H^{(ny)}(ky,y) * H^{(nz)}(kz,z), \quad (1)$$

$$\begin{aligned} c_{kx,ky,kz} &= (f(x_0,y_0,z_0), H^{(0)}(kx,x_0) * H^{(0)}(ky,y_0) * H^{(0)}(kz,z_0)) = \\ &= \sum_{x_0,y_0,z_0=1}^N f(x_0,y_0,z_0) * H^{(0)}(kx,x_0) * H^{(0)}(ky,y_0) * H^{(0)}(kz,z_0), \quad kx,ky,kz=1:N. \end{aligned} \quad (2)$$

passes through sampling points $f^{(nx,ny,nz)}(x_0,y_0,z_0)$.

Scalar products (2) are realized by direct FT, and the Fourier series (1) is realized by “invers FT” with interpolation if $dx < 1$.

The gradient of the array of numbers $D=f(x_0,y_0,z_0)$:

$$\text{grad } D(x,y,z) = \left\{ \frac{\partial}{\partial x} D, \frac{\partial}{\partial y} D, \frac{\partial}{\partial z} D \right\} = \{ f^{(1,0,0)}(x,y,z), f^{(0,1,0)}(x,y,z), f^{(0,0,1)}(x,y,z) \}$$

Field theory operations in the spatial and frequency domains

Below we demonstrate (template-free) GM methods in discrete field theory in the spatial and frequency domains, $P=\{P_x,P_y,P_z\}$ - three 3D arrays of numbers.

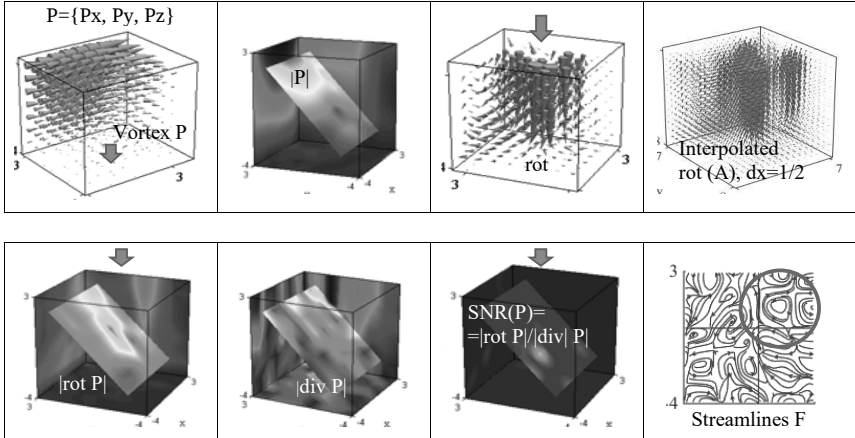


Fig. 2. The vortex axis is detected by the maximum Signal Noise Ratio - SNR values in points: $\text{argmax SNR}(P)$, $\text{SNR}(P)=|\text{rot } P|/|\text{div } P|$.

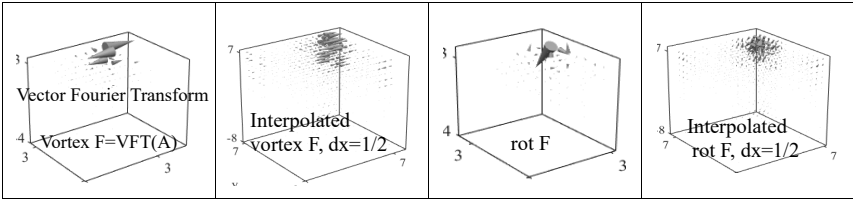


Fig. 3. Rotor operations in spatial and frequency domains with interpolation to identify objects - vortices.

Estimation of two vortices in Jupiter's atmosphere

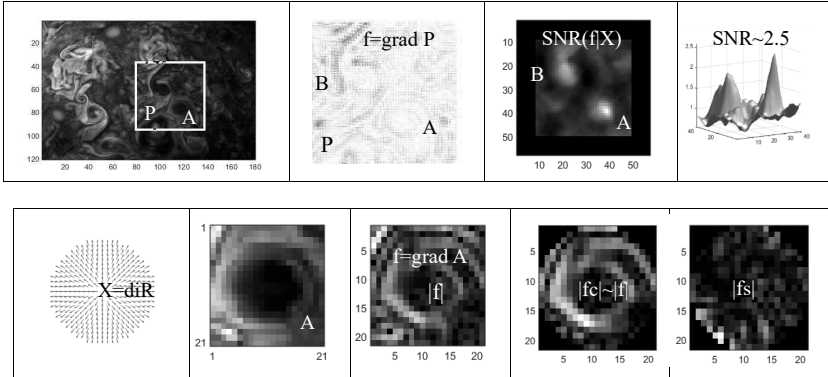


Fig. 4. An example of the resolution of two vortices in Jupiter's atmosphere, $pF=0.55$.

Localization of the vortex in the Crimean current of the Black Sea

Black Sea current map, NASA image and highlighted B (blue) section of the Crimean current with a vortex.

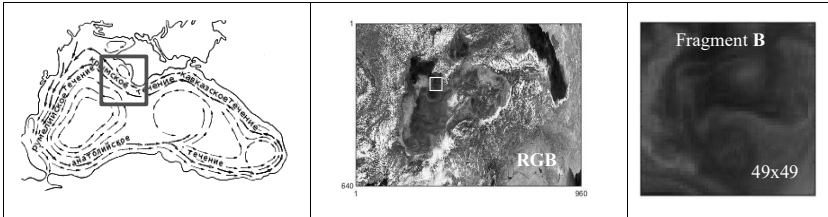


Fig. 5. Black Sea current map, NASA image and highlighted B (blue) fragment of the Crimean current with a vortex.

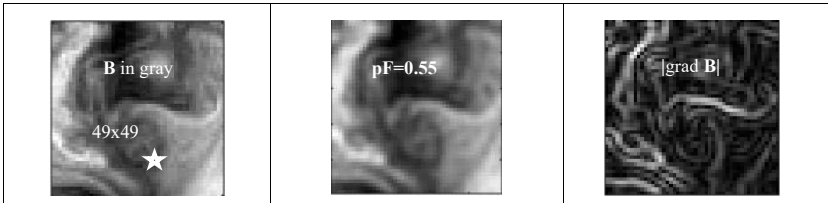


Fig. 6. Zeroing out high spatial frequencies $pF=0.55$ and calculating the gradient $|\text{grad } B|$.

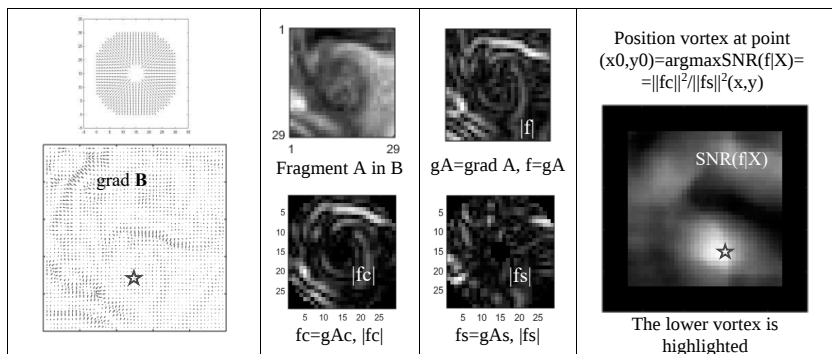


Fig. 7. Solution of the problem of vortex localization in the Crimean current of the Black Sea.

Localization of fire plumes in space images

Existing systems for detecting fires from space use infrared images and indicate a fire where the brightness exceeds a certain value. We cite two systems as examples: FIRMS (firms.modaps.eosdis.nasa.gov/map/) from NASA and Russian Scanex (scanex.ru/).

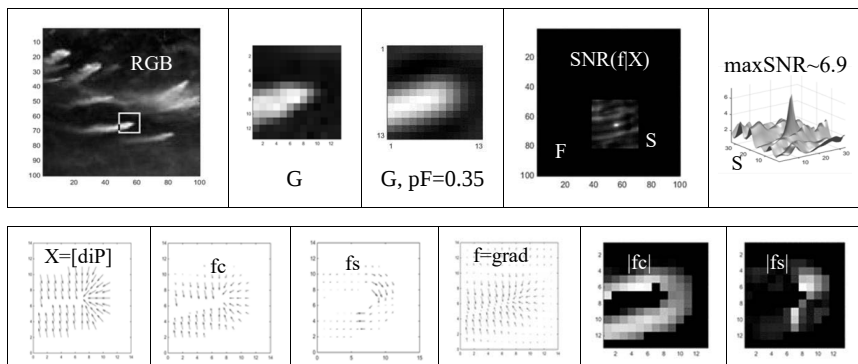
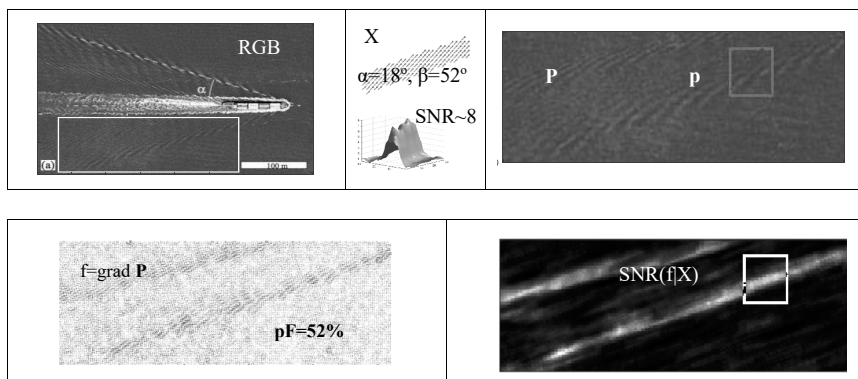


Fig. 5. Robust localization of fires with smoke plumes in images, $pF=0.35$.

Ship wake parameters



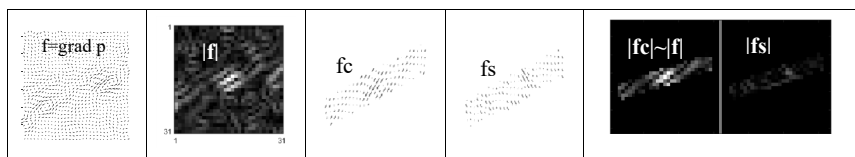


Fig. 6. The left wake of the ship is estimated similarly.

An example where the choice of template is not obvious in the task of localizing an object

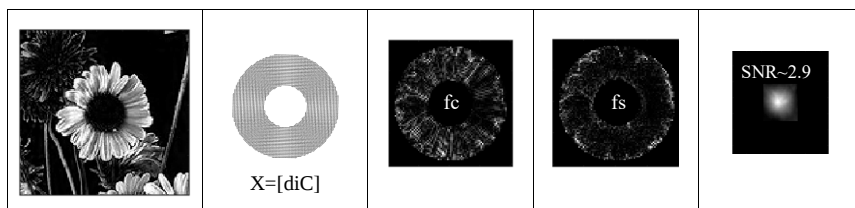


Fig. 7. For the Chamomile flower, this X template can be refined: add $X=[diR]$ to X

Conclusion

GM methods have prospects for application in modeling solutions to problems of wave physics, in electrodynamics, astrophysics, etc.

The ability to accurately assess the position of the Traffic Signs opens up new ways in solving the problem of semantic analysis of images such as “reading Traffic Signs” by the Navigator robot.

Assessing the exact distance between the Eye Pupils makes it possible to formulate new semantic tasks in evaluating parameters of the “Facial Features” type for implementing facial image recognition methods.

The plans of the problem of estimating the parameters of vortices in space images of the Earth with remote monitoring.

Our plans are to apply field theory operations in the analysis of neoplasms such as tumors, ulcers, metastases, etc. on 3D data in tomography.

Possible wide applications GM in the production of processors.

References:

1. Terentiev E.N., <https://orcid.org/0000-0003-1024-2575>
2. Terentiev E.N., Prikhodko I.N., Farshakova I.I., Kuznetsov I. D., Shilin-Terentyev N.E. (2019), Localization of the Vortices and Road Signs in Images, https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-11533-3_30
3. Terentiev E.N., Prikhodko I.N., Farshakova I.I. (2019) Problems of accurate localization objects in imagers, AIP Conference Proceedings 2171, 110009 <https://doi.org/10.1063/1.5133243>
4. Terentiev E.N., Prikhodko I.N., Farshakova I.I. (2019) Applications of finite dimensional sampling theories, AIP Conference Proceedings 2195, 020019; <https://doi.org/10.1063/1.5140119>

DIFFICULT TO INTERPRET OBJECTS OF TYPE 2 AND 3 CIVILIZATIONS

E.N. Terentiev, F.V. Shugaev, N.E. Shilin-Terentyev

Faculty of physics M.V. Lomonosov MSU, Moscow, Russia

119991, Vorobyovy Gory, Building 1-2, <http://www.phys.msu.ru>, fax.: (+7 495)932-88-20,
e-mails: en.teren@physics.msu.ru; shugaev@phys.msu.ru; nikolay.terentyev@gmail.com ;

Annotation

We have identified and resolved in Proxima Centauri [2] an almost square object with a protrusion, this does not look like an exoplanet at all. Similar problems arose when analyzing data in the large corona of the star Beta Ceti, in the galaxy GLASS-z13. The obtained data can logically be associated with objects of Civilizations of the 2nd and 3rd types according to Kardashev N.S. [4].

Type 2 Civilization Objects in Proxima Centauri

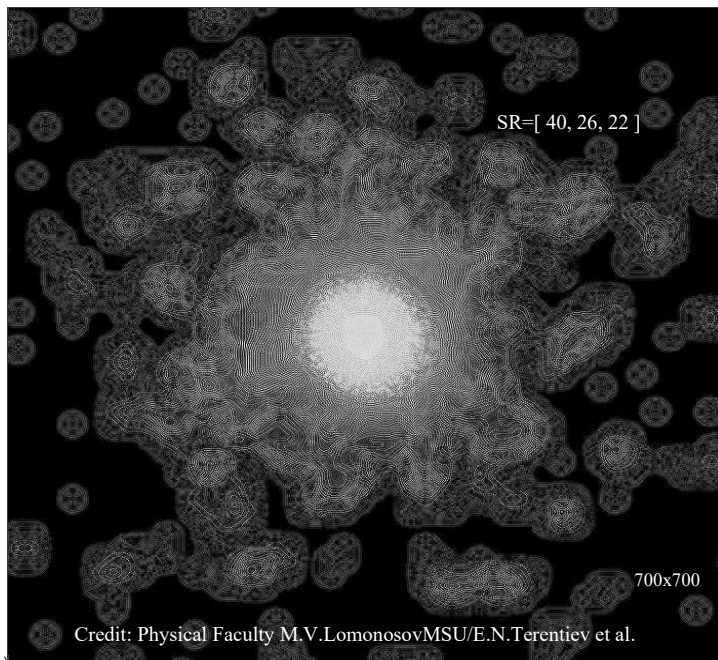
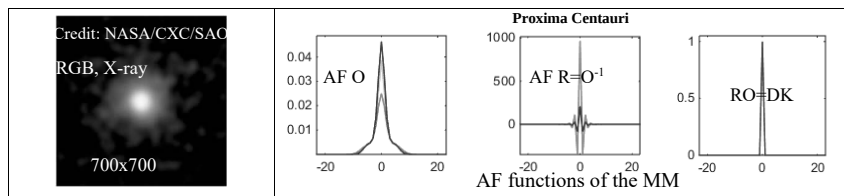


Fig. 1. Proxima Centauri is a red dwarf, “Dyson Eggs” are being laid in the corona.

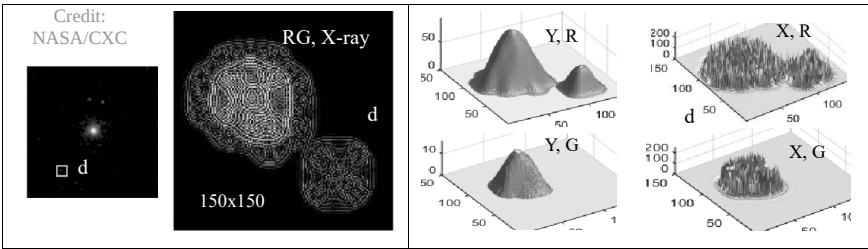
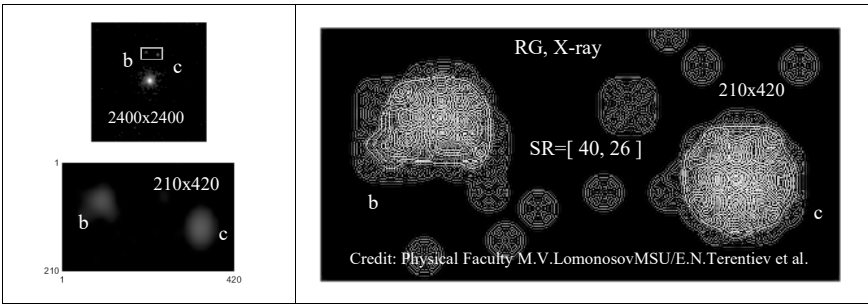


Fig. 2. Exoplanets Proxima Centauri b, c “lay” Dyson eggs - typical objects

The Mathematical Microscope method

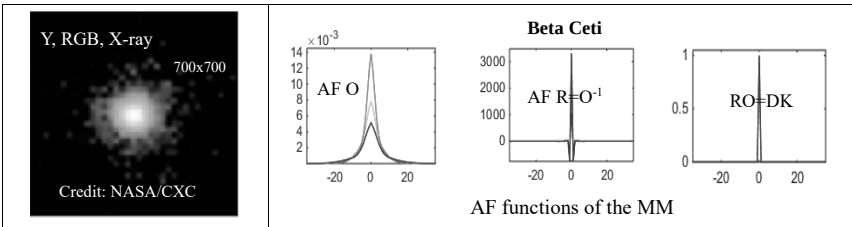
The Mathematical Microscope (MM) method is used to solve a set of systems of linear equations $y|A=\{O\}x$. The data $y|A$ are known, the Apparatus Function (AF) of the measuring instrument A is unknown, and the set of reversible AFs $\{O\}$ is considered as a priori information about the unknown AF A . MM made it possible to identify objects of civilizations of the second and third types.

Physical Fundamental Principle (PFP): if for some AF O from $\{O\}$ in the image solution x we reveal point objects, then $O=A$ takes place and we have the PFP correct solution of the MM problem: $y|A=\{O\}x$ with unknown AF A .

Proxima Centauri lies about 4.3 light years from the Sun. MM we consider objects in the vicinity of a star.

Type 2 Civilization Objects in the crown of the star Beta Ceti

About 96 light-years from the Sun, Beta Ceti is a red star with a characteristic large corona. We used MM to study the structure of the star's corona.



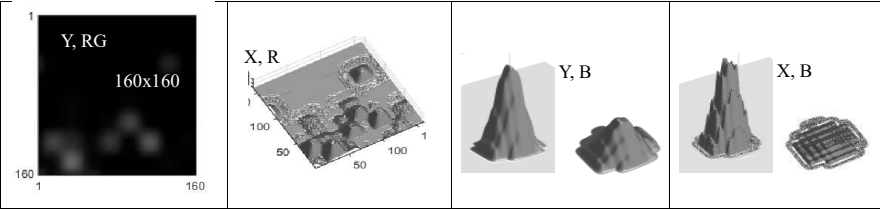
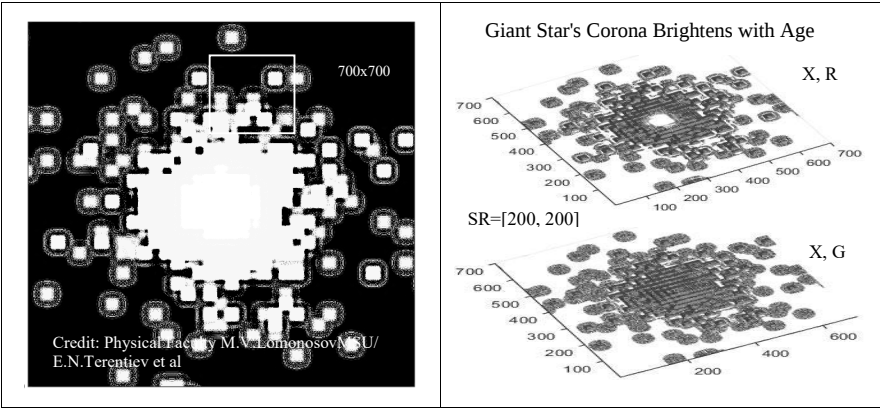


Fig. 3. In the corona of the Beta Ceti star, "Dyson cells" multiply by expanding the nuclei and dividing them in half, followed by division of the enlarged cell.

Type 2 Civilizations' typical objects in Proxima Centauri and Beta Ceti

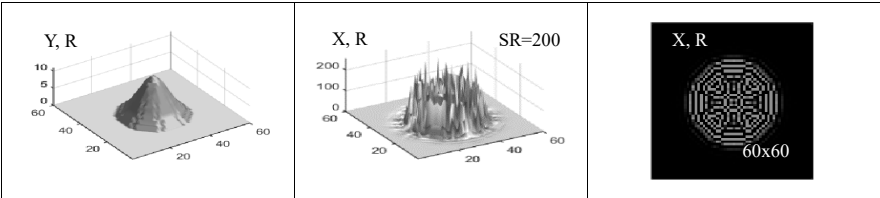


Fig. 4. Dyson Eggs are the same size as the Moon and have changing internal structure.

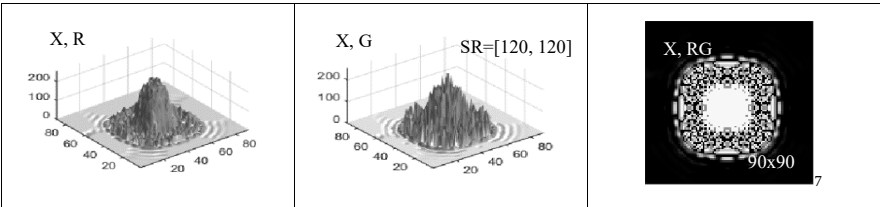


Fig. 5. Dyson Cells are the same size as about 1.5 Jupiter's with stable nuclei in their cells.

Type 3 Civilization Objects in the GLASS-z13 galaxy

The James Webb space telescope discovered one of the oldest galaxies GLASS-z13, the galaxy appeared approximately 300 million years after the Big Bang and 100 million years earlier than other galaxies. This galaxy is located at a distance of 33 billion light years from the Milky Way [5].

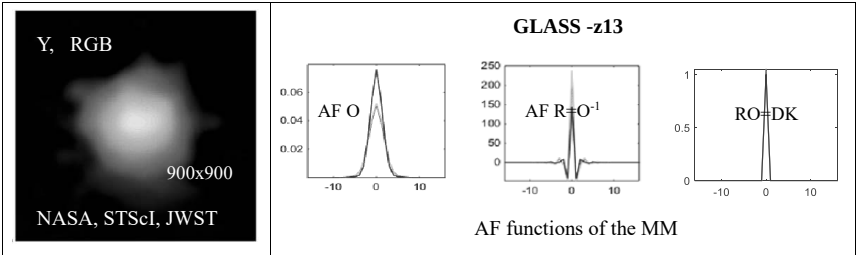


Fig. 6. Galaxy GLASS -z13 and the main AF functions of the MM.

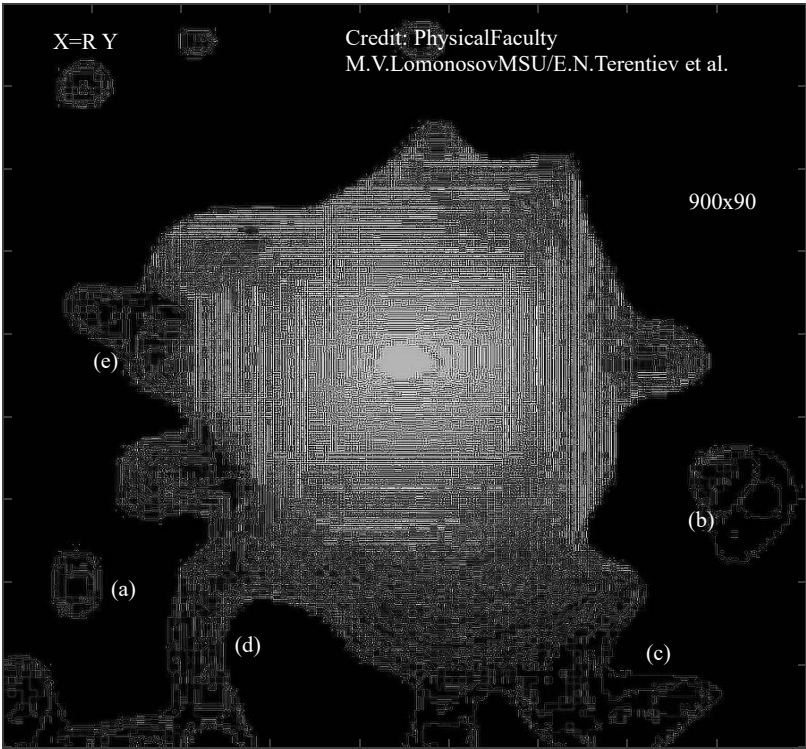


Fig. 7. Galaxy GLASS -z13, 5 places with difficult to interpret objects are highlighted.

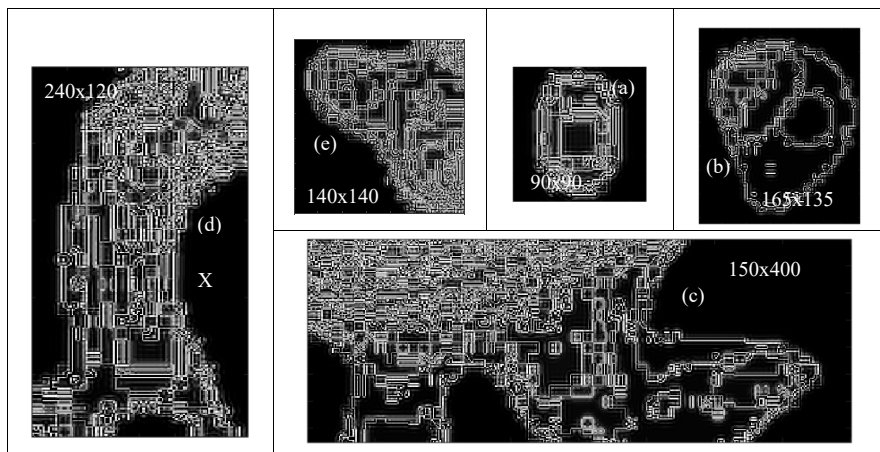


Fig. 8. Galaxy GLASS -z13, 5 difficult to interpret objects are presented separately.

Discussion

MM allowed us for the first time to consider objects of presumably Civilizations of the 2nd and 3rd types according to Kardashev N.S. MM worked from data from Proxima Centauri and from GLAS-z13 - single-byte precision and from data from Beta Ceti - with two-byte precision. The MM has implemented the Super Resolution in situations with “normal inversion” $AF R=O^{-1}$, $DK=R O$.

Conclusions: of course, verification is required, confirmation of our unexpected results by other independent researchers.

Perhaps, for the first time we are facing the problem of the millennium: "like planets - satellites of the Sun" we launch a synchronized system of satellites of the Sun - antennas A8 and transmit synchronized data to the Solar Mathematical Microscope (SMM). The complex <<A8+SMM>> will have an effective aperture the size of a small Galaxy.

References:

1. Терентьев Е.Н. <https://orcid.org/0000-0003-1024-2575>
2. Photo Album :: Proxima Centauri :: 09 Nov 04 - Chandra
3. Chandra :: Photo Album :: Beta Ceti :: 30 Dec 04 (harvard.edu)
4. ru.wikipedia.org > Шкала Кардашева
5. NASA, STScI, JWST

METHOD OF FRACTIONAL DERIVATIVES: APPLICATION TO THE SUBDIFFUSION-CONTROLLED REACTIONS IN THE COMB-LIKE STRUCTURES

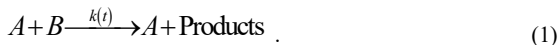
S.D. Traytak

Semenov Federal Research Center for Chemical Physics RAS,
4 Kosygina St., 119991 Moscow, Russian Federation
Tel.: (+7 495)939-71-01, e-mail: sergtray@mail.ru

It has long been known that normal Brownian diffusion of particles (B particles) does not explain the particle transport in many inhomogeneous complex physical systems. Moreover, numerous experiments have shown that often transport of B particles in host media is slower than that due to *normal diffusion*. This kind of transport is called *subdiffusive* and reactions occurring in the subdiffusive host medium are referred to as the *subdiffusion-controlled reactions* [1]. Subdiffusivity greatly complicates the theoretical treatment of these reactions and despite a large body of researches have already performed, study of highly inhomogeneous media still remains a challenge task. Among these inhomogeneous media a particular emphasis is placed upon so-called the *comb-like structures*, which are widely encountered in applications. Really subdiffusion-controlled reactions in the comb-like structures are finding ever-widening applications in biology, chemistry, neuroscience, physics including optics and astrophysics to name just a few.

In this paper, we apply the *fractional differentiation method* (FDM) proposed by Babenko [2] to find the *trapping reaction rate coefficient* for the Dirichlet initial boundary value diffusion problem [3], describing 1D subdiffusion-controlled reactions, occurring in comb-like structures including *inertial effects* into consideration (see, e.g., works [4-7] and references therein). Furthermore, a survey of known theoretical results on the subdiffusion in comb-like structures is given. The explanations presented in the paper are detailed enough to provide the mathematical background for the FDM needed to apply it to a wide range of reaction-diffusion problems with time fractional derivatives in the Riemann–Liouville sense.

We consider a quiescent inhomogeneous chemically inert subdiffusive host medium, where the pseudo-first-order reactions are described by the scheme [3]:



Additionally, particles B are assumed to be identical, point-like and non-interacting. We study subdiffusion-controlled reactions in the rather simple comb-like structures. In Fig. 1 the geometrical sketch for the 2D comb-like models considered in the paper: (a) *Arkhincheev-Baskin* and (b) *Babenko-Ivanov* are depicted.

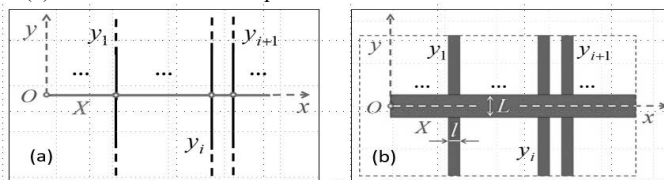


Fig. 1. Particularly for the Arkhincheev-Baskin model (see Fig 1 (a)) configuration space is

$$X \cup Y, \text{ where the backbone } X = \mathbb{R}_+, Y := \bigcup_{i \in \mathbb{N}} Y_i, \text{ and the teeth } Y_i = \mathbb{R} \text{ such that}$$

$Y_i \cap Y_j = \emptyset$ for $i(\neq j) \in \mathbb{N}$. For definiteness sake here we dwell on this very model only

For the above comb structure one can use corresponding contracted description reducing the original (2+1)D space-time diffusion problem to the appropriate (1+1)D one, posed along the backbone. What is more, to apply the FDM it is expedient to introduce the so-called *trapping probability* $u(x, t)$ that a reaction occurs when any B particle undergoes a contact with a sink A located at the boundary $\{x=0\}$ (see Fig 1 (a)). The Compte-Metzler analysis along with the classical correspondence principle allowed us to write down the external Cauchy-Dirichlet boundary value problem describing the subdiffusion-controlled reactions of B particles in the Arkhincheev-Baskin comb-like structure when inertial effects are significant

$$(\partial_t + \sigma_0 \mathcal{D}_t^{1/2} - D_0 \partial_x^2) u(x, t) = 0 \quad \text{in } \mathbb{R}_+^2, \quad (2)$$

$$u(x, t)|_{t \rightarrow 0+} \rightarrow 0, \quad u(x, t)|_{x \rightarrow 0+} \rightarrow 1, \quad u(x, t)|_{x \rightarrow +\infty} \rightarrow 0, \quad (3)$$

$$(\sigma_0 + \mathcal{D}_t^{1/2}) j(x, t) = -D_0 \mathcal{D}_t^{1/2} \partial_x u(x, t). \quad (4)$$

Here $j(x, t)$ stands for the particles B flux field at a current space-time point $(x, t) \in \mathbb{R}_+^2$ ($\mathbb{R}_+^2 = \mathbb{R}_+ \times \mathbb{R}_+$); $\sigma_0 := \tau_D^{-1}$ and $D_0 := \sigma_0 D$, (where τ_D and D are *relaxation time* of the host medium and particles B effective diffusivity, respectively). The *left Riemann-Liouville fractional derivative* of order ν ($-\infty < \nu < 1$) is defined by the linear integral operator [1, 2]

$$\mathcal{D}_t^\nu \{f(t)\} := \frac{1}{\Gamma(1-\nu)} \frac{d}{dt} \int_0^t \frac{f(\xi)}{(t-\xi)^\nu} d\xi \quad t \in \mathbb{R}_+,$$

where $\Gamma(z)$ is the Euler gamma function.

One can see that the desired 1D trapping *rate coefficient* $k(t)$ is

$$k(t) = j(x, t)|_{x \rightarrow 0+}. \quad (5)$$

The posed diffusion problem (2), (3) turns out to be the *Cauchy-Dirichlet problem of the canonical form* [1, 2], so the use of the FDM yields for the rate coefficient the following expansions [8]: (a) for short times $\sqrt{t/\tau_D} \ll 1$:

$$k(t) = k_s(t) \tau_D^{-1/4} \left[1 - \frac{\sqrt{\pi}}{2} \left(\frac{t}{\tau_D} \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{3}{4} \frac{t}{\tau_D} - \frac{5\sqrt{\pi}}{16} \left(\frac{t}{\tau_D} \right)^{\frac{3}{2}} + O\left(\left(\frac{t}{\tau_D} \right)^2 \right) \right], \quad (6)$$

where $k_s(t) := \sqrt{D/\pi t}$ and (b) for long times $\sqrt{t/\tau_D} \gg 1$:

$$k(t) = k_N(t) \left[1 + \frac{\Gamma(1/4)}{8\Gamma(3/4)} \left(\frac{t}{\tau_D} \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{9}{32} \left(\frac{t}{\tau_D} \right)^{-1} - \frac{25\Gamma(1/4)}{156\Gamma(3/4)} \left(\frac{t}{\tau_D} \right)^{\frac{3}{2}} + O\left(\left(\frac{t}{\tau_D} \right)^2 \right) \right], \quad (7)$$

where

$$k_N(t) := \frac{\sqrt{D}}{\Gamma(1/4)} \left(\frac{t}{\tau_D} \right)^{-\frac{3}{4}} = \lim_{t/\tau_D \rightarrow +\infty} k(t) \quad (8)$$

Is known Nigmatullin's rate coefficient [1].

Plots of the asymptotical expansions for $k(t)$ (6), (7) obtained by the FDM (red solid lines) and corresponding rates calculated numerically at $\tau_D = D = 1$ are given in Fig. 2.

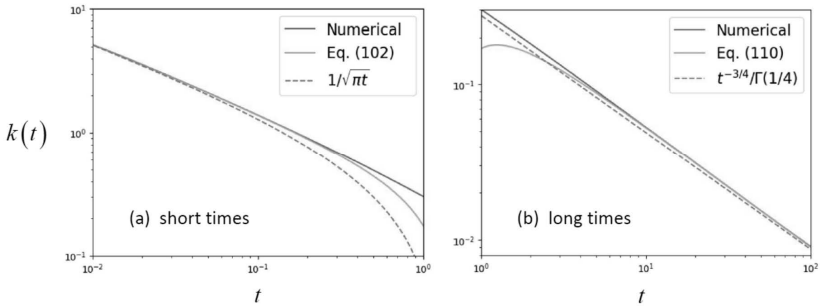


Fig. 2

Based on the results obtained, we can conclude that the use of the FDM allows us to calculate analytically trapping rate coefficient for reactions occurring in the comb-like structures depicted in Fig. 1 directly, without knowing appropriate trapping probability field $u(x, t)$.

References

1. Traytak S.D.// Phys. Rev. E, v. 110, 2024, P. 044145.
2. Babenko Yu.I., Method of Fractional Differentiation in Applied Problems of Heat and Mass Exchange Theory, St. Petersburg: NPO Professional, 2009 (in Russian).
3. Rice S.A., Diffusion-limited Reactions, Amsterdam: Elsevier, 1985.
4. Traytak S.D.// Proceedings of the 6th International Conference on The Modeling of Nonlinear Processes and Systems, Moscow, Janus-K, 2023, P. 69–73.
5. Traytak S.D.// J. Chem. Phys., v. 158, 2023, P. 044104.
6. Lee S. and Traytak S.D.// J. Chem. Phys., v. 158, 2023, P. 204111.
7. Lee S., Traytak S.D. and K. Seki// J. Chem. Phys., v. 159, 2023, P. 144105.
8. Traytak S.D.// J. Chem. Phys. (in Preparation).

AN APPROACH TO MODELING THE LIFE CYCLE OF TECHNICAL SYSTEMS

G.D. Volkova, T.B. Tyurbееva

MSTU "STANKIN", Moscow, Russia

127055, Vadkovskii lane, 3a

Tel.: (+7 499)972-42-55, e-mail: cog-par@yandex.ru

Annotation. The article presents the results of a study of the problems of digital transformation of enterprises. An approach to modeling the life cycle of technical systems, its processes and process relationships is proposed. The analysis and modeling of life cycle processes according to Russian and German practices made it possible to identify the links between these processes. The use of the conceptual modeling method within the framework of the methodology of automation of intellectual labor allowed us to describe in detail the relationships of processes in the life cycle of both technical systems and automated systems.

Keywords: Digital transformation of enterprises, product lifecycle modeling, knowledge system model

At the sixth international digital forum "Digital Almaty 2024: "Industry X: Digital Evolution of the Future", five key global trends in the development of the IT industry were identified. One of the trends noted was the reindustrialization of developed economies, which is carried out using systems to support the full life cycle of products and the creation of digital twins of objects, enterprises and processes.

The creation of systems to support the full life cycle of products is impossible without the availability of tools for its modeling: mathematical, methodological, software and technical, etc.

The digital transformation of enterprises is also impossible without modeling all types of their diverse activities. The needs of enterprises for engineering specialists to ensure their digital transformation are very high. But at the same time, production workers are not able to formulate requirements for such specialists, their knowledge, skills and abilities.

The analysis of the revealed contradiction made it possible to establish differences in methods for material and intellectual productions, as well as to identify methodological and theoretical foundations for design and technological informatics as the foundation of digital transformation of production [1].

A systematic approach to modeling the life cycle of products and its processes made it possible to formally describe both the life cycle itself and its processes at two levels of detail and to perform a graphical interpretation of models based on the conveyor-clock approach [2].

At the upper (1) level of detail, the formal description of the life cycle as a system is generally presented as follows:

$$S_1 = \langle Y, X, q(Y), q(X), R_1 \rangle,$$

where the set Y describes the structure of the life cycle processes and the set X - are the objects involved in these processes, and R_1 are the connections between them.

At the underlying level (2) of detail, a formal description of the life cycle as a system, taking into account the environment, is presented:

$$S_2 = \langle S_1, Z, R_2 \rangle,$$

where $Z = \langle SR, q(SR), R_z \rangle$ – the structure, describing many elements of the environment SR , the set of properties of the elements of the environment $q(SR)$ and the set of connections between the components of this structure R_z ; R_2 – the set of connections between the components of the system S_2 .

The set of elements of the environment is a set of many elements characterizing personnel B , time T , software and technical regulatory PTS and methodological N resources:

$$SR = SUB \cup T \cup PTS \cup N [2].$$

The life cycle model of technical systems can be represented as a hierarchical structure based on the following concepts: life cycle, cycle phase, process, component.

The study of the life cycle processes of technical systems, namely, the specifics of processes and results according to German and Russian practices of material production, allowed us to establish the existence of links between the processes and perform their graphical interpretation [3, 4].

The study of the life cycle processes of automated systems/complexes according to American and Russian practices allowed us to form an integral representation of the structure of their life cycle, taking into account the options for improving these systems/complexes [2].

For a more detailed description of the relationships of processes in the life cycle of both technical systems (material production) and automated systems (intellectual production), conceptual modeling of individual processes was performed in accordance with the method within the framework of the methodology of automation of intellectual labor [5, 6, 7].

This method of conceptual modeling in its applied part provides the formation of a representation of subject knowledge as a set of models at two levels of abstraction and for each model as a set of structures: static, dynamic and linking [7].

Dynamic constructions reflect the decision-making process based on subject constraints/patterns in the relevant subject area. Static constructions reflect relationships on a variety of concepts in this field, ensuring their coherence from the most complex concept of the class "life cycle" to the simplest concepts of the classes "attribute" or "value". Linking constructions reveal the conjugation of subject dependencies with simple concepts and their "pedigree".

Thus, in the semantic modeling of project activity, it is possible, taking into account the levels of abstraction of a technical system (functional-logical, principle of operation, design and technological solution or parametric), to describe in detail the links between design actions and the characteristics of the created technical system in the process of its functioning, taking into account the restrictions imposed by other production processes [8, 9].

Conclusion

Thus, the proposed approach to modeling the processes of the life cycle of technical systems provides a uniform description of both the processes themselves and their relationships.

References

1. Tyurbueva T.B., Volkova G.D., Grigoriev O.G. Analysis of normative support of the life cycle processes of automated systems // Information Technologies And Computing Systems. Moscow, 2017, №2, P. 78-92.
2. Tatiana B. Tyurbueva, Galina D. Volkova and Oleg G. Grigoriev. Modeling of Life Cycle Processes of Automated Systems // Nonlinearity: Problems, Solutions and Application, volume 2. (In Ludmila A. Uvarova, Ph.D., Alexey B. Nadykto, Ph.D., & Anatoly V. Latyshev, Ph.D. (Editors)) - New York, NY: Nova Science Publishers, Inc., 2017. – 363 p., Volume 2. P. 269–279.

3. Paing Soe, Volkova G.D. Features of product modeling at the initial stage using the design methodology using catalogs // Modern Science: Innovations, Projects, Investments: Collection of Materials of the International Scientific and Practical Conference (Ufa, 9 November 2017), 2017. P. 40–45.
4. Volkova G.D., Tyurbееva T.B., Paing Soe. Особенности моделирования системы знаний об изделии по методологии проектирования с помощью каталогов // STIN – М: 2019. № 8. P. 2–4.
5. Volkova G.D. Conceptual modeling of design tasks: study guide / M.: MGTU "STANKIN", 2016. – 117 p.: ill.
6. Tyurbееva T.B., Volkova G.D. Conceptual modeling of life cycle processes of automated systems // Technology of mechanical engineering. 2018. №. 1 (187). P. 49–55
7. Volkova G.D. Theory and practice of automation of intellectual labor. – M.: Janus-K, 2020. – 104 p.
8. Tyurbееva, T.B., Volkova, G.D., So, P. Simulation of a System of Product Knowledge Based on Catalog-Assisted Design // Russian Engineering Research, 2020, № 40(1), p. 55–57.
9. Volkova, G.D., Paing Soe, Tyurbееva, T.B. Modeling of life cycle processes of technical systems according to the design methodology using catalogs // Scientific And Technical Journal "Information Technologies In Design And Production", 2020. №. 2 (186). P. 12–22.

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

А.Ф. Абена

МГТУ «СТАНКИН»

Применение искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения для обнаружения дефектов в твердых телах является направлением, имеющим большое значение для повышения безопасности, надежности и эффективности в различных отраслях промышленности, таких как строительство, машиностроение, аэрокосмическая промышленность и электроника. Традиционные методы обнаружения дефектов, основанные на визуальном осмотре и ручных измерениях, часто подвержены ошибкам и требуют больших затрат времени и средств.

Современные технологии искусственного интеллекта, включая нейронные сети и методы анализа данных, позволяют автоматизировать процесс обнаружения дефектов, тем самым повышая точность и скорость анализа. Модели машинного обучения, включая сверточные нейронные сети (CNN), опираются на методы линейной алгебры, статистики и анализа изображений. CNN эффективно выявляют трещины, включения и поры в материалах, обрабатывая мультимодальные данные (изображения, акустические сигналы).

Технологии глубокого обучения и компьютерного зрения позволяют анализировать аномалии в реальном времени. Интеграция данных из цифрового моделирования повышает надежность прогнозирования дефектов, сокращая затраты на ручной контроль. Основные вызовы включают необходимость больших аннотированных данных и сложность интерпретации результатов. Перспективными направлениями являются разработка объяснимого ИИ (XAI) и оптимизация процессов проверки в реальном времени.

Литература

1. Математика для машинного обучения., Марк Питер Дейзенрот, А. Альдо Фейсал, Чанг Сун Онг, с. 17–37.
2. Обнаружение дефектов в строительных материалах при Помощи систем искусственного интеллекта [Электронный ресурс] – URL: <https://riorpub.com/ru/nauka/article/57672/view>
3. Николас Л., Математика в искусственном интеллекте. [Электронный ресурс] -URL: <https://studeo.app/blog/les-maths-dans-lintelligence-artificielle>.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ С НЕПОДВИЖНЫМ ВЕЩЕСТВОМ ПРИ ПОМОЩИ БИКОМПАКТНЫХ СХЕМ

Е.Н. Аристова, Н.И. Караваева

ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

125047, Миусская пл., д.4

Тел.: (+7 499)220-72-09, e-mail: karavaeva@phystech.edu

Умение моделировать процессы переноса излучения в веществе необходимо для решения целого ряда научных и инженерных задач. Процессы, происходящие при вхождении возвращаемых космических аппаратов в атмосферу, при прохождении мощного лазерного излучения через газ, описываются при помощи уравнений динамики излучающего газа [Зельдович, Райзер, 1966]. Для решения задач высокотемпературной радиационной газовой динамики обычно используют метод расщепления по физическим процессам, одним из блоков которого является совместное решение уравнения переноса излучения и уравнения энергии [Четверушкин, 1985].

Решение уравнений этого блока сопряжено с рядом трудностей, среди которых большая размерность задачи, нелокальность и нелинейность взаимодействия излучения с веществом. При решении задачи в одномерной плоской геометрии решение является функцией координаты, времени, угловой и энергетической переменных. В общем трехмерном случае количество независимых переменных в задаче возрастает до семи. Нелокальность взаимодействия проявляется в том, что, с одной стороны, прохождение излучения через вещество определяется состоянием среды вдоль всей траектории. С другой стороны, излучение, проходя через вещество, меняет его состояние за счет поглощения и переизлучения. Нелинейность задачи связана с наличием в правой части уравнения источника планковского излучения, откуда появляется зависимость от температуры в четвертой степени. Коэффициенты поглощения также являются нелинейными функциями температуры.

Рассматривается задача о переносе излучения в одномерном плоском слое. Уравнение переноса излучения

$$\frac{1}{c} \frac{\partial I_v}{\partial t} + \mu \frac{\partial I_v}{\partial x} + \kappa'_v I_v = \kappa'_v I_v^{Pl} \quad (1)$$

решается совместно с уравнением энергии

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \int_0^1 \int_{-1}^1 \kappa'_v (I_v - I_v^{Pl}) dv d\mu. \quad (2)$$

Уравнения (1) и (2) дополняются уравнением состояния

$$\varepsilon = \varepsilon(T), \quad (3)$$

а также начальными и граничными условиями

$$\begin{aligned} I_v(x, 0, \mu, \nu) &= \psi(x, \mu, \nu), \\ I_v(x, t, \mu, \nu)|_{x=0} &= \varphi_0(t, \mu, \nu) \quad \text{при } \mu > 0, \\ I_v(x, t, \mu, \nu)|_{x=L} &= \varphi_L(t, \mu, \nu) \quad \text{при } \mu < 0, \\ T(x, 0) &= T^*(x). \end{aligned} \quad (4)$$

Искомыми являются следующие функции: $I_v(x, t, \mu, \nu)$ – спектральная интенсивность излучения, проинтегрированная по азимутальному углу, $T(x, t)$ – температура вещества. В (1-4) используются следующие обозначения: $\varepsilon(T)$ – внутренняя энергия вещества, $K'_v(T, \nu)$ – спектральный коэффициент поглощения излучения с поправкой на вынужденное испускание, $I_v^{Pl}(T, \nu)$ – спектральная интенсивность равновесного излучения, проинтегрированная по азимутальному углу, c – скорость света, μ – косинус угла направления полета частицы, составляемого с направлением оси x .

Спектральная интенсивность равновесного излучения, проинтегрированная по азимутальному углу, представляет собой функцию Планка, умноженную на 2π :

$$I_v^{Pl}(T, \nu) = 2\pi \cdot \frac{2h\nu^3}{c^2} (e^{h\nu/kT} - 1)^{-1},$$

где h – постоянная Планка, k – постоянная Больцмана.

Задача (1-4) решается в многогрупповом приближении. Для эффективного понижения размерности задачи и ускорения сходимости итерационных процессов используется HOLO алгоритм, в котором организуется взаимодействие между решением уравнения переноса высокого порядка (HO – high order) и уравнениями низкого порядка (LO – low order) [Гольдин, 1964; Adams, Larsen, 2002]. Понижение размерности производят сначала за счет осреднения по угловой переменной, при этом получают многогрупповую систему уравнений квазидиффузии (уравнения LO₁). Далее производят осреднение по энергии и получают эффективную одногрупповую систему уравнений квазидиффузии (уравнения LO₂).

Для каждого из этапов HOLO алгоритма используется бикомпактная схема, которая строится методом прямых на минимальном двухточечном шаблоне. Схемы для уравнения переноса разрабатывались Б.В. Роговым и его коллегами [Рогов, Михайловская, 2010], схемы для уравнений LO₁ и LO₂ разрабатывались авторами [Аристова, Караваева, 2018; Караваева, 2023]. Схемы обладают четвертым порядком аппроксимации по пространству и могут быть проинтегрированы по времени любым удобным методом. Авторами используются диагонально-неявные методы Рунге–Кутты. Для решения задач переноса излучения в гомогенной среде используется L -устойчивый метод третьего порядка аппроксимации, а для решения задач переноса излучения в гетерогенной среде используется неявный метод Эйлера первого порядка аппроксимации. Различие в используемых методах связано с тем, что при численном решении задачи с использованием схем высокого порядка вблизи точек разрыва коэффициента поглощения могут развиваться значительные немонотонности.

Решение уравнения переноса (HO) по используемой схеме находится в режиме бегущего счета, решения уравнений LO₁ и LO₂ находятся экономичным методом потоковой прогонки. Так как задача является нелинейной, для нахождения решения организуется итерационный процесс, в котором можно выделить внешние итерации и внутренние. В процессе внутренних итераций эффективная одногрупповая система уравнений квазидиффузии (LO₂) решается совместно с уравнением энергии. При этом проводится линеаризация правой части уравнения энергии, получаемый итерационный процесс является квазиньютоновским. Внешние итерации начинаются с внутреннего итерационного процесса, после чего решаются уравнение переноса высокой размерности (HO) и система уравнений LO₁.

Так как используемые схемы являются немонотонными, был предложен способ монотонизации, в процессе которой для каждого из этапов HOLO алгоритма строится

гибридное решение с сохранением интегральных средних по ячейке [Брагин, Рогов, 2019]. Гибридизация решения по бикompактным схемам высокого порядка для уравнений НО, LO_1 и LO_2 производится со схемами более низкого порядка.

Разработанные схемы были исследованы на серии аналитических тестов. Была показана сходимость схемы с третьим порядком по времени и четвертым порядком по пространству [Аристова, Караваева, 2023]. Схемы были применены для решения модельных задач о взаимодействии излучения с веществом (задач Флека) [Аристова, Караваева, 2024]. Результаты хорошо согласуются с результатами, полученными другими методами. Предложена модификация второй задачи Флека, исследована зависимость скорости теплового фронта в оптически толстой области от величины коэффициента поглощения в ней.

Литература

1. Аристова Е.Н., Караваева Н.И. // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша №45. 2018, 28 с.
2. Аристова Е.Н., Караваева Н.И. // Компьютерные исследования и моделирование, т.15, №6. 2023, С.1429–1448.
3. Аристова Е.Н., Караваева Н.И. // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша №64. 2024, 27С.
4. Брагин М.Д., Рогов Б.В. // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша № 8. 2019, 26 с.
5. Гольдин В.Я. // Ж. вычисл. матем. и матем. физики, т.4, №6. 1964, С. 1078–1087.
6. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П., Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. — Москва: Наука, 1966.
7. Караваева Н.И. // Препринты ИПМ им. М. В.Келдыша № 25. 2023, 16 с.
8. Рогов Б.В., Михайловская М.Н. // ДАН, т.430, №4. 2010, С.470–474.
9. Четверушкин Б.Н., Математическое моделирование задач динамики излучающего газа. — Москва: Наука, 1985.
10. Adams M.L., Larsen E.W. // Progress in Nuclear Energy, v.40, №1. 2002, P.3–159.

РАЗРЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ВИНЕРА-ХОПФА ПОСРЕДСТВАМ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛИНОМОВ ЭРМИТА И СИНТЕЗА ВХОДНОГО СИГНАЛА С СООТВЕТСТВУЮЩИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

О.Д. Бибииков, О.Р. Волкова

ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, Россия
127055, Вадковский переулок, 3а
Тел.: (+7 926)246-90-17, e-mail: bibikov2112@gmail.com,
Тел.: (+7 916)226-54-77, e-mail: orvsan@gmail.com

Аннотация: В статье приведены методы позволяющие применять идентификацию объектов на базе уравнения Винера-Хопфа с большей эффективностью.

Ключевые слова: динамическая система, полиномы Эрмита, белый шум, диагностические системы, идентификация, моделирование, нелинейные систем, уравнение Винера-Хопфа.

Основной целью задачи идентификации методом Винера-Хопфа является определение импульсной переходной функции по известному входному и выходному сигналу. Импульсная переходная функция представляет возможность на основе рассогласования моделируемого поведения и реакции системы на возбуждение формировать управляющий сигнал прогнозировать реакцию системы на заданный входной сигнал путём вычисления свёртки входного сигнала $x(t)$ и полученной импульсной характеристики системы $h(t)$ [1]:

$$y(t) = \sum_{j=1}^{\infty} G_j[h_j, x(t)], \quad (1)$$

В силу применения статистических методов для оценки ядер, метод является крайне чувствительным к различным аномалиям данных. Поэтому для успешного применения метода требуется тщательная предварительная фильтрация тестирующего возмущающего воздействия [2, 4, 5].

С ростом порядка функционала растёт и вероятность возникновения ошибок. Наиболее критичными являются вычислительные ошибки ядер, так как ошибки вычислений младших порядков, сильно отражаются на дальнейших расчетах, и ошибки задания функционалов в смысле их ортогональности. Вклад каждого из функционалов, должен отражать определенную степень нелинейности и не допускать пересечения с уже вычисленными функционалами.

$$g_k(a_1, \dots, a_k) = \frac{1}{k!A^k} M[y(t)G_k[h_k, x(t)]], \quad (2)$$

где $M[]$ – операция вычисления математического ожидания по времени; A – интенсивность «белого» гауссовского шума.

В (2) ядро h_k зависит от k параметров:

$$h_k(\tau_1 - \alpha_1, \dots, \tau_k - \alpha_k) = \delta(\tau_1 - \alpha_1) \dots \delta(\tau_k - \alpha_k)$$

Соответственно для эффективного применения данного метода необходимо решить 2 задачи:

1. Получить входную последовательность, которая по своим характеристикам близка к гауссовскому белому шуму.
2. Получить набор попарно ортогональных функционалов, позволяющих максимально близко аппроксимировать рассчитанный выходной сигнал к реальному выходному сигналу.

При численном эксперименте в качестве входной последовательности обычно используется сгенерированная псевдослучайная последовательность с заданными статистическими характеристиками $M[x] = 0$ и $D[x] = 1$. В ходе проведения численного эксперимента с смоделированной системой, было использовано 10000 случайных последовательностей, и средняя абсолютная ошибка моделирования составила 6,45%.

Для получения входной последовательности с характеристиками близкими к гауссовскому белому шуму необходимо проделать ряд шагов, связанных с генерацией набора из K последовательностей:

Рассчитать каждый элемент последовательности по формуле (3)

$$x_k = \sqrt{\frac{Coeff}{NN}} \left(\sum_{j=1}^{NN} X \in [0,1] - \frac{NN}{2} \right), \quad (3)$$

где $X \in [0,1]$ функция, возвращающая равномерно распределенное случайное число в диапазоне от 0 до 1; NN – количество случайных чисел, суммируемых для формирования одного значения последовательности

Далее следует итеративный процесс позволяющий скорректировать существующую последовательность. Алгоритм коррекции последовательности приведен на рисунке 1.

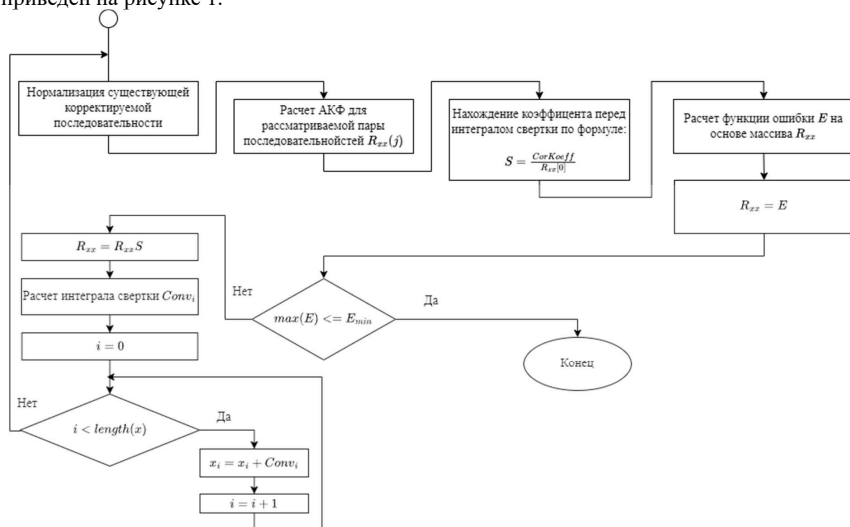


Рис. 1. Алгоритм коррекции последовательности в виде блок-схемы

В итоге выполнения всех перечисленных ранее шагов на выходе получается последовательность, имеющая следующие статистические характеристики:

$$M_x = 1.31 * e^{-17}$$

$$D_x = 1$$

В случае применения рассчитанных данным образом последовательностей удалось получить среднюю абсолютную ошибку моделирования равную 0.94%

В свою очередь ортогональность функционалов важна, так как позволяет исключить кросс-влияние одних функционалов на другие и соответственно повышает точность моделирования системы.

На данный момент времени обычно применяется расчёт ядер функционалов, как расчёт ядер Вольтерра через рекуррентное соотношение Ли-Шетцена и их последующую ортогонализацию с помощью процесса Грама-Шмидта, в ходе которого зависимые вектора превращаются в нули и отбрасываются.

Данный процесс имеет как свои преимущества, так и свои недостатки. Ортогонализация ядер действительно позволяет сделать их попарно ортогональными, но данное действие снижает точность итого моделирования, а также увеличивает время расчета.

Вместо этого предлагаются представлять исходную последовательность как полиномы Эрмита.

$$H_n = \sum_{j=0}^{\left[\frac{n}{2}\right]} (-1)^j \frac{n!}{j!(n-2j)!} (2x)^{n-2j}. \quad (4)$$

Большим преимуществом многочленов Эрмита является тот факт, что они образуют полную ортогональную систему на интервале $(-\infty; \infty)$ с весом $e^{-x^2/2}$ или e^{-x^2} в зависимости от определения.

Так как расчеты ведутся в вероятностном поле, куда более интересными являются полиномы в вероятностном смысле, а именно их явные выражения. Разложим исходную входную последовательность в несколько наборов в соответствии с порядком и используем их в расчете ядер Винера. Тогда разложение выходной последовательности в ортогональные ряды Винера будет выглядеть следующим образом:

$$Y = h_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \int \dots \int h_n \prod_{i=1}^n x(t - \tau_i) \partial \tau_1 \dots \partial \tau_n \quad (5)$$

где $h_0 = M_y$

А все остальные ядра рассчитываются с помощью рекуррентного соотношения:

$$h_m(\tau_1, \dots, \tau_m) = \frac{1}{m! D_{H_m(x)}^m} * M \left[y_i \prod_{j=1}^n H_m(i - \tau_j) \right]. \quad (6)$$

В ходе вычислительно эксперимента были получены следующие показатели, где $\langle G_n, G_m \rangle$ - скалярное произведение двух функционалов:

- $\langle G_0, G_1 \rangle = 7.7e^{-17}$
- $\langle G_0, G_2 \rangle = -4.8e^{-16}$
- $\langle G_2, G_1 \rangle = -0.037$
- Средняя абсолютная ошибка моделирования 0.94%

Также результаты моделирования представлены на рисунке 3.

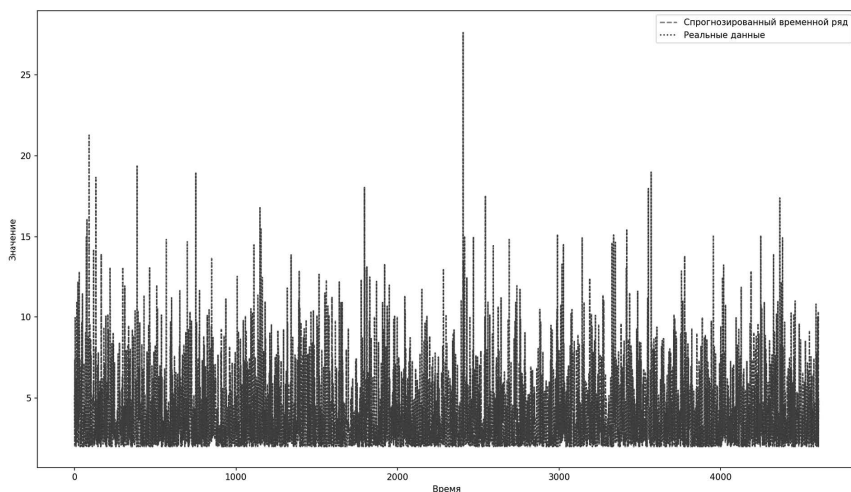


Рис. 2. Визуализация полученных в ходе эксперимента данных.

Исходя из приведенных ранее результатов следует, что применение полиномов Эрмита для расчета ядер функционалов Винера не только возможно, но и более чем оправдано, так как в ходе численного эксперимента была получена высокая точность моделирования исходной системы. А также показывает, что полученная последовательность даёт точность выше в 6.9 раз, чем последовательность, сгенерированная классическим методом.

Литература

1. Бибииков О.Д., Волкова О.Р. Особенности применения метода идентификации технических объектов на базе уравнения Винера-Хопфа в СППР диагностической системы, Моделирование нелинейных процессов и систем. Материалы седьмой международной конференции. – М.: Янус-К, 2024 – 59–62 с.
2. Волков Н.В. Функциональные ряды в задачах динамики автоматизированных систем. М.: Янус-К., 2001. – 100 с.
3. Коплярова Н.В. Алгоритм идентификации систем класса Винера // Сибирский аэрокосмический журнал. 2014. №5 (57). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/algoritm-identifikatsii-sistem-klassa-vinera> (дата обращения: 06.12.2023). <https://cyberleninka.ru/article/n/algoritm-identifikatsii-sistem-klassa-vinera/>.
4. Ли Ю.В., Шетцен М. Определение ядер Винера-Хопфа для нелинейных систем методом взаимной корреляции. В сб. Техническая кибернетика за рубежом. М.: Машиностроение, 1968. – 278 с.
5. Дейч А.М. Методы идентификации динамических объектов. М.: Энергия, 1979. – 240 с.
6. Музыкин С.Н., Родионова Ю.М. Функциональные разложения Винера-Вольтерра в задачах проектирования. - Ярославль: Верхне-Волж. кн. изд-во, 1992. – 218 с.
7. Волкова О.Р. «Влияние статистических характеристик тестирующих процессов на результат идентификации исследуемой системы» // XVI Международная научно-практическая конференция «Фундаментальные и прикладные исследования

- в современном мире» 14.12. 2016, г. Санкт-Петербург, Россия – СПб.: ИИУНЦ, 2016, – С. 70–75.
8. Волков Н.В., Волкова О.Р. «Применение внешнего описания для конструирования динамических моделей технических систем», Вестник МГТУ «СТАНКИН». Научный рецензируемый журнал. М.: МГТУ «СТАНКИН», №2(2), 2008, С. 96–107.
9. Цибизова Т.Ю. Идентификация нелинейных систем автоматического управления при помощи фильтров Вольтерра // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2-14. – С. 3070–3074; URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=37693> (дата обращения: 07.12.2023).
10. Винер Н. Нелинейные задачи в теории случайных процессов. – М. Изд-во иностранной литературы, 1961 – 159с.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ ОБСЛУЖИВАНИЯ С РАЗДЕЛЕНИЕМ ПРОЦЕССОРА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СУПЕРСКАЛЯРНОГО МИКРОПРОЦЕССОРА

Е.А. Бувевич, О.Э. Яремко

МГТУ “СТАНКИН”, Москва, Российская Федерация
127055, Вадковский пер., 3а
Tel.: (+7 499) 972-42-55, email: gftcompmod@gmail.com

USING A PROCESSOR SHARING SERVICE POLICY TO MODEL SUPERSCALAR MICROPROCESSOR

Buevich E.A, Yaremko O.E.

MSTU "STANKIN", Moscow, Russian Federation

Аннотация: рассмотрено применение дисциплины обслуживания с разделением процессора для моделирования ядра суперскалярного микропроцессора с учетом различных типов параллельного выполнения кода. Предложен способ моделирования производительности для заданных алгоритма и оборудования.

Ключевые слова: суперскалярный микропроцессор, система массового обслуживания, разделение процессора, параллелизм уровня инструкций, одновременная многопоточность

Abstract: The application of the processor sharing service policy for modeling the core of a superscalar microprocessor is considered, taking into account various types of parallel code execution. A method for modeling the performance for a given algorithm and hardware is proposed

Keywords: superscalar microprocessor, queueing model, processor-sharing, PS service discipline, instruction level parallelism, ILP, simultaneous multithreading, SMT

Вычислительное ядро суперскалярного микропроцессора является сложным устройством, допускающим несколько типов параллельного исполнения кода. Логически оно представляет собой общую очередь и несколько исполнительных приборов (или модулей) различных типов, являющихся конвейерами, что позволяет такому модулю на каждом такте брать в работу новую инструкцию. Модель подобной системы с точки зрения теории массового обслуживания представлена на рисунке 1а.

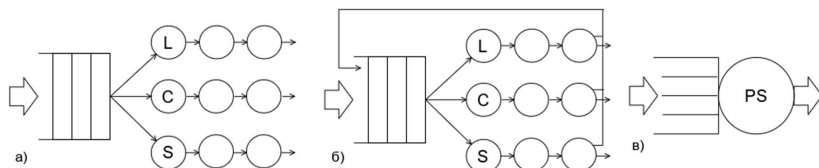


Рис. 1. Модели ядра микропроцессора

В данном случае в качестве задания выступает инструкция процессора. Однако проблемой этой модели являются зависимости по данным между инструкциями – выполнение задания не может начаться, пока не готовы его аргументы, вычисляемые

другими заданиями. Это приводит к модели, показанной на рисунке 1б, заданиями в которой являются зависимые по данным цепочки инструкций. Все потоки в ней детерминированы, для их моделирования необходимо использовать гиперэкспоненциальное распределение. Сложность подобного подхода заставляет искать другие пути оценки пропускной способности. Распространенной является модель Roofline [1], грубо оценивающая производительность как функцию от отношения вычислительных инструкций к работе с памятью. Более детальной является модель ЕСМ [2]. Также существуют специфичные для конкретных задач модели, так для задач линейной алгебры применяется модель, описанная в [3].

Данная работа рассматривает моделирование ядра процессора как исполнительного прибора с дисциплиной "разделенный процессор" (PS в нотации Кендала, рисунок 1в), в которой каждое присутствующее в системе задание получает часть процессорного времени. Под заданием также подразумевается зависимая по данным цепочка инструкций. В работе показано, что подобный подход позволяет получить достаточно простые формулы для оценки производительности системы.

Формула для максимальной пропускной способности PS дисциплины [4, с. 382] $\mu = C_{max}/n$, где n – число заданий в системе, не отражает реальной пропускной способности ядра процессора из-за сложности определения C_{max} . Процессор может выполнять параллельно множество инструкций (несколько инструкций внутри каждого из нескольких конвейеров), но их общее количество лишь частично отражает его производительность для конкретного алгоритма из-за характерных для суперскалярной архитектуры "горизонтальных простоев" [5] – отсутствия нагрузки для некоторых модулей.

Перспективным выглядит подход модели Roofline – оценивать C_{max} как максимальное количество инструкций определенного типа, рассматривая остальные как вспомогательные. Для алгоритмов линейной алгебры этим типом будут векторные вычисления, в частности операции FMA (сложение-умножение). Отсюда можно уточнить формулу пропускной способности как

$$\mu = k_U C_{max}/n \quad (1)$$

где k_U – отношение числа инструкций основного для алгоритма конвейера за такт к их максимально возможному числу (в ядре может быть несколько однотипных модулей), или коэффициент утилизации этого типа модулей (но не всего ядра целиком). Аналогично можно определить коэффициенты утилизации для других типов модулей. В дальнейшем нас будет интересовать только максимальный из них, возможно ограничивающий быстродействие всей системы: $k_o = \max\{k_{U_1}, k_{U_2}, \dots, k_{U_{m-1}}\}$, где m – число типов модулей.

Можно предположить, что, при наличии в системе нескольких заданий, значение коэффициента для всего набора будет некоторой функцией от коэффициентов отдельных заданий или от числа заданий, если они идентичны:

$$\begin{aligned} \bar{k}_U &= \min\{1, F(k_{U_1}, k_{U_2}, \dots, k_{U_n})\} / \max\{1, F(k_{o1}, k_{o2}, \dots, k_{on})\} \\ \text{или } \bar{k}_U &= \min\{1, F(k_U, n)\} / \max\{1, F(k_o, n)\} \end{aligned} \quad (2)$$

Ограничение сверху нужно, поскольку одновременное выполнение нескольких цепочек может потребовать большего количества основных инструкций в такте, чем может процессор. Это приведет к их выполнению в последующих тактах и горизонтальному простоям в других модулях, что с точки зрения искомого коэффициента загрузки основных модулей неважно. Но аналогичная ситуация для других типов инструкций должна быть учтена.

Вычислительные алгоритмы, как правило, сводятся к итеративному исполнению определенного кода с различными входными данными, и таким образом могут быть

отнесены к пакетным закрытым системам массового обслуживания – выполнение одной итерации сразу приводит к появлению следующей с другими данными. Отсюда коэффициент утилизации ядра $\rho=1$ везде кроме начального и конечного участка, и число параллельно выполняющихся заданий может быть любым, поскольку предельная вероятность нахождения этой системы в любом состоянии равна нулю [3]. Таким образом, задача оптимизации производительности алгоритма сводится к нахождению таких n , для которых формула (2) имеет максимальное значение. Рассмотрим вид $F(k_{u1}, k_{u2} \dots k_{un})$ для различных видов параллельного выполнения кода.

Параллелизм уровня инструкций (ILP): длина вычислительного конвейера (также называемая латентностью) является задержкой между поступлением инструкции в конвейер и использованием ее результата. Таким образом k_u цепочки одинаковых инструкций можно описать как $k_u = 1/D$, где D – латентность инструкции. Наличие в цепочке x ассоциативных операций позволяет выполнить ее вычисление несколькими способами, самый медленный из которых ($T = x * D$) – последовательное выполнение, а самый быстрый ($T = \sum_{i=1}^{\log_2 x} \max\{0, D + 1 - 2^i\}$) и требующий максимального количества памяти ($(x+1)/2$) – выполнение только нечётных операций для получения промежуточных результатов, далее выполнение только нечётных операций над ними и так пока не получится конечный результат. Еще одной возможностью использовать параллелизм уровня инструкций является наличие в результате данных, в расчёте которых нет общих промежуточных результатов (например, элементы результирующей матрицы)

Для ILP суммарный коэффициент для нескольких цепочек является их суммой:

$$F(k_{u1}, k_{u2} \dots k_{un}) = \sum_{i=1}^n k_{ui} \quad (3)$$

Если цепочки одинаковы, то $F(k_u, n) = \frac{n}{D}$: для отсутствия горизонтальных простоев необходимо одновременно рассчитывать $n \geq D$ цепочек. Однако процессор имеет ограниченное число регистров, и, в том случае если число промежуточных результатов больше числа доступных регистров, потребуются дополнительные обращения к памяти. В современных архитектурах число вычислительных модулей обычно больше числа доступных сохранений в память на такт, и сохранение результатов становится узким местом, поскольку тогда $k_o > 1$. Отсюда естественным ограничением n сверху является число доступных регистров.

Фазы выполнения кода: если алгоритм предполагает повторное использование операндов, то длина цепочки не может быть бесконечной. Память в современных системах имеет несколько уровней хранения, каждый из которых больше и медленнее предыдущего, в силу чего конвейер, загружающий данные из памяти, имеет переменную задержку, зависящую от уровня, к которому происходит обращение.

Нужно отметить тот факт, что хотя инструкции в общую очередь поступают в порядке следования в коде, но выполняться могут в другом порядке (внеочередное выполнение). При достаточном размере очереди это приводит к тому, что суммарные задержки получения операндов цепочки из памяти равны самой долгой из них если адреса операндов известны заранее. Однако это верно только для тех уровней хранения, которые относятся к вычислительному ядру (сейчас это обычно L1 и L2 кэши), последовательность обращений в более удаленные уровни приводит к переполнению очереди ожидающими операндов вычислениями и простоем всей системы. Таким образом, размеры кэшей являются естественными ограничителями длин цепочек вычислений при повторном использовании операндов (например при матричных операциях). Этот подход воплощен в алгоритме умножения матриц, разработанном Kazushige Goto[6].

Отсюда вытекает разнородность нагрузки в различные моменты выполнения кода. Можно выделить фазу заполнения кэша, для которой характерны операции загрузки и сохранения данных, фазу вычислений и фазу сохранения промежуточных результатов. Задержки первых в цепочке обращений к более далекому уровню хранения данных можно также отнести к отдельной фазе.

В некоторых случаях фаза удается смешивать, чередуя инструкции из них в пропорции, заданной весами ω_i . Это делается автоматически компилятором и процессором, но пределы их возможностей по перемещению инструкций ограничены зависимостями по данным и управлению, поэтому степень подобного смешения в основном зависит от программиста. Часто в результате образуется еще одна переходная фаза, с более выгодной чем у исходных смесью инструкций. Примером подобного подхода является растворение фазы заполнения кэша в первой итерации цикла вычислений в библиотеке BLIS, описанное в работе [7]. Коэффициент для результата смешивания будет взвешенным средним арифметическим:

$$F(k_{U1}, k_{U2} \dots k_{Un}) = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i k_{Ui}}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad (4)$$

Одновременная многопоточность (SMT): ограничение смешивания фаз зависимостями по управлению можно обойти с помощью одновременного выполнения нескольких потоков команд (SMT многозадачность). В данном случае общая производительность будет зависеть от фазового сдвига, чем более разнородную нагрузку дают выполняемые фазы, тем эффективнее их совместное выполнение. К сожалению, механизм, позволяющий управлять этим процессом с точностью до инструкции, отсутствует, хотя гранулярность блокировок растет с каждым новым поколением процессоров. Можно добиться равномерного распределения сдвига фаз для идентичных потоков, добавив в них задержки различной величины, в таком случае, используя формулу математического ожидания биномиального распределения, получим:

$$F(k_U, n) = \frac{nk_U}{(1-K_U)^n + nk_U} \quad (5)$$

Средний коэффициент для последовательности фаз в потоках можно получить по формуле (4), взяв в качестве весов общее количество инструкций в фазах.

Вытесняющая и асинхронная многозадачности: на этом уровне параллельного выполнения нескольких задач ядром не происходит, задача или полностью остановлена или полностью выполняется. Однако, если просто обусловлены обращениями к внешним устройствам, оценить количество заданий, требуемое для полной загрузки системы, можно по следующей формуле:

$$\mu = \frac{T_l}{T_e + T_l} \mu_l = \frac{W_l}{T_e + W_l / \mu_l} \quad (6)$$

где T_l – время локального выполнения задания, T_e – время работы внешних устройств, μ_l – локальная пропускная способность по формулам (1),(2) и одной из формул (3),(4),(5) W_l – число локальных вычислений в задании. Если внешнее устройство описывается дисциплиной PS, T_e можно преобразовать аналогично T_l .

Заключение

Полученные формулы (3), (4), (5) интересны тем что выходное значение $\bar{K}_U$ можно использовать как входное K_U в другой формуле из этого набора, и таким образом собрать модель, описывающую работу заданного алгоритма на заданном оборудовании. В работе [8] подобные вычисления использованы для нахождения оптимального алгоритма умножения плотных матриц на конкретной архитектуре микропроцессоров.

Литература

1. Williams, S. Roofline: An Insightful Visual Performance Model for Multicore Architectures / S. Williams, A. Waterman, D. Patterson // Communications of the acm, vol. 52, no. 4 - 2009 – С. 65–76.
2. Hofmann, J. Bridging the Architecture Gap: Abstracting Performance-Relevant Properties of Modern Server Processors/ J. Hoffman, C. Alappat, G Hager [и др.] // Supercomputing Frontiers and Innovations 7, 2 - Publishing Center of South Ural State University, Челябинск-2020 – С. 54–78.
3. Low T. Analytical modeling is enough for high performance blis. / T. Low, F. Igual, T. Smith, E. Quintana-Ort //ACM Transactions on Mathematical Software, vol. 43 Issue 2 Article No.: 12 – 2016 – С. 1–18
4. Harchol-Balter, M. Performance Modeling and Design of Computer Systems: Queueing Theory in Action. / M. Harchol-Balter; Cambridge University Press, New York, United States, 2013 – 548 с.
5. Tullsen D. Simultaneous multithreading: Maximizing on-chip parallelism. / D. Tullsen, S. Eggers, H. Levy // InProceedings of the 22nd annual international symposium on Computer architecture – Seattle, United States – 1995 – С. 392–403.
6. Goto K. Anatomy of high-performance matrix multiplication. / K. Goto, R. Geijn // ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS), 34(3) – 2008 – С. 1–25.
7. Xu, R. GEMMFIP: Unifying GEMM in BLIS / Xu R., Van Zee F., van de Geijn R. – Текст электронный // ArXiv. – 2023. – 2302.08417 – 16 с. – <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.08417> (дата обращения 16.10.2024) - Режим доступа: arxiv.org: электронная база данных научных публикаций
8. Бувич Е.А. Использование одновременной многопоточности в высокопроизводительных вычислительных алгоритмах. / Е.А. Бувич – Текст электронный // Моделирование, оптимизация и информационные технологии;12(2)-2024 – 13 с. – <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1588> (дата обращения 16.10.2024) – Режим доступа: сетевое издание.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТАМИ В ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

М.И. Булатов, Н.В. Елисеева

ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН", Москва, Российская Федерация,

127055, Москва, Вадковский пер., д.3а,

E-mail: mbulatov625@yandex.ru, n.eliseeva@stankin.ru

Введение

Современные дорожно-строительные предприятия сталкиваются с рядом вызовов, таких как сложность планирования проектов, непредсказуемость внешних факторов (погодных условий, транспортных потоков), ограниченность ресурсов и необходимость строгого соблюдения сроков. Эти проблемы существенно влияют на эффективность выполнения задач и требуют новых подходов к управлению.

В последние годы активно развивается использование методов искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения (МО), которые зарекомендовали себя как мощные инструменты для оптимизации бизнес-процессов. В контексте дорожно-строительных проектов такие технологии позволяют: улучшить прогнозирование сроков выполнения работ, оптимизировать распределение ресурсов, снизить вероятность ошибок и рисков, связанных с человеческим фактором.

Цель данной статьи — изучение возможностей применения методов ИИ для решения ключевых задач управления дорожно-строительными проектами. Особое внимание уделено задачам прогнозирования сроков выполнения, анализа рисков и оптимизации распределения ресурсов.

Математический аппарат

Для достижения поставленных целей используются алгоритмы машинного обучения, которые доказали свою эффективность в решении прикладных задач. Рассмотрим основные подходы.

Одной из важнейших задач является прогнозирование сроков выполнения работ, где возможно применение алгоритмов, таких как Random Forest [8] и Gradient Boosting [9]. Эти модели подходят для анализа сложных многомерных данных, таких как временные ряды погодных условий, объемы выполненных работ и доступность ресурсов. Рассмотрим некоторые их задач. Формула для модели регрессии:

$$y = f(X) + \epsilon, \quad (1)$$

где X — матрица признаков, y — прогнозируемая переменная, f — модель, ϵ — шум.

Пример данных: используются показатели ресурсов, времени работы, погодных условий.

Основные ограничения: размер данных, ограниченность признаков, отсутствие временных аспектов, упрощенная структура ошибок, тип данных, вариативность значений.

Модель регрессии решает задачу минимизации функции потерь:

$$L = \sum_{i=1}^n \ell(y_i(x_i)), \quad (2)$$

где ℓ – функция потерь (например, MAE), Y_i – реальные значения, $f(x_i)$ – предсказания модели.

При решении задачи оптимизация ресурсов применяются модели: Q-Learning, линейное программирование. Пример: планирование использования техники для минимизации простоя.

Алгоритмы Reinforcement Learning применяются для моделирования оптимальной последовательности действий строительной техники.

Пример: обучение модели Q-Learning:

$$Q(s, a) = r + \gamma a' \max Q(s', a'), \quad (3)$$

где $Q(s, a)$ – ценность действия a в состоянии s , r – награда, γ – коэффициент дисконтирования.

Задача линейного программирования:

$$\min \sum_{i=1}^n c_i x_i \text{ при условиях: } \sum_{i=1}^n a_{ij} x_i \leq b_j, \quad (4)$$

Здесь c_i – стоимость ресурса, x_i – объем ресурса, a_{ij} – коэффициенты использования.

Для управления рисками применимы модели: логистическая регрессия, Naive Bayes. Пример: выявление вероятности сбоя при анализе данных о задержках. Для анализа рисков применяются нейронные сети и алгоритмы Байеса.

Методы:

Логистическая регрессия:

$$P(y = 1 | X) = 1 / (1 + e^{-(\omega X + b)}) \quad (5)$$

где:

- $P(y=1|X)$ – вероятность наступления события $y=1$ (например, сбоя в проекте) при заданных признаках X .
- ω – веса, определяющие влияние каждого признака.
- b – смещение, позволяющее модели учитывать базовую вероятность.
- e – основание натурального логарифма.

Логистическая регрессия используется для классификации бинарных исходов (успех/сбой). Преобразование через логистическую функцию гарантирует, что вероятность лежит в пределах от 0 до 1.

Байесовская классификация:

$$P(C | X) = (P(X | C)P(C)) / P(X), \quad (6)$$

где:

- $P(C|X)$ – апостериорная вероятность класса C (например, неблагоприятных условий) при данных X .
- $P(X|C)$ – правдоподобие, вероятность наблюдения данных X при условии, что C наступило.
- $P(C)$ – априорная вероятность класса C .
- $P(X)$ – общая вероятность данных X , выступающая как нормировочный фактор.

Байесовская классификация основана на теореме Байеса, позволяющей обновлять вероятность класса при поступлении новых данных. Это особенно полезно для оценки рисков, где данные обновляются по мере реализации проекта.

Для мониторинга прогресса строительных работ целесообразно применять компьютерное зрение и алгоритмы CNN [10], которые позволяют обрабатывать данные со спутников и дронов для оценки объема выполненных работ.

Эксперименты

Задача эксперимента – продемонстрировать эффективность различных моделей машинного обучения при решении задач управления проектами в дорожно-строительных предприятиях. В ходе эксперимента решается задача прогнозирования времени завершения строительных проектов на основе доступных данных.

Алгоритм проведения эксперимента:

1. Сравнение моделей машинного обучения. Задача – исследование эффективности алгоритмов для решения задачи прогнозирования сроков выполнения проектов. Автор сравнивает три модели: Random Forest, Gradient Boosting и RNN (Recurrent Neural Networks).
2. Оценка метрик производительности, таких как:
 - Средняя абсолютная ошибка (MAE): показывает, насколько в среднем предсказания отклоняются от реальных значений.
 - RMSE (корень из среднеквадратичной ошибки): акцентирует внимание на крупных ошибках.
 - Время обучения: измеряет, насколько быстро модели могут быть обучены на наборе данных.
3. Анализ влияния данных для исследования влияния различных параметров (погодные условия, количество доступных ресурсов, рабочие часы) на точность прогнозов.

Почему это важно: для управления проектами в строительной отрасли точные прогнозы сроков и рисков – ключевой фактор. Выявление подходящей модели машинного обучения поможет оптимизировать процесс управления проектами, минимизировать риски и улучшить использование ресурсов.

Использованы наборы данных:

- **Construction Project Data Analysis:** информация о сроках, ресурсах, погодных условиях.
- **NY Active Projects:** текущие строительные проекты с характеристиками.

Результаты

Таблица 1. Сравнения моделей

Модель	MAE	RMSE	Время работы (с)
Random Forest	1.5	2.3	0.4
Gradient Boosting	1.2	2.0	0.7
Neural Networks (RNN)	1.3	2.1	0.8

1. Эффективность моделей

Проведенные эксперименты показали, что Gradient Boosting продемонстрировал наилучшие результаты по точности (минимальные MAE и RMSE), несмотря на немного большее время обучения по сравнению с Random Forest (таб. 1, рис. 1, 2 (а), 2 (б)). RNN продемонстрировали схожую точность, однако потребовали больше времени на обучение. Это подтверждает, что выбор модели должен учитывать как точность, так и доступное время для обучения.

2. Прогнозирование сроков выполнения проектов

Модели машинного обучения, такие как Random Forest и Gradient Boosting, позволяют учитывать множество факторов, включая погодные условия, доступные ресурсы и рабочие часы, для построения точных прогнозов. Это может существенно сократить количество задержек и снизить дополнительные затраты.

3. Управление рисками

Использование моделей классификации, таких как логистическая регрессия и Naive Bayes, позволяет выявлять ключевые факторы риска на ранних этапах. Анализ исторических данных помогает строить стратегии по минимизации вероятности возникновения сбоев и задержек.

4. Оптимизация ресурсов

Алгоритмы Reinforcement Learning, такие как Q-Learning, доказали свою эффективность для задач распределения ресурсов. Такие подходы могут использоваться для оптимизации работы техники и материалов, минимизируя простои и повышая производительность.

Графики

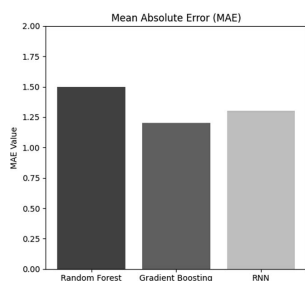


Рис.1 Сходимость MAE для разных моделей

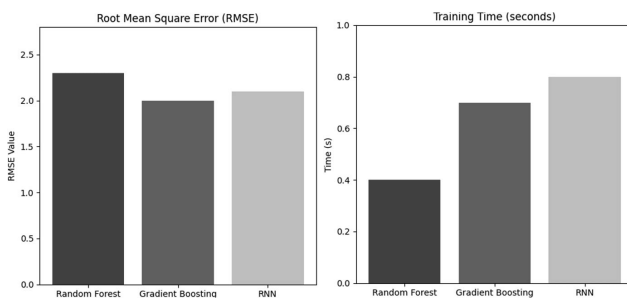


Рис. 2. Распределение ошибок (а), время обучения (б)

Выводы

Данный эксперимент демонстрирует, что применение машинного обучения в строительной отрасли может существенно повысить эффективность управления проектами. Однако для успешного внедрения требуется сбор качественных данных, обучение специалистов и разработка специализированных моделей.

Практическая значимость

Применение технологий искусственного интеллекта в управлении дорожно-строительными проектами открывает следующие возможности:

- Точное прогнозирование сроков: сокращение временных и финансовых затрат.
- Управление ресурсами: эффективное распределение рабочих и техники.
- Анализ рисков: раннее выявление возможных проблем.

Рекомендации для дальнейшего применения

- Использование перекрестной проверки для оценки обобщающей способности моделей.
- Адаптация моделей под конкретные задачи и особенности данных.
- Интеграция технологий в существующие системы управления проектами.

Литература

1. Chen, J., & Wang, Z. (2023). "Forecasting Infrastructure Project Completion Using Machine Learning" in Proc. Int. Conf. Mach. Learn. Appl., 2023.
2. B. Singh, R. Kumar and V. Singh, "Reinforcement learning in robotic applications: A comprehensive survey", Artif. Intell. Rev., vol. 55, pp. 945-990, Feb. 2022.
3. Seda Yeşilmen & Bahadır Tatar (2022). "Efficiency of convolutional neural networks (CNN) based image classification for monitoring construction related activities: A case study on aggregate mining for concrete production" Constr. Build. Mater., vol. 341, pp. 127–139, May 2022.
4. Yuan Fang & Xiaoqing Lu & Hongyang Li. "A random forest-based model for the prediction of construction-stage carbon emissions at the early design stage" Sustain. Cities Soc., vol. 78, pp. 265–279, 2023.
5. Булатов М.И. Технология повышения качества обучения искусственной нейронной сети в задачах управления объектами дорожно-транспортной инфраструктуры / М.И. Булатов, Н.В. Елисеева, В.Е. Петров // International Journal of Open Information Technologies. – 2024. – Т. 12, № 4. – С. 87-92.
6. Kaggle Datasets: Open Data for Machine Learning Research. <https://www.kaggle.com/code/kscoder77/construction-project-data-analysis>.
7. И.И. Романенко. "Автоматизация дорожных строительных работ при применении информационных систем и 3D-моделей" Изв. ВУЗов. Строительство, vol. 10, no. 2, pp. 24–33, 2019.
8. Analyticsvidhya: Understanding Random Forest Algorithm With Examples. <https://www.analyticsvidhya.com/blog/2021/06/understanding-random-forest/>.
9. Analyticsvidhya: Gradient Boosting Algorithm: A Complete Guide for Beginners. <https://www.analyticsvidhya.com/blog/2021/09/gradient-boosting-algorithm-a-complete-guide-for-beginners/>.
10. Analyticsvidhya: Introduction to Convolutional Neural Networks (CNN). <https://www.analyticsvidhya.com/blog/2021/05/convolutional-neural-networks-cnn/>.

РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ПОДДЕРЖКИ АУДИТОРНОГО ФОНДА УНИВЕРСИТЕТА

А.В. Быстров, Н.В. Елисеева

МГТУ "СТАНКИН", Москва, Россия

127055, Вадковский пер., д.3а

Тел.: +7(919)993-90-47, Почта: antonbystrov18@yandex.ru

Аннотация

В статье рассмотрена разработка интеллектуальной диалоговой системы на основе модели GPT для автоматизации технической поддержки аудиторного фонда университета. Основной целью является повышение качества и скорости взаимодействия студентов, преподавателей и технических служб. Чат-бот выполняет функции предоставления информации об аудиториях, создания заявок на обслуживание, поиска и бронирования помещений. Интеллектуальные возможности GPT, такие как контекстное понимание запросов, персонализация взаимодействия и адаптация функционала под роль пользователя, делают систему эффективным инструментом для оптимизации образовательного процесса.

Ключевые слова: интеллектуальная система, чат-бот, GPT, техническая поддержка, аудиторный фонд, автоматизация, образовательный процесс.

Введение

В современных университетах техническое состояние аудиторного фонда играет важную роль в организации образовательного процесса. Студенты и преподаватели ежедневно сталкиваются с необходимостью получения информации об аудиториях, оборудовании и расписании, а также решения технических проблем [1]. Разработка интеллектуальной диалоговой системы (чат-бота) становится перспективным решением для упрощения коммуникации и повышения эффективности работы технической поддержки [2]. Чат-бот способен отвечать на большинство запросов об аудиторном фонде университета, накапливать знания в процессе диалога и перенаправлять на сотрудника технической поддержки в случае неспособности выполнения поставленной задачи.

Целью является сокращение времени и повышение качества рабочих коммуникаций участников образовательного процесса с техническими службами университета для получения информации об аудиторном фонде. При этом объектом исследования выступает техническая поддержка университета. Предмет исследования – предоставление технической поддержки аудиторного фонда с использованием интеллектуальной диалоговой системы.

Участники диалога и функции интеллектуальной системы

Основными участниками диалога являются студенты, преподаватели и сотрудники университета, которые могут воспользоваться следующими функциями системы:

- предоставление информации об аудиториях университета (техническом состоянии оборудования, установленных на компьютерах программных средствах, расписании занятий, расположении и т. д.);
- возможность создать заявку на обслуживание аудиторий;
- поиск аудитории по параметрам;
- бронирование аудиторий.

Также функции системы включают в себя накопление базы знаний (запоминание предпочтений преподавателей и использование их для составления расписания, обновление информации об аудиториях на основе пользовательских заявок), персонализацию взаимодействия (автоматическое предложение информации о занятиях, указанных в расписании пользователя на текущий день, динамическая подстройка функционала под роль пользователя), оптимизация вопросов и ответов (часто задаваемые вопросы и функции предлагаются в приоритетном порядке, улучшая пользовательский опыт).

Разработка чат-бота

В основе чат-бота лежит Generative Pre-trained Transformer (GPT). GPT - это современная языковая модель, разработанная компанией OpenAI, основанная на архитектуре трансформеров. Она предназначена для обработки и генерации естественного языка, обеспечивая контекстное понимание текста и формирование осмысленных ответов. GPT обучается на огромных объемах текстовых данных, что позволяет ей решать широкий спектр задач в области обработки текста [3].

Гибкость и возможности настройки параметров GPT делают его универсальным инструментом для решения различных задач. Настраивая параметры, можно подстроить результаты работы модели под конкретные нужды [4]. Мы используем следующие параметры:

- Temperature (случайность генерируемого ответа) = 0.5. Данное значение подходит для запросов, основанных на фактах, чтобы обеспечить более точные и надежные ответы;
- Top P (разнообразие генерируемого вывода путем усечения вероятностного распределения слов) = 1, т.е. языковая модель может использовать любые лексемы при генерации ответа;
- Frequency penalty (ограничивает токены в зависимости от того, как часто они встречаются в тексте на данный момент) = 0.6, т.е. указание не использовать одни и те же слова слишком часто;
- Presence penalty (контролирует, насколько модель предпочитает использовать слова и фразы, которые уже присутствуют в контексте) = 0, т.е. среднее значение шансов на использование новых слов и фраз.

В нашем случае система обучается и генерирует ответы на основе предоставленных баз знаний об аудиториях, расписании занятий и заявок на обслуживание от пользователей.

Использование GPT позволяет:

- анализировать ввод пользователя и извлекать из него ключевую информацию;
- понимать сложные запросы на естественном языке;
- генерировать ответы, которые звучат естественно и содержат релевантную информацию на основе предоставленных баз знаний;
- обрабатывать грамматически неправильные или неполные запросы;
- запоминать информацию из предыдущих запросов в рамках одной сессии, создавая ощущение непрерывного диалога;
- обновлять базу знаний с учетом данных, полученных от пользователя [5].

Примеры таргетных запросов пользователей:

- Где расположена аудитория 0205?
- Какие лекционные аудитории свободны 20 апреля в 18:00?

- Какое оборудование установлено в аудитории 308?
- В аудитории 0806 сломан проектор, просьба отремонтировать.

Платформой для реализации системы является кроссплатформенный мессенджер Telegram. Пример диалога представлен на Рис. 1.

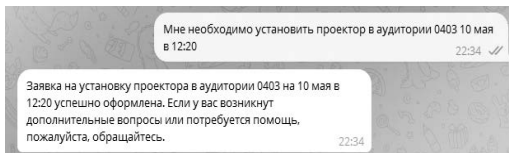


Рис. 1. Заявка на установку оборудования

Заключение

Таким образом, разработка интеллектуальной системы в форме чат-бота для технической поддержки аудиторного фонда университета позволит существенно упростить взаимодействие между участниками образовательного процесса. Использование GPT в основе системы предоставляет возможность организовать интеллектуальную и гибкую систему технической поддержки аудиторного фонда университета. Высокая точность понимания запросов, контекстная обработка данных и способность к обучению делают GPT идеальным выбором для создания инновационных решений в образовательной среде. Это не только оптимизирует процессы взаимодействия с технической поддержкой, но и повышает удовлетворенность всех участников образовательного процесса.

Литература

1. Сагинова О.В., Завьялова Н.Б., Скоробогатых И.И. Показатели исследовательской деятельности и эффективность преподавателя // Вестник Российского экономического ун-та им. Г.В. Плеханова. - 2014. - №11(77). – С. 3–15.
2. Окулова Л.П. Автоматизация и компьютеризация процесса обучения как способ повышения эффективности обучения // Электронный научно-практический журнал Культура и образование. – 2014. – №2(6). – С. 32.
3. Анахов С.В. Цифровизация в научно-технической и образовательной сфере: прорывы и перспективы // Новые информационные технологии в образовании и науке. 2021. № 4. С. 7–15. <https://doi.org/10.17853/2587-6910-2021-04-7-15>.
4. Integral Robot Technologies and Speech Behavior. Alexander A. Kharlamov & Maria Pilgun eds. – Newcastle upon Tyne: Cambridge Scholars Publishing, 2023. – 407 pp.
5. Introducing ChatGPT // OpenAI, 2022. [Электронный ресурс]: <https://openai.com/blog/chatgpt> (дата обращения 26.11.2024).

ОБСУЖДЕНИЕ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И ФУНКЦИЙ БИОНАНОФЕРМЕНТАТИВНЫХ МЕТАЛЛОСодЕРЖАЩИХ КОМПЛЕКСОВ

THE DISCUSSING OF THE STRUCTURE AND FUNCTIONS OF THE BIONANOENZYMATIC METALCONTAINING COMPLEXES

**Л.Ю. Васильева¹, Л.А. Уварова¹, Е.Ю. Романова²
L.Yu. Vasil'eva¹, L.A. Uvarova¹, E.Yu. Romanova²**

¹ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН»,
127055, Россия, Москва, Вадковский переулок, д. 3а
e-mail: uvarova@stankin.ru, kati-v@yandex.ru
²ТВЕРСКОЙ ИНСТИТУТ (ФИЛИАЛ) АНО ВО МГЭУ,
170006, Россия, Тверь, улица Дмитрия Донского, д. 37

¹MSTU «STANKIN»,
127055, Russia, Moscow, Vadkovskiy lane, 1
²TVER BRANCH OF MOSCOW HUMANITIES AND ECONOMICS UNIVERSITY,
170006, Russia, Tver, Dmitry Donskiy Street, 37

Исходя из того, что бионаноферментативные комплексы – сложные, нелинейные, информационные, самоорганизующиеся системы, рассматриваются следующие методы моделирования структуры и функций бионаноферментативных комплексов: 1) квантово-химические методы, дающие возможность построить электронную структуру активных центров; 2) комплекс таких методов, как метод валентных связей (ВС); теорию кристаллического поля (ТКП); теорию поля лигандов (ТПЛ), с помощью которых определяется роль ионов d-металлов в активных центрах, их стереохимию и поэтапное функционирование, роль белкового матрикса; 3) при моделировании переходов комплексов из одного состояния в другое при их функционировании в результате обмена информацией между структурными уровнями использовался аппарат марковских процессов, который позволил определить вероятности состояний из решения систем уравнений Колмогорова.

Based on the fact, that bionanoenzymatic complexes are complex, nonlinear, informational, self-organizing systems, the following methods for the modeling of the their structures and functioning of bionanofermentative complexes are considered: 1) the quantum chemical methods that make it possible to construct the electronic structures of the active centers; 2) a set of the methods, such as the valence bond method (VB); the crystal field theory (CFT); the ligand field theory (LFT), with the help of which the role of d-metal ions in the active centers, their stereochemistry, the role of the protein matrix and the step-by-step functioning of the active centers are determined; 3) when modeling the transitions of complexes from one state to another during their functioning as a result of the exchange of the information between the structural levels, the apparatus of Markov processes was used, which made it possible to determine the probabilities of states from solving systems of Kolmogorov equations. In conclusion, the diagram-model of the complexes functioning is given.

Ключевые слова: бионаноферментативный комплекс, активный центр, процесс, система, структура, функционирование, информация.

Keywords: bionanoenzymatic complexes, active centers, process, system, structure, functioning, information.

Бионаноферментативные комплексы выполняют в биосистемах различные функции: каталитические, т.е. переносчиков электронов за счёт переменной валентности ионов d -металлов в активных центрах комплексов, перенос кислорода, окисление H_2O до O_2 , могут также использоваться как биокатализаторы в некоторых технологических процессах. Общее представление о молекулярной структуре многих бионанокомплексов такого рода были получены в результате их исследования различными физико-химическими методами [1, 2], на основании которых можно сделать следующие выводы: 1) белковый матрикс имеет глобулярную структуру в которую встроены активные центры, связывающиеся с атомами азота или кислорода белкового окружения (лигандами); 2) центральные ионы d -металлов определяют стереохимию активных центров; 3) функционирование активных центров в общих чертах определялись в рамках теории ферментативного катализа.

Квантовохимический подход, заключающийся в использовании таких методов, как: теория кристаллического поля (ТКП), теория поля лигандов (ТПЛ), теория симметрии и теория групп, дал возможность смоделировать электронные структуры активных центров бионаноферментативных комплексов и наномеханизм их функционирования [3–8]. На рис. 1 представлен пример такой модели:

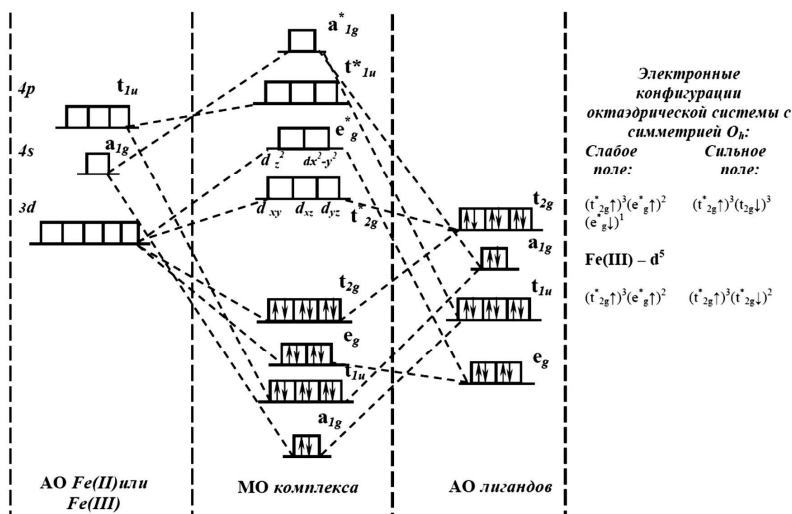


Рис. 1. Квантово-химическая модель активного центра железопорфиринов с центральными ионами $Fe(II)$ и $Fe(III)$: слева – атомные орбитали (АО) свободного иона, справа – АО лигандов, в центре – распределение электронов на функциональных молекулярных орбиталях (МО) комплекса.

Распределение электронов на функциональных МО e_g^* и t_{2g}^* для центральных ионов указано справа [8, с.79]

Квантовохимические модели дали возможность выделить общие универсальные особенности бионаноферментативных комплексов: 1) взаимодействие центрального иона с белковыми лигандами осуществляется по донорно-акцепторному механизму: ионы *d*-металлов предоставляют на связь вакантные орбитали, а белковые лиганды – неподеленную пару электронов; 2) наномеханизм функционирования активных центров в конечном сводится к поступлению электрона на МО комплекса при взаимодействии с субстратом, что переводит комплекс в возбужденное состояние, а затем уход электрона после окончания акта взаимодействия; 3) в переходные периоды белковый матрикс за счёт конформационных изменений сохраняет структуру активных центров, их симметрию; 4) заключительный акт – возвращение активного центра в исходное состояние.

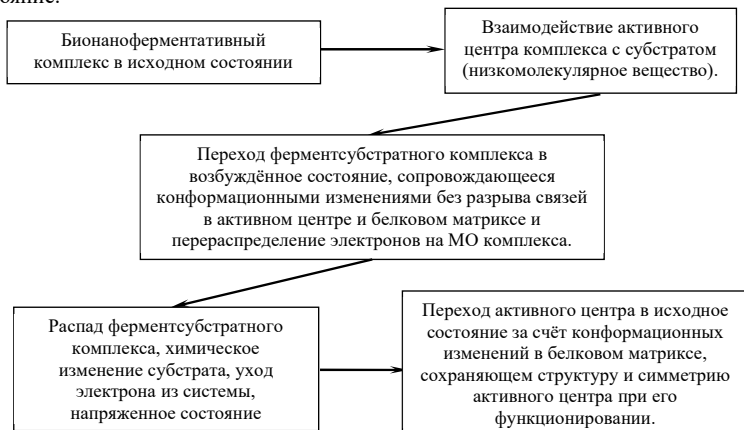


Рис. 2. Схема-модель функционирования бионаноферментативного комплекса

Бионаноинформационные комплексы по всем признакам являются нелинейными, информационными, самоорганизующимися системами [9, 10]. Интересно, что при их функционировании реализуются такие виды информации, как термодинамическая, внутренняя, ценная, квантовая. Очевидно, что информация в ферментативных системах играет управляющую, функциональную роль [8]. В подобных системах за счёт обмена информацией между структурными уровнями происходит переход из одного устойчивого состояния в другое. Одно из важнейших свойств таких систем заключается в том, что все происходящие в них процессы когерентны. На основании вышеизложенного была рассмотрена марковская модель процессов, происходящих в рассматриваемых комплексах в виде системы уравнений Колмогорова на основании следующего алгоритма [10, 11]:

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = \sum_{j=1}^n \lambda_{ji} P_j(t) - P_i(t) \sum_{j=1}^n \lambda_{ij}, \quad (1)$$

где $P_i(t)$ – вероятности состояния частей системы, λ_{ij} и λ_{ji} – интенсивности потоков сигналов, $\lambda_{ij} P_i(t)$ и $\lambda_{ji} P_j(t)$ – потоки вероятностей переходов из одного состояния в другое: $S_i \rightarrow S_j$ или $S_j \rightarrow S_i$. Для любого t для вероятностей состояний должно

выполняется условие нормировки $\sum_{i=0}^n P_i(t) = 1$. Согласно (1) строится система дифференциальных уравнений.

Варируя значения λ_{ji} с учётом условия $0 \leq \lambda_{ji} \leq 1$ можно получить различные режимы функционирования исследуемой системы: стабильное устойчивое, не стабильное, разрушение системы.

В заключении, обобщая вышеприведенные рассуждения и результаты, можно представить следующую схему-модель функционирования бионаноферментативных комплексов, содержащих ионы *d*-металлов в активных центрах (рис. 2).

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования (проект № FSFS-20240007).

Литература

1. Методы и достижения бионеорганической химии.// Под редакцией К. МакОлиффа. – М.: Издательство «Мир», 1978 – 416 с.
2. Волькенштейн М.В. Физика ферментов. – М.: Наука, 1975 – 198 с.
3. Берсукер И.Б. Электронное строение и свойства координационных соединений. – Л.: Химия, 1976 – 348 с.
4. Васильева Л.Ю., Романова Е.Ю. Значение теории симметрии при моделировании функционирования биологически-активных нанок комплексов.// Вестник МГУП, № 1, 2005. – С. 34 – 43.
5. Vasil'eva L.Yu. Quantum-chemical models of the structure and the functions of the active centers of the polynuclear complexes. Mathematical modeling: problems, methods, applications. Kluwer Academic/ Plenum Publishers. New-York, Boston – London – Moscow, 2001. p. 175 –179.
6. Васильева Л.Ю., Васильева Е.Ю. Функциональные модели биологически-активных комплексов, содержащих ионы марганца и кобальта.// Сб.н.тр. «Фундаментальные физико-математические проблемы и моделирование технико-технологических системы». – М.: Янус-К, 2004. Вып.7. С. 286 – 291.
7. Васильева Л.Ю., Романова Е.Ю. Анализ информативности квантово-химических моделей бионанок комплексов.// Материалы международной междисциплинарной научной конференции «Синергетика в естественных науках. Шестые Курдюмовские чтения». – Тверь: ТвГУ, 2010. С. 137 – 139.
8. Васильева Л.Ю., Уварова Л.А., Романова Е.Ю. Некоторые проблемы нанотехнологий. Исследования и моделирование наносистем: кластеров и наночастиц: Учебное пособие/ Васильева Л.Ю., Уварова Л.А., Романова Е.Ю. – М.: Янус-К, 2015 – 154 с.
91. Теория систем и системный анализ в управлении организациями: Справочник: учебное пособие/ Под ред. В.Н. Волковой и А.А. Емельянова. – М.: Финансы и статистика: ИНФРА – М., 2009 – 848 с.
10. Хакен Г. Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам. – М.: КомКнига, 2005. – 248 с.
11. Вентцель Е.С. Исследование операций. – М.: Высшая школа, 2001. - 208 с.
12. Васильева Л.Ю., Уварова Л.А., Романова Е.Ю. Марковская модель процессов, происходящих в сложной самоорганизующейся системе под действием информационных процессов.// Сб. н. тр. Фундаментальные физико-математические проблемы и моделирование технико-технологических систем. Вып.18. – М.: Янус-К, 2017. С. 110 – 115.

ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Г.Д. Волкова, Т.Б. Тюрбеева

МГТУ «СТАНКИН», Москва, Россия

127055, Вадковский пер., 3а

Tel.: (8 499)972-94-86, e-mail: cog-par@yandex.ru

Аннотация В статье изложены результаты исследования проблематики цифровой трансформации предприятий. Предложен подход к моделированию жизненного цикла технических систем, его процессов и связей процессов. Анализ и моделирование процессов жизненного цикла по российской и немецкой практикам позволил выявить связи этих процессов. Использование метода концептуального моделирования в рамках методологии автоматизации интеллектуального труда позволило детально описать связи процессов в жизненном цикле как технических систем, так и автоматизированных систем.

Ключевые слова Цифровая трансформация предприятий, моделирование жизненного цикла изделий, модель системы знаний

На шестом международном цифровом форуме «Digital Almaty 2024: «Индустрия X: цифровая эволюция будущего» были определены пять ключевых глобальных тенденций развития IT-индустрии. Одной из тенденций была отмечена реиндустриализация развитых экономик, которая осуществляется с применением систем поддержки полного жизненного цикла изделий и созданием цифровых двойников объектов, предприятий и процессов.

Создание систем поддержки полного жизненного цикла изделий невозможно без наличия инструментария его моделирования: математического, методического, программно-технического и др. Цифровая трансформация предприятий также невозможна без моделирования всех видов их разнообразной деятельности. Потребности предприятий в инженерных специалистах, обеспечивающих их цифровую трансформацию, очень велики. Но при этом производственники не в состоянии сформулировать требования к таким специалистам, их знаниям, навыкам и умениям.

Анализ выявленного противоречия позволил установить различия в способах для материальных и интеллектуальных производств, а также выявить методологические и теоретические основы для конструкторско-технологической информатики как фундамента цифровой трансформации производства [1].

Системный подход к моделированию жизненного цикла изделий и его процессов позволил формально описать как сам жизненный цикл, так и его процессы на двух уровнях детализации и выполнить графическую интерпретацию моделей на основе конвейерно-тактового подхода [2].

На верхнем (1) уровне детализации формальное описание жизненного цикла как системы в общем виде представляется следующим образом:

$$S_1 = \langle Y, X, q(Y), q(X), R_1 \rangle,$$

где множество Y описывает структуру процессов жизненного цикла и множество X - объекты, участвующие в этих процессах, а R_1 - связи между ними.

На нижележащем уровне (2) детализации формальное описание жизненного цикла как системы с учетом среды окружения представляется:

$$S_2 = \langle S_1, Z, R_2 \rangle,$$

где $Z = \langle SR, q(SR), R_z \rangle$ – структура, описывающая множество элементов среды SR , множество свойств элементов среды $q(SR)$ и множество связей между компонентами этой структуры R_z ; R_2 – множество связей между компонентами системы S_2 .

Множество элементов среды есть совокупность множеств элементов, характеризующих кадровые SUB , временные T , программно-технические SUB , нормативно-методические N ресурсы: $SR = SUB \cup T \cup PTS \cup N$ [2].

Модель жизненного цикла технических систем можно представить как иерархическую структуру на следующих понятиях: жизненный цикл, фаза цикла, процесс, компонент.

Исследование процессов жизненного цикла технических систем, а именно, специфику процессов и результатов по немецкой и российской практикам материального производства, позволило установить наличие связей между процессами и выполнить их графическую интерпретацию [3,4].

Исследование процессов жизненного цикла автоматизированных систем/комплексов по американской и российским практикам позволило сформировать интегральное представление структуры их жизненного цикла с учетом вариантов совершенствования этих систем/комплексов [2].

Для более детального описания связей процессов в жизненном цикле как технических систем (материальное производство), так и автоматизированных систем (интеллектуальное производство) было выполнено концептуальное моделирование отдельных процессов в соответствии с методом в рамках методологии автоматизации интеллектуального труда [5,6,7].

Данный метод концептуального моделирования в прикладной его части обеспечивает формирование представления предметных знаний как совокупности моделей на двух уровнях абстрагирования и для каждой модели как совокупности конструкций: статических, динамических и увязки [7].

Динамические конструкции отражают процесс принятия решений на основе предметных ограничений/закономерностей в соответствующей предметной области. Статические конструкции отражают отношения на множестве понятий этой области, обеспечивая их связность от самого сложного понятия класса «жизненный цикл» до самых простых понятий классов «признак» или «значение». Конструкции увязки раскрывают сопряжение предметных зависимостей с простыми понятиями и их «родословной».

Так, при семантическом моделировании проектной деятельности можно с учетом уровней абстракции технической системы (функционально-логического, принципа действия, конструкторско-технологического решения или параметрического) детально описать связи между проектными действиями и характеристиками создаваемой технической системы в процессе ее функционирования с учетом ограничений, накладываемыми другими производственными процессами [8,9].

Заключение

Таким образом, предлагаемый подход к моделированию процессов жизненного цикла технических систем обеспечивает единообразное описание как самих процессов, так и их связей.

References

1. Тюрбеева Т.Б., Волкова Г.Д., Григорьев О.Г. Анализ нормативного обеспечения процессов жизненного цикла автоматизированных систем // Информационные технологии и вычислительные системы. Журнал РАН, Москва, 2017, №2, с.78–92
2. Tatiana B. Tyurbeeva, Galina D. Volkova and Oleg G. Grigoriev. Modeling of Life Cycle Processes of Automated Systems // *Nonlinearity: Problems, Solutions and Application*, volume 2. (In Ludmila A. Uvarova, Ph.D., Alexey B. Nadykto, Ph.D., & Anatoly V. Latyshev, Ph.D. (*Editors*)) – New York, NY: Nova Science Publishers, Inc., 2017. – 363 p., Volume 2. P. 269-279.
3. Пай Со, Волкова Г.Д. Особенности моделирования изделия на начальной фазе по методологии проектирования с помощью каталогов // Современная наука: инновации, проекты, инвестиции: сб. материалов международной научно-практической конференции (г. Уфа, 9 ноября 2017) – Иркутск: «Научное партнерство «Алекс», 2017. С.40–45.
4. Волкова Г.Д., Тюрбеева Т.Б., Пай Со. Особенности моделирования системы знаний об изделии по методологии проектирования с помощью каталогов // СТИН. Научно-технический журнал – М: 2019. №8. С.2–4.
5. Волкова Г. Д. Концептуальное моделирование проектных задач: учеб. пособие / М.: ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», 2016. – 117с.:ил. ISBN 978-5-7028-0597-9
6. Т.Б. Тюрбеева, Волкова Г.Д. Концептуальное моделирование процессов жизненного цикла автоматизированных систем // Технология машиностроения, Технология машиностроения. 2018. № 1(187). С.49–55.
7. Волкова Г.Д. Теория и практика автоматизации интеллектуального труда. – М.: Янус-К, 2020.-104с. ISBN 978-5-8037-0805-6.
8. Tyurbeeva T.B., Volkova G.D., So P. Simulation of a System of Product Knowledge Based on Catalog-Assisted Design // *Russian Engineering Research*, 2020, 40(1), стр. 55–57 (**Scopus**) DOI: 10.3103/S1068798X20010220
9. Волкова Г.Д., Пай Со, Тюрбеева Т.Б. Моделирование процессов жизненного цикла технических систем по методологии проектирования с помощью каталогов // научно-технический журнал «Информационные технологии в проектировании и производстве»-М.: Изд-во ФГУП «НТЦОК «Компас», - 2020. №2 (186). С.12-22. ISSN 2073-2597.
DOI: 10.52190/2073-2597_2022_2_12. EDN: CGTZAZ

ПРИМЕНЕНИЕ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ КАРТ КОХОНЕНА ДЛЯ КЛАСТЕРИЗАЦИИ СЛОЖНЫХ ДАННЫХ

Воронин Н.С.

ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

В эпоху больших данных и сложных многомерных информационных массивов традиционные методы анализа не всегда позволяют выявить скрытые закономерности и структуры. Это особенно актуально для задач кластеризации, где требуется группировка данных без заранее известной разметки. Одним из перспективных направлений решения подобных задач являются самоорганизующиеся карты Кохонена (SOM) – нейросетевой метод, способный не только находить естественные кластеры в данных, но и визуализировать их в удобном для анализа виде. Благодаря этим свойствам SOM находят применение в биоинформатике, маркетинговой аналитике, обработке изображений и других областях, требующих работы со сложными нелинейными структурами.

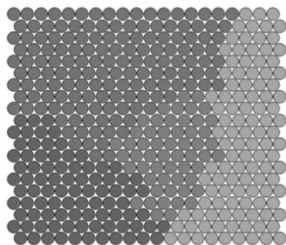


Рис.1. Самоорганизующаяся карта Кохонена (SOM): визуализация кластеризации многомерных данных в двумерном пространстве

Классические методы кластеризации, такие как k-means, DBSCAN и агломеративные алгоритмы, демонстрируют хорошие результаты на четко структурированных данных с явно выраженными кластерами. Однако в реальных сценариях данные часто имеют высокую размерность, сложные взаимосвязи между признаками и размытые границы между группами. В таких условиях традиционные алгоритмы либо требуют дополнительных предположений, либо теряют точность.

Самоорганизующиеся карты Кохонена решают эти проблемы за счет особого механизма обучения, основанного на конкурентном взаимодействии нейронов и сохранении топологической структуры данных. Это позволяет SOM адаптироваться к сложным зависимостям, выявлять скрытые паттерны и отображать многомерные данные в понятной двумерной форме, что открывает новые перспективы в интеллектуальном анализе данных и автоматизированных системах принятия решений.

Литература

1. Александров, А. А. Методы анализа данных: кластеризация и классификация / А.А. Александров. – М.: Издательство МГУ, 2018. – 376 с.
2. Хейкен, Э. Нейронные сети: полный курс / Э. Хейкен. – М.: Вильямс, 2015. – 800 с.
3. Гаврилова, Т. А. Искусственные нейронные сети / Т. А. Гаврилова, Н. И. Полетаев. – СПб.: Питер, 2019. – 320 с.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗГИБА ТОНКОЙ НАНОПЛАСТИНЫ В РАМКАХ ТЕОРИИ ГРАДИЕНТА ДЕФОРМАЦИИ ВТОРОГО ПОРЯДКА

MATHEMATICAL SIMULATION OF BENDING OF A THIN NANOPLATE WITHIN THE FRAMEWORK OF THE SECOND-ORDER STRAIN GRADIENT THEORY

О.В. Гермидер, В.Н. Попов
O.V. Germider, V.N. Popov

Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова
163002, Российская Федерация, Архангельск, Набережная Северной Двины, 17
e-mail: o.germider@narfu.ru, v.popov@narfu.ru

Аннотация. В представленной работе с использованием вариационного подхода и теории градиента второго порядка построена математическая модель изгиба тонкой изотропной нанопластины в результате действия приложенной к этой пластине нормально распределенной нагрузки. На основе построенной модели решение неоднородного дифференциального уравнения в частных производных шестого порядка для нанопластины получено путем разложения по многочленам Чебышева первого рода с применением метода коллокаций. В качестве точек коллокаций использованы корни этих ортогональных полиномов. Получены результаты моделирования для шарнирно закрепленной нанопластины.

Ключевые слова: моделирование изгиба тонких нанопластин, теория градиента деформации, метод коллокации, многочлены Чебышева.

Abstract. In the presented work, using the variational approach and the second-order gradient theory, a mathematical model of bending of a thin isotropic nanoplate under the action of a load normally distributed over the surface of this plate is constructed. Based on the constructed model, the solution of a non-homogeneous differential equation in partial derivatives of the sixth order for the nanoplate is obtained by expansion in Chebyshev polynomials of the first kind using the collocation method. The roots of these orthogonal polynomials are used as collocation points. The simulation results for a hinged nanoplate are presented.

Keywords: simulation of bending of thin nanoplates, strain gradient theory, collocation method, Chebyshev polynomials.

Математическое моделирование изгиба тонкой нанопластины в рамках теории градиента деформации имеет важное значение для описания напряженно-деформированного состояния наносистем [1]. Одним из подходов к построению математической модели изгиба этой нанопластины является вариационный подход с использованием теории градиента второго порядка [2]. Исследования, направленные на развитие этого подхода, и разработка эффективных методов решения краевых задач моделирования изгиба нанопластин являются актуальными. В представленной работе выполнено построение математической модели изгиба прямоугольной изотропной нанопластины на основе термодинамического подхода [3, 4] и теории градиента второго порядка [2, 5]. Толщина пластины мала по сравнению с размерами в двух других направлениях [3]. Рассматриваемая нанопластина находится под действием нормально

распределенной нагрузки. Новизна предлагаемого подхода заключается в том, что решение неоднородного дифференциального уравнения в частных производных шестого порядка для изогнутой поверхности нанопластины на основе построенной модели получено путем разложения по многочленам Чебышева первого рода с применением метода коллокаций.

Рассмотрим тонкую изотропную прямоугольную нанопластину ($0 \leq x \leq d_1$, $0 \leq y \leq d_2$, $-h/2 \leq z \leq h/2$), которая находится в равновесии под действием поперечной нагрузки интенсивностью $q(x, y)$. В этом случае полная энергия пластины будет равна ее внутренней энергии W . Здесь срединная плоскость недеформированной пластины xy , h – толщина этой пластины. Полагаем, что смещение точек нанопластины малы по сравнению с ее толщиной h . Массовыми силами пренебрегаем. Деформирование срединной плоскости пластины происходит сравнительно медленно путем постепенного увеличения нагрузки (статическое нагружение) при сохранении равновесия температур в пластине и окружающей среде, т. е. процесс деформирования, является изотермическим [4]. Согласно первому закону термодинамики [4], изменение полной энергии пластины в этом случае равно работе, произведенной внешними силами при смещении точек пластины по оси z на δw :

$$\delta U = \delta A.$$

Внутреннюю энергию пластины определяем как [5]

$$U = \iiint_{(V)} W dx dy dz,$$

а удельную внутреннюю энергию W , которая является функцией от компонент тензора деформации [3], представляем в виде [1, 6]

$$\begin{aligned} W &= W^{(c)} + W^{(l)}, \\ W^{(c)} &= \frac{1}{2} \lambda \varepsilon_{jj} \varepsilon_{kk} + G \varepsilon_{jk} \varepsilon_{jk}, \\ W^{(l)} &= \alpha^2 l^2 \left(\frac{1}{2} \lambda \kappa_{ijj} \kappa_{ikk} + G \kappa_{ijk} \kappa_{ijk} \right), \end{aligned}$$

где G и λ – упругие постоянные Ламе, ε_{jk} – симметричный линейный тензор деформации, κ_{ijk} – тензор деформации более высокого порядка (индексы i, j, k пробегает значения $\overline{1, 3}$, которые соответствуют x, y, z), суммирование осуществляется по индексам, которые повторяются дважды, α – коэффициент пропорциональности: $\varepsilon'_{jk} = \alpha \varepsilon_{jk}$, ε'_{jk} – симметричный тензор линейной деформации в микромасштабе, l – наноразмерный параметр (масштаб длины).

Согласно гипотезам Кирхгофа находим ненулевые компоненты тензора ε_{jk} , который является симметричной частью тензора относительного перемещения [3]

$$\varepsilon_{xx} = -z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \quad \varepsilon_{yy} = -z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}, \quad \varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yx} = -z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}.$$

Компоненты тензора деформации более высокого порядка κ_{ijk} определяем согласно [2]

$$\kappa_{ijk} = \partial_i \varepsilon_{jk}.$$

Работу, произведенную внешними силами при смещении точек пластины на δw , запишем в виде [6]:

$$\delta A = \int_0^{d_1} \int_0^{d_2} q \delta w \, dx dy + \oint_{(\Gamma)} \bar{Q}_n \delta w \, ds - \oint_{(\Gamma)} \left(\bar{M}_{nn} \frac{\partial \delta w}{\partial n} + \bar{M}_{ns} \frac{\partial \delta w}{\partial s} \right) ds - \\ - \left(\oint_{(\Gamma)} \bar{M}_{ss} \frac{\partial^2 \delta w}{\partial s^2} + \bar{M}_{nn} \frac{\partial^2 \delta w}{\partial n^2} + \bar{M}_{ns} \frac{\partial^2 \delta w}{\partial n \partial s} \right) ds,$$

где $\bar{Q}_n$ – перерезывающая сила, параллельная оси z и отнесенная к единице длины по сечению нанопластины, перпендикулярному к направлению внешней нормали срединной поверхности n , $\bar{M}_{nn}$, $\bar{M}_{ns}$ – изгибающий и крутящий моменты на единицу длины по сечению нанопластины, перпендикулярному к направлению n , $\bar{M}_{ss}$, $\bar{M}_{nn}$, $\bar{M}_{ns}$ изгибающие и крутящий моменты более высокого порядка.

В результате использования соотношений между компонентами тензора деформаций и тензора напряжений по теореме Остроградского-Гаусса и интегрирования по частям получаем уравнение равновесия тонкой изотропной нанопластины в рамках градиентной теории второго порядка для определения функции $w(x, y)$ в виде

$$D \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) - l^2 D \left(\frac{\partial^6 w}{\partial x^6} + 3 \frac{\partial^6 w}{\partial x^4 \partial y^2} + 3 \frac{\partial^6 w}{\partial y^4 \partial x^2} + \frac{\partial^6 w}{\partial y^6} \right) = q,$$

где $D = Eh^3/(12(1-\nu^2))$ -- цилиндрическая жесткость нанопластины при изгибе, E - модуль Юнга изотропной нанопластины.

Граничные условия для шарнирно закрепленной по контуру нанопластины, обобщающие классические [3, 7], записываем в соответствии с вариационным принципом [3]

$$w = 0, \quad \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0, \quad l^2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} = 0, \quad x = 0, d_1, \\ w = 0, \quad \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0, \quad l^2 \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = 0, \quad y = 0, d_2.$$

Приводим краевую задачу к безразмерному виду и функцию, аппроксимирующую решение, представляем в виде разложения в двойные ряды по многочленам Чебышева первого рода. Частичные суммы рядов записаны в матричном виде с использованием тензорного произведения матриц. При подстановке корней многочленов в уравнение коллокаций с учетом граничных условий и свойств многочленов Чебышева краевую задачу приводим к решению системы линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов в этом разложении.

Заключение. В работе с использованием термодинамического вариационного подхода построена математическая модель изгиба изотропной тонкой нанопластины и предложен метод решения краевой задачи моделирования этого изгиба для шарнирно закрепленной по контуру нанопластины на основе теории градиента деформации второго порядка и применения многочленов Чебышева первого рода в качестве базисной системы функций при нахождении решения. Результаты проведенных вычислительных экспериментов показывают эффективность предложенного подхода к моделированию изгиба срединной поверхности этой нанопластины.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда 24-21-00381.

Литература

1. Zhou Y., Huang K. Static and dynamic stabilities of modified gradient elastic Kirchhoff–Love plates // *European Journal of Mechanics / A Solids*, v. 108, № 105426. 2024.
2. Zhou Y., Huang K. A simplified deformation gradient theory and its experimental verification // *Acta Mech.*, v. 234. 2023, P. 2963–2984.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика, т.VII. Теория упругости. – Москва: Наука, 1987.
4. Демидов С.П. Теория упругости. Учебник для вузов. – Москва: Высш. школа, 1979.
5. Mindlin R.D. Second gradient of strain and surface tension in linear elasticity // *Int. J. Solids Struct.*, v. 1, 1965. P. 417–438
6. Zhou Y., Huang K. On simplified deformation gradient theory of modified gradient elastic Kirchhoff–Love plate // *European Journal of Mechanics / A Solids*. v. 100, № 105014. 2023.
7. Timoshenko S.P., Woinowsky-Krieger S. Theory of plates and shells. – New York: McGraw-Hill Press, 1959.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМ КОНИЧЕСКИХ ВИНТОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Владимир Гречишников^{1,2}, Антон Язев^{1,2,3}, Михаил Прус^{1,2,3},

Азимжон Мирзомахмудов^{1,2}

¹ Лаборатория Технологий Микрообработки, Московский Государственный Технологический Университет “СТАНКИН”, 127055 Москва, Россия;

² кафедра инструментальной техники и технологии формообразования, Московский Государственный Технологический Университет “СТАНКИН”, 127055 Москва, Россия;

³ Молодежная Лаборатория цифрового моделирования кибер-физических инструментальных систем. Москва, Россия.

Abstract. Форма стружечной канавки с постоянным углом наклона спирали широко распространена в конструкции конических фрез. Однако, контроль геометрии и стандарты для оценки геометрических параметров конических фрез не имеют конкретных рекомендаций и существует ряд проблем по определению зависимости изменения переднего угла. Поэтому в данной работе предложена модель измерения передних углов периферии конической фрезы в нормальном сечении. В результате исследования установлено влияние переднего угла в радиальном сечении, угла конуса и угла наклона стружечной канавки на фактический передний угол.

1 Введение

В инструментальной промышленности наиболее распространена в конструкции цельного концевоегo инструмента форма винтовая поверхность является конструктивным элементом концевых фрез [1–3] и других режущих инструмента [4, 5]. С развитием технологий, а именно многокоординатной обработки [5–7], возникает необходимость усложнения, совершенствования конструкции концевых фрез. С целью повышения эффективности в обработки сложнопрофильных деталей по типу импеллера [8–10], лопаток турбин и прочих деталей, используемых в авиационной промышленности. С целью повышения эффективности в обработки сложнопрофильных деталей таких как импеллеры [11–15], лопаток турбин и прочих деталей, используемых в авиационной промышленности. Особенно актуально разработки и совершенствования инструмента и систем автоматизированного производства в условиях индустрии 4.0 в машиностроении [16–17].

Существуют конструкции конических концевых фрез [18]. К параметрам геометрии инструмента, определяющим эксплуатационные показатели относятся, передний угол, задний угол, угол наклона спирали [19], диаметр сердцевины [20], радиус режущей кромки. Различают конические фрезы с постоянным и переменным углом наклона спирали. Конструкция фрезы с переменным углом наклона спирали может работать преимущественно торцевой частью, переменный угол канавки имеет неравномерные показатели при резании вдоль режущей кромки. Режущая кромка данной конструкции описывается Архимедовой спиралью, которая всегда проецирует постоянный шаг и переменный угол наклона. В сравнении с цилиндрической концевой фрезой с постоянным шагом, коническая фреза может работать только преимущественно торцом, а не всей режущей кромкой, за счет конической формы

имеется возможность обработать труднодоступные места детали, а коническое основание увеличивает стойкость и запас прочности [21].

Наиболее распространенным инструментальным материалом для конических концевых фрез является твердый сплав, быстрорежущая сталь или новое перспективное направление исследований возможности применения режущей керамики с износостойкими покрытиями для повышения стойкости инструмента для обработки жаропрочных материалов [22]. Современные методы контроля качества таких покрытий, включая вакуумно-дуговое напыление [23] и плазменную модификацию поверхности [24–25], обеспечивают повышение износостойкости фрез.

Наиболее распространенным типом является коническая фреза с постоянным углом наклона, который обеспечивает переменный шаг на всей длине режущей части инструмента. Так как шаг спирали переменный гармонические колебания при фрезеровании уменьшаются. У конической фрезы с постоянным углом наклона кромки, она описывается логарифмической спиралью [26]. Данный тип фрез разработан с целью обработки сложных поверхностей периферической частью инструмента, что существенно расширяет возможные схемы обработки конической фрезой [27, 28].

Для обеспечения соответствующего качества обработанной поверхности имеет место необходимость обеспечения постоянства углов в заданном поперечном сечении на всей длине конической фрезы [29–30]. Передний угол в поперечном сечении формируется на этапе шлифовки стружечной канавки, из-за геометрической особенности формы стружечной канавки допуск может достигать до 1 градуса, назначается этот параметр в зависимости от обрабатываемого материала, так, например для обработки жаропрочных сталей передний угол $\gamma=5\div 8^\circ$. Существует множество работ анализирующих геометрические параметры концевых фрез и факторы, влияющие на них [30–35], однако остается открытым вопрос влияния переднего угла в нормальном сечении.

Передний угол является одним из наиболее важных геометрических параметром инструмента, правильное назначение переднего угла позволяет обеспечить эффективный сход стружки, снизить сопротивление при врезании режущего клина в материал. Передний угол у конических фрез имеет особенности при контроле и назначении на этапе проектирования. Изменение диаметра поперечного сечения фрезы вдоль оси приводит к изменению глубины контрольной точки для назначения и измерения переднего угла, что накладывает специфические особенности при построении системы автоматизированного проектирования конических фрез, применяемых в условиях высокоскоростной обработки. Также пересчет геометрии фрезы при фактических условиях врезания режущего клина (геометрия передней поверхности в нормальном сечении) будет иметь отличительные особенности по сравнению с цилиндрическими фрезами. Решение задач адаптации известных зависимостей геометрии в радиальное и нормальное сечение на условия автоматизированного проектирования конических концевых фрез для высокоскоростной обработки будут рассмотрены в данном типовом исследовании, проясняющим некоторые особенности разработки методики проектирования. Также в работе представлен анализ характера изменения фактического переднего угла в зависимости от угла наклона конуса, наклона спирали и переднего угла в радиальном сечении и представлены некоторые умозаключения по перспективам совершенствования этапов конструирования специализированного инструмента для высокоскоростной многокоординатной обработки.

2 Некоторые особенности разработки параметризированной модели конической фрезы для высокоскоростной многокоординатной обработки.

Ключевым, основополагающим параметром конической фрезы является угол наклона винтовой линии. Исходя из вариации этого параметра винтовой линии коническая фреза может работать конической периферией или только торцевой частью, эта особенность обусловлена способом построения спирали.

При анализе винтовых линий были сделаны выводы, что спираль Архимеда всегда проецирует постоянный шаг и переменный угол наклона режущей кромки, в независимости от начальных условий и параметров. Форма кромки конической концевой фрезы представляет собой винтовую линию на конической поверхности, описываемую уравнением логарифмической спирали.

Плоская логарифмическая спираль в полярных координатах записывается как:

$$r_i = r_0 \cdot e^{k \cdot \theta}$$

В декартовой системе координат пространственная спираль выражается как:

$$x(\theta) = r_0 \cdot e^{k \cdot \theta} \cos \theta;$$

$$y(\theta) = r_0 \cdot e^{k \cdot \theta} \sin \theta;$$

$$z(\theta) = r_0 \cdot m \cdot e^{k \cdot \theta}.$$

где r_0 – начальный радиус спирали, постоянная величина; θ – угол поворота точки от нуля; k – параметр наклона винтовой линии; m – параметр наклона конуса.

Трехмерная параметризованная модель конической концевой фрезы с четырьмя канавками была сформирована в программе T-Flex CAD. Подход к проектированию трехмерной модели конической концевой фрезы имеет общие признаки с подходом проектирования цилиндрических концевых фрез, однако существуют отличия в формировании конической спирали, в корне меняющие исходные параметры фрезы.

Коническая спираль формируется посредством проецирования плоской логарифмической спирали на конус, как показано на рисунке 1а. Сформированные радиальные сечения профиля стружечной канавки, на заданных расстояниях соединяются между собой образуя профиль стружечной канавки.

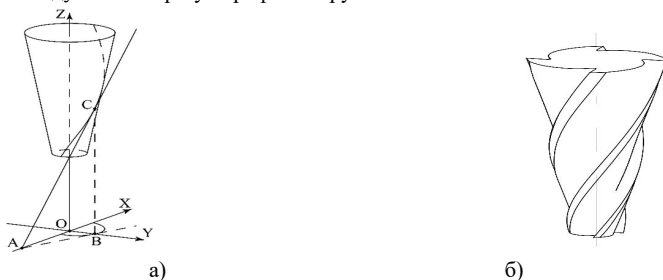


Рис. 1. Коническая спираль (а); Сформированная модель режущей части конической фрезы (б)

Передний угол в радиальном сечении формируется на этапе шлифовки стружечной канавки, из-за геометрической особенности формы стружечной канавки допуск может

доходить до 1 градуса, назначается этот параметр в зависимости от обрабатываемого материала.

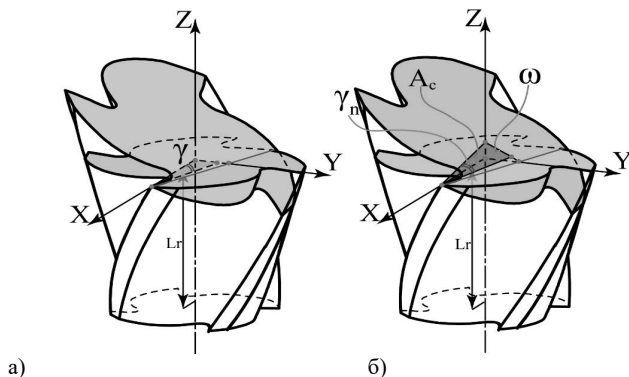


Рис. 2. Модель измерения переднего угла. Измерения переднего угла в радиальном на заданной глубине (а); Измерение нормального переднего угла в нормальном сечении (б)

Нормальная плоскость в рассматриваемой точке режущей кромки, в которой находится нормальный передний угол, пересекается с радиальным сечением, линия пересечения показана на рисунке 2а. Положение радиальная плоскость в рассматриваемой точке режущей кромки А задается перпендикулярно оси фрезы. Передний угол γ определяется в данной плоскости между касательной к передней поверхности АВ и линией АО, проходящей через рассматриваемую точку на режущей кромки А и точку О, лежащую на оси фрезы в радиальном сечении (рис.2а). Через точку А нормально к режущей кромки, строится нормальное сечение, в котором определяется нормальный передний угол. Чем больше передний угол, тем легче осуществляется процесс резания, уменьшается тепловыделение и мощность, затрачиваемая на процесс резания, но одновременно уменьшается прочность режущей кромки. С уменьшением переднего угла режущий клин упрочняется, но мощность, затрачиваемая на резание, увеличивается, как и тепловыделение. Конические фрезы используются преимущественно при высокоскоростной обработке, данному процессу характерно низкое трение и высокая скорость съема материала, при котором тепловыделение уходит вместе с стружкой не успевая нагреть инструмент и деталь. Однако при обработки вязких материалов, таких как алюминиевые сплавы трение увеличивается в результате пластической деформации. Так же необходимо постоянно углов вдоль режущей кромки, для снижения точек концентрации напряжения и уменьшения вибраций, приводящих к сколам и преждевременной потери работоспособности инструмента.

Как показано на рисунке 2б передний угол и нормальный передний угол рассматриваются в контрольной точке А. Расчета нормального переднего угла в случае конических фрез должен осуществляться с учетом величины угла конуса α_c , что не позволяет применить алгоритм расчета нормального переднего угла для цилиндрических концевых фрез [25]. Таким образом предлагается адаптировать известные зависимости пересчета геометрических из радиального сечения в нормальное для конических фрез с различными углами наклона конуса.

3 Результаты. Обсуждение

В поставленной задаче необходимо определить характер передний угол, рассматриваемый в нормальном сечении относительно кромки. Было проведен анализ изменения переднего угла в нормальном сечении в зависимости от переднего угла в радиальном сечении γ , угла наклона образующей конической производящей поверхности A_c и расстояния L_r , на которой задается контрольная точка А на режущей кромке и соответствующее ей рассматриваемые сечения. Результаты статического контроля геометрии по эмпирической полученной параметрической модели конструкции конической фрезы показаны в таблицах 1–3 и рисунков графиков 1–3. Геометрия параметрической модели при автоматизированном проектировании режущей части формируется группой профилей с постоянной геометрией формируемыми режущую часть фрезы вдоль оси. Профиль винтовой канавки имеет постоянный передний угол на расстояние от торца до контрольной точки L_r . Нормальная плоскость к режущей кромки образует с радиальной плоскостью угол A_c .

Таблица 1. Изменение заднего угла в нормальном сечении к режущей кромки в зависимости от расстояния между торцом фрезы и рассматриваемой точкой на режущей кромки фрезы с половиной угла конической производящей поверхности при вершине равно 9-ти градусов

Расстояние между торцом фрезы и рассматриваемой точкой на режущей кромки, мм	Передний угол $\gamma=12^\circ$	Передний угол $\gamma=9^\circ$	Передний угол $\gamma=8^\circ$
1	14.366	11.877	10.986
2	14.476	11.994	11.166
3	14.582	11.987	11.299
4	15.476	12.087	11.156
5	14.703	12.171	11.32
6	14.823	12.188	11.371
7	14.876	12.214	11.434
8	14.937	12.282	11.516
9	14.863	12.31	11.457
10	14.903	12.355	11.447

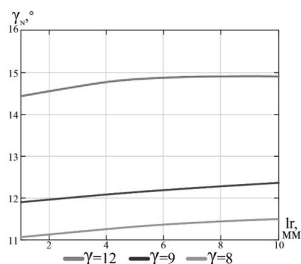


Рис. 3. График зависимости нормального заднего угла от длины заданного сечения конической фрезы с половиной конической производящей поверхности в 9° при вершине

Таблица 2. Изменение заднего угла в нормальном сечении к режущей кромки в зависимости от расстояния между торцом фрезы и рассматриваемой точкой на режущей кромки фрезы с половиной угла конической производящей поверхности при вершине равной 10-ти градусам

Расстояние между торцом фрезы и рассматриваемой точкой на режущей кромки, мм	Передний угол $\gamma=12^\circ$	Передний угол $\gamma=9^\circ$	Передний угол $\gamma=8^\circ$
1	15.852	13.38	12.387
2	15.925	13.428	12.458
3	15.991	13.471	12.458
4	16.114	13.611	12.497
5	16.198	13.724	12.544
6	16.301	13.684	12.711
7	16.36	13.792	12.806
8	16.377	13.821	12.822
9	16.491	13.858	12.842
10	16.522	13.888	12.954

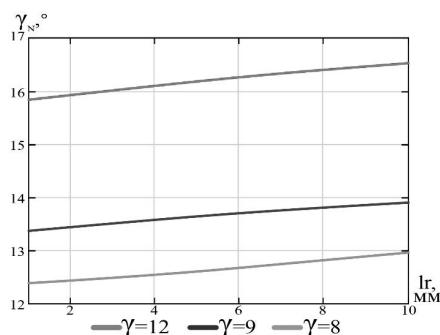


Рис. 4. График зависимости нормального заднего угла от длины заданного сечения конической фрезы с половиной угла конической производящей поверхности 10° при вершине

Таблица 3. Изменение заднего угла в нормальном сечении к режущей кромки в зависимости от расстояния между торцом фрезы и рассматриваемой точкой на режущей кромки фрезы с половиной угла конической производящей поверхности при вершине равной 11-ти градусам

Расстояние между торцом фрезы и рассматриваемой точкой на режущей кромки, мм	Передний угол $\gamma=12^\circ$	Передний угол $\gamma=9^\circ$	Передний угол $\gamma=8^\circ$
1	15.2	12.837	11.99
2	15.439	12.968	12.034
3	15.884	13.229	12.235
4	15.614	13.365	12.324
5	15.754	13.35	12.379

6	15.797	13.411	12.34
7	15.832	13.466	12.386
8	15.863	13.478	12.437
9	15.902	13.489	12.445
10	15.971	13.511	12.485

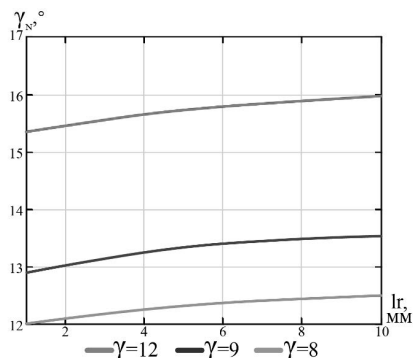


Рис. 5. График зависимости нормального заднего угла от длины заданного сечения конической производящей фрезы с половиной угла конической производящей поверхности 11° при вершине

Так как условием параметризированной модели передний угол в радиальном сечении остается постоянным, независимо проанализируем характер изменения нормального переднего угла. Из графиков выявлено, что увеличение половины угла конической производящей поверхности при вершине A_c (с 9° до 11°) приводит к росту переднего угла в нормальном сечении. Например, при радиальном переднем угле $\gamma=12^\circ$ и при половине угла конической производящей поверхности при вершине 9° значение нормального переднего угла варьируется в пределах 14.3° – 14.9° , тогда как для угла A_c равном 11° диапазон увеличивается до 15.2° – 15.9° . Данная особенность демонстрирует необходимость учета половины угла конической производящей поверхности при вершине при проектировании новых конструкций фрез для обеспечения равномерного условий резания.

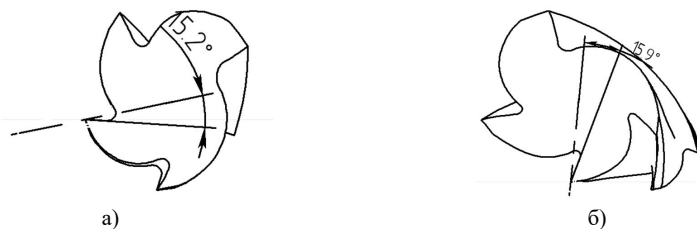


Рис. 6. Нормальный передний угол при: $\gamma=12^\circ$, $A_c = 11^\circ$, $L_r=1$ мм. (а); Нормальный передний угол при: $\gamma=12^\circ$, $A_c = 11^\circ$, $L_r=9$ мм. (б)

При фиксированном угле A_c уменьшение радиального переднего угла (с 12° до 8°) снижает абсолютные значения нормального переднего угла. Например, для угла A_c равным 10° при $\gamma=12^\circ$ нормальный угол достигает $16,5^\circ$, а при $\gamma=8^\circ$ — $12,9^\circ$. Это указывает на компромисс между прочностью режущей кромки (выше при меньших углах) и эффективностью стружкообразования (лучше при больших углах). Полученные результаты согласуются с теорией резания, однако для конических фрез отклонения достигают $0,5\text{--}0,6^\circ$.

В отличие от цилиндрических фрез, где передний угол остается постоянным вдоль кромки, для конических фрез выявлено отклонение до $0,6^\circ$. Это обусловлено наклоном конуса, который нарушает симметрию проекций. Указанное отличие делает традиционные методики расчета неприменимыми и требует разработки новых подходов, таких как предложенная параметрическая модель на основе логарифмической спирали.

Результаты исследования позволяют оптимизировать геометрию конических фрез для конкретных условий обработки. Например, при работе с жаропрочными сталями ($\gamma=5\text{--}8^\circ$) рекомендуется использовать меньшие углы конуса ($18\text{--}20^\circ$), чтобы избежать избыточного ослабления зуба. Для высокоскоростной обработки алюминиевых сплавов допустимы большие углы конуса (22°), обеспечивающие улучшенный отвод стружки.

Мы считаем, что это связано с тем, что при увеличении расстояния L_r радиус в рассматриваемой точке увеличивается пропорционально уклону конуса, из-за этого появляется смещение, которое изменяет передний нормальный угол. Данная выявленная особенность негативно влияет на процесс резания, то есть после определенного значения расстояния L_r , предсказание нормального переднего угла не соответствует логике. По данным графикам стоит ограничить длину рабочей режущей части фрезы в 4 мм, так как после этих значений тенденция изменения нормального переднего угла меняется в обратную сторону.

В таблицах и графиках по оси абсцисс изменяется глубина измеряемого участка L_r , по длине режущей части, а по оси ординат показано изменение переднего угла в нормальном сечении. Передний угол в радиальном сечении остается постоянным, однако в нормальном сечении изменяется вдоль длины режущей. По графикам нормальный передний угол увеличивается пропорционально увеличению половины угла конуса для переднего угла в 8 градусов на $0,1$ градус, а для значения переднего угла в 12 на $0,25$ градуса. Это говорит о наличии прямой зависимости, которая связывает между собой передний угол, угол конуса и угол наклона конической линии. Угол наклона конуса с увеличением глубины измеряемого участка увеличивает искажение, так фактические передние углы изменяются по длине режущей части в пределах $1\text{--}1,5$ градусов, это связано с увеличением радиуса для заданного сечения.

Так же был сделан вывод, что изменение угла наклона конической спирали не существенно влияет на изменение переднего угла в нормальном сечении.

4 Заключение

В работе установлено, что изменение фактического нормального переднего угла при постоянном переднем угле в радиальном сечении связано с изменением формы нормального сечения к винтовой канавке в следствие изменения наклона нормального сечения на величину половины угла при вершине конической производящей поверхности.

5 Благодарности

This work was funded by the Russian Science Foundation (Project No. 22-79-10353, <https://rscf.ru/project/22-79-10353/>) and was carried out using equipment provided by the Center of Collective Use of MSUT STANKIN.

The study was carried out on the equipment of the Centre of collective use «State Engineering Center» of MSUT «STANKIN» supported by the Ministry of Higher Education of the Russian Federation (project № 075-15-2021-695 from 26.07.2021, unique identifier RF-2296/61321X0013).

References

1. Разработка конструкции цельной концевой керамической фрезы с тороидальной формой режущей части / В. А. Гречишников, С. Н. Григорьев, П. М. Пивкин [и др.] // СТИН. – 2019. – № 7. – С. 31–35. – EDN BSTWNF.
2. A new approach for controlling of curved cutting edges of toroid-shaped end-milling cutter / P. M. Pivkin, I. V. Minin, A. A. Ershov [et al.] // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering : 10, Virtual, Online, 12–16 апреля 2021 года. – Virtual, Online, 2021. – P. 117320. – DOI 10.1117/12.2588699. – EDN EAERXW.
3. Разработка цельных концевых фрез из режущей керамики для обработки заготовок из труднообрабатываемых материалов / С. Н. Григорьев, В. А. Гречишников, М. А. Волосова [и др.] // Вестник МГТУ "Станкин". – 2018. – № 4(47). – С. 87–93. – EDN YUMZTN.
4. Технология изготовления цельной конструкции резца для обработки торцевых канавок сложной формы / П. М. Пивкин // Вестник МГТУ "Станкин". – 2016. – № 4(39). – С. 40–46. – EDN XIBSYR.
5. Определение погрешности формы детали при формообразовании планетарным механизмом методами геометрической теории резания / В. А. Гречишников, В. В. Куц, М. С. Разумов [и др.] // СТИН. – 2017. – № 4. – С. 24–26. – EDN YKVDAB.
6. Информационная система оценки уровня формализации процесса высокоскоростного многокоординатного фрезерования / В. А. Гречишников, П. М. Пивкин, Ю. Е. Петухов [и др.] // СТИН. – 2022. – № S12-2. – С. 25–28. – EDN VFYUYI.
7. 5-axis double-flank CNC machining of spiral bevel gears via custom-shaped milling tools / Bo, P., González, H., Calleja, A., De Lacalle, L. N. L., Bartoň, M. // – Part I: Modeling and simulation // Precision Engineering. – 2020. – Vol. 62. – P. 204–212. – DOI: 10.1016/j.precisioneng.2019.11.015.
8. Global optimization of tool path for five-axis flank milling with a conical cutter / Zhu, L., Zheng, G., Ding, H., Xiong, Y. // Computer-Aided Design. – 2010. – Vol. 42, № 10. – P. 903–910. – DOI: 10.1016/j.cad.2010.06.005.
9. Trochoidal slot milling / V. A. Grechishnikov, Y. E. Petukhov, P. M. Pivkin [et al.] // Russian Engineering Research. – 2017. – Vol. 37, № 9. – P. 821–823. – DOI: 10.3103/S1068798X17090106. – EDN XNPZUB.
10. Выбор шага смещения формообразующего контура при трохоидальном фрезеровании паза концевыми фрезами / В. А. Гречишников, Ю. Е. Петухов, П. М. Пивкин [и др.] // СТИН. – 2017. – № 4. – С. 21–23. – EDN YKVCZR.
11. Mechanistic Modeling of Five-Axis Machining With a Flat End Mill Considering Bottom Edge Cutting Effect / Li, Z.-L., Zhu, L.-M. // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2016. – Vol. 138, № 11. – P. 111012. – DOI: 10.1115/1.4033663.

12. Surface form error prediction in five-axis flank milling of thin-walled parts / Li, Z.-L., Tuysuz, O., Zhu, L.-M., Altintas, Y. // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2018. – Vol. 128. – P. 21–32. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2018.01.005.
13. Optimization of milling parameters based on five-axis machining for centrifugal impeller with titanium alloy / Chen, T. H., Lee, J. N., Tsai, M. H., Shie, M. J., Lin, C. Y. // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2022. – Vol. 2345, № 1. – P. 012019. – DOI: 10.1088/1742-6596/2345/1/012019.
14. Aero-Engine Blade Cryogenic Cooling Milling Deformation Simulation and Process Parameter Optimization / Chen, T., Xu, Y., Huang, B., Shi, Y., Zhang, J., Li, L., Meng, Y., Li, X. // *Materials*. – 2023. – Vol. 16, № 11. – P. 4072. – DOI: 10.3390/ma16114072.
15. Hybrid prediction model for residual stress profile induced by multi-axis milling Ti-6Al-4 V titanium alloy combined finite element with experiment / Wang, Z., Zhou, J., Ren, J., Shu, A. // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2023. – Vol. 126, № 9–10. – P. 4495–4511. – DOI: 10.1007/s00170-023-11406-0.
16. Индустрия 4.0 в станкостроении / А. А. Грибков, М. С. Морозкин, В. Р. Купцов [и др.] // *СТИН*. – 2021. – № 4. – С. 9–11. – EDN VYGEJE.
17. Digital cyber-physical system for designing and manufacturing of conical end mill / P. Pivkin, E. Nazarenko, V. Grechishnikov [et al.] // *E3S Web of Conferences* : [международ. науч. конф., Астана, Казахстан, 15–18 октября 2024 г.]. – EDP Sciences, 2024. – Vol. 592. – P. 05024. – DOI: 10.1051/e3sconf/202459205024. – EDN HYWNIN.
18. Analysis of the Mechanics of Machining with Tapered End Milling Cutters / Ramaraj, T. C., Eleftheriou, E. // *Journal of Engineering for Industry*. – 1994. – Vol. 116, № 3. – P. 398–404. – DOI: 10.1115/1.2901958.
19. A new method for identifying the key indicators and dependencies in the processing of images of helical surfaces of conical cutters obtained with the optical measuring machine / P. M. Pivkin, A. M. Yazev, E. S. Nazarenko [et al.] // *Optoelectronic Imaging and Multimedia Technology XI : PROCEEDINGS SPIE - SPIE/ COS PHOTONICS ASIA*, Nantong, Jiangsu, China, 12–15 октября 2024 года. Vol. 13239. – Maryland: SPIE, 2024. – P. 132391U. – DOI 10.1117/12.3037644. – EDN EKBMOM.
20. Shaping Conical End Mills: A Critical Review / Pivkin P.M. et al. // *Russ. Engin. Res*. 2024. Vol. 44, № 6. P. 858–860. – DOI: 10.3103/S1068798X24701077
21. Mechanics and dynamics of general milling cutters / Engin, S., Altintas, Y. // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2001. – Vol. 41, № 15. – P. 2195–2212. – DOI: 10.1016/S0890-6955(01)00045-1.
22. Sensor Information Processing in the Control of Quality Parameters of Functional Coatings of Products Deposited by Vacuum-Arc Spraying / S. N. Grigoriev, M. S. Migranov, S. R. Shekhtman [et al.] // *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Tokyo, Japan, 15–19 ноября 2021 года. Vol. 11914. – Tokyo, Japan: The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), 2021. – P. 119–141. – DOI 10.1117/12.2605753. – EDN LZSSUO.
23. Nanostructured biocompatible Ti-TiN coating for implants with improved functional properties / S. N. Grigoriev, M. A. Volosova, M. S. Migranov [et al.] // *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*: 18, Virtual, Online, 13–17 сентября 2021 года. – Virtual, Online, 2021. – P. 1186708. – DOI 10.1117/12.2602166. – EDN SAPTWF.
24. High-precision method for determining the optimal trajectory of movement of a conical grinding wheel relative to the helical groove of solid ceramic mills / S. N. Grigoriev, P. M. Pivkin, M. A. Volosova [et al.] // *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*: [виртуальная конференция, 21–25 сентября 2020 г.]. –

- Виртуальный формат: SPIE, 2020. – P. 115401E. – DOI: 10.1117/12.2574389. – EDN SHWGZL.
25. Combined processing of micro cutters using a beam of fast argon atoms in plasma / A. Metel, Y. Melnik, E. Mustafaeu [et al.] // *Coatings*. – 2021. – Vol. 11, № 4. – P. 465. – DOI: 10.3390/coatings11040465. – EDN BAGPQT.
 26. Grinding of Helical Surfaces on End Mills: Monitoring by Means of Optimal Tolerances / Pivkin, P. M., Grechishnikov, V. A., Petukhov, Yu. E., Kuznetsov, V. A., Ershov, A. A., Nazarenko, E. S., Yazev, A. M., Mirazrakhmudov, A. R., Korobov, N. A., Nadykto, A. B., Wang, D., Yao, R., Zhang, X. // *Russian Engineering Research*. – 2024. – Vol. 44, № 11. – P. 1613–1616. – DOI: 10.3103/S1068798X24702642.
 27. Positioning of a conical cutter for centrifugal blade finish machining based on the best uniform approximation (BUA) method / Dong, L. // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2023. – Vol. 127, № 7–8. – P. 3209–3219. – DOI: 10.1007/s00170-023-11706-5.
 28. Tool orientation optimization method based on ruled surface using genetic algorithm / Gong, Z., Li, B., Zhang, H., Ye, P. // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2022. – Vol. 118, № 1–2. – P. 571–584. – DOI: 10.1007/s00170-021-07934-2.
 29. Reinforcement learning-based tool orientation optimization for five-axis machining / Zhang, Y., Li, Y., Xu, K. // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2022. – Vol. 119, № 11–12. – P. 7311–7326. – DOI: 10.1007/s00170-022-08668-5.
 30. A novel approach to wheel path generation for 4-axis CNC flank grinding of conical end-mills / Yang, J., Wang, L., Fang, Y., Li, J. // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2020. – Vol. 109, № 1–2. – P. 565–578. – DOI: 10.1007/s00170-020-05693-0.
 32. A novel method for flute grinding of conical end milling cutter / Zheng, G., Yue, C., Liu, X., Jiang, Z., Wang, H. // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2023. – Vol. 126, № 3–4. – P. 907–917. – DOI: 10.1007/s00170-023-11071-3.
 32. Investigation of Technological Parameters for Machining Toroidal Section of Solid Ceramic End Mills / S. N. Grigoriev, V. A. Grechishnikov, M. A. Volosova [et al.] // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Sevastopol, 07–11 сентября 2020 года. – Sevastopol, 2020. – P. 022065. – DOI 10.1088/1757-899X/971/2/022065. – EDN NZIWEN.
 33. Определение параметров инструмента в технологических системах обработки резанием / P. M. Хусаинов, А. Н. Головки, С. М. Петров [и др.] // *СТИН*. – 2016. – № 10. – С. 17–20. – EDN YHXCXN.
 34. Development of DLC-coated solid SiAlON/TiN ceramic end mills for nickel alloy machining: Problems and prospects / S. N. Grigoriev, M. A. Volosova, S. V. Fedorov [et al.] // *Coatings*. – 2021. – Vol. 11, № 5. – P. 532. – DOI: 10.3390/coatings11050532. – EDN BSLLQF.
 35. A new method for modeling edges of a toroidal cutting surface of solid ceramic end mills / P. M. Pivkin, M. A. Volosova, I. V. Minin [et al.] // *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*: 3, Virtual, Online, 21–25 сентября 2020 года. – Virtual, Online, 2020. – P. 115401G. – DOI 10.1117/12.2574391. – EDN DLTJQS.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ИДЕНТИФИКАЦИИ И ЦИФРОВИЗАЦИИ ЗАПАХА

Е.А. Девятерикова

ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН»

127055, Россия, Москва, Вадковский пер., 1, edev-va@yandex.ru

Полнота восприятия человеком окружающего мира определяется работоспособностью его органов чувств. Именно благодаря им мы получаем информацию, обрабатываем ее и строим в голове адекватное отображение интересующего объекта. Когда объект находится в непосредственной близости от нас, в зоне видимости, слышимости, то все это процессы происходят практически мгновенно, на интуитивном уровне. Если же возникает необходимость передачи информации на расстояние по каналам связи, то предварительно она должна быть преобразована в цифровой формат.

В отличие от других органов чувств, для обоняния до сих пор не предложена строгая математическая модель, позволяющая однозначно поставить в соответствие реальному запаху его цифровой образ. Связано это, в первую очередь, с недостаточно полно изученным механизмом восприятия запахов. Обонятельный эпителий состоит из множества нервных клеток, содержащих специальные рецепторы, реагирующие на запах. При попадании в нос «пахучей» молекулы определенная комбинация нервных клеток активируется, образуя код, который интерпретируется мозгом как конкретный запах. Вопрос о том, каким образом происходит кодирование, по настоящее время является предметом дискуссии исследователей.

Одна из возможностей цифровизации запаха – представление его как точки в многомерном пространстве. Каждый запах может быть задан координатами точки, расстояние между точками интерпретируется как мера сходства запахов. Объективным фактором, определяющим запах вещества, безусловно, являются его химические и физические свойства: элементный состав, массы молекул, плотность, летучесть. Исследования методами многомерного статистического анализа различных баз, содержащих данные о химической структуре вещества, позволили установить, что размерность такого пространства должна быть не менее 10. Еще одним способом описания запахов является использование специального набора слов – дескрипторов (semantic profiling). Испытуемым предлагается оценить, может ли тот или иной дескриптор применяться для описания выбранного запаха. Результаты исследований обрабатываются и объединяются в базы, атласы запахов, а затем используются для обнаружения меры сходства между различными запахами.

В последние годы для создания цифрового отпечатка запаха широко привлекаются методы искусственного интеллекта. В 2019 году Исследовательская лаборатория Google Research представила карту основных запахов, построенную на основе модели графовой нейросети, с помощью которой по химической структуре молекулы можно определить ее запах. Модель принимает на вход молекулярную структуру соединения и выдает на выходе список слов, которые характеризуют его запах. Данная модель не позволяет оценить количество параметров (размерность пространства), необходимое для описания запаха, но является, по мнению авторов, надежным инструментом, который будет с высокой точностью предсказывать запах молекулы, и может использоваться при решении многих прикладных и фундаментальных задач.

Рассмотренные выше модели хорошо работают в отношении большинства веществ. Но в рамках этой теории невозможно объяснить некоторые экспериментальные факты. Например, молекулы практически идентичной формы могут пахнуть совершенно по-разному, в то время как абсолютно разные молекулы нередко пахнут одинаково; некоторые люди полностью или частично невосприимчивы к определенным запахам. Для объяснения таких эти «запаховых» парадоксов Luca Turin в 1996 г. предложил вернуться к развитию вибрационной теории обоняния и высказал туннельную концепцию распознавания запахов, предположив, что рецепторы передают сигнал от молекулы-одоранта посредством квантового туннелирования. Позже учеными из Лондонского центра нанотехнологий был проведен ряд экспериментов, подтвердивших существование такого механизма.

О применимости квантового подхода для описания запаха, возможно, следует задуматься и на первых этапах статистической обработки результатов эксперимента. Восприятие запаха человеком во многом носит субъективный характер. Источником разброса в результатах измерения может быть неопределенность значений некоторых «скрытых переменных», находящихся вне контроля экспериментатора. При использовании семантических атласов, содержащих описание «пахучих» молекул с помощью дескрипторов, процесс конструирования запаха из языковой формы допускает многовариантную интерпретацию. Например, в известном атласе запахов Дравниекса, похожие по смыслу дескрипторы FRAGRANT (благоухающий, ароматный) и AROMATIC (ароматный) демонстрируют существенную разницу в оценке их применимости для описания запаха линалоола (57,59% и 36,14%). Для описания абгексона среднестатистический испытуемый рекомендует использовать противоположные по смыслу дескрипторы LIGHT (легкий) и HEAVY (тяжелый) с оценкой применимости 13,83% и 17,58% соответственно. Эти несоответствия не объясняются статистической погрешностью. Еще один пример такого несоответствия - использование дескрипторов FRUITY, CITRUS (фруктово-цитрусовый, применимость 20,93%) и LEMON (лимонный, применимость 26,93%). Вероятность совместной реализации пары событий FRUITY, CITRUS и LEMON выше, чем вероятность реализации одного из них FRUITY, CITRUS. Таких примеров немного, но объяснить их на основе аксиоматической теории вероятностей Колмогорова невозможно.

Для описания подобных процессов более оправданным представляется не классическая схема «Стимул-Ответ», в которой предсказание поведения системы возможно со сколь угодно высокой точностью, а схема «Стимул-Организм-Ответ», допускающая квантовое моделирование эффектов порядка и ошибки конъюнкции. В этой схеме Организм является активным субъектом принятия решений; система характеризуется внутренним состоянием, соотношение которого с состоянием окружения определяет её реакцию. Именно такой подход реализуется при построении математических моделей принятия решений в квантовой когнитивистике. Подтверждение возможности применения такой схемы к моделированию процесса распознавания запахов требует проведения дополнительных экспериментов.

Литература

1. Dravnieks A. Atlas of odor character profiles, data series DS 61. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1985, 347с.
2. Холево А.С. Введение в квантовую теорию информации. - Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003, 410с.
3. Суров И. А., Алоджанц А.П. Модели принятия решений в квантовой когнитивистике. – СПб.: Университет ИТМО, 2018. – 63с.

АЛГОРИТМ ПЛАНИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

PRODUCTION PLANNING ALGORITHM FOR A MACHINE-BUILDING FACTORY

Доронин И. Е.

Doronin I. E.

Федеральное государственное автономное учреждение науки Институт
конструкторско-технологической информатики Российской академии наук

127055, г. Москва, Вадковский переулок, д. 18, стр. 1А

Institute for Design-Technological Informatics RAS

127055, Moscow, Vadkovskij per., d. 18, str. 1A

e-mail: doronin_il@mail.ru

В настоящее время все большее внимание уделяется организации управления производством, посредством компьютерных программ, основанных на специальных алгоритмах, которые позволяют анализировать и управлять процессами, протекающими на предприятии, а также обеспечить их взаимодействие с внешним миром.

Управление современным предприятием, в том числе машиностроительным невозможно представить без информационной системы, объединяющей в себе все процессы хозяйственной деятельности организации. Такая информационная система должна обеспечивать достаточную точность планирования, прозрачность и оперативность учета, прогнозируемость выпуска готовой продукции и готовности деталей и узлов, возможность проведения анализа данных и выявления факторов, влияющих на отклонения от плана. При разработке алгоритма планирования производства требуется решить следующие задачи:

- Установить основные этапы работ по производственному заказу;
- Установить факторы, влияющие на сроки по каждому этапу;
- Разработать полную циклограмму работы по производственному заказу;
- Разработать алгоритм планирования выпуска готовой продукции;
- Разработать метод анализа текущего состояния заказа для принятия необходимых управленческих решений.

Алгоритм планирования и прогнозирования выпуска готовой продукции основан на следующих факторах:

- технически обоснованной циклограмме изготовления изделия,
- ключевых датах, предусмотренных договором с заказчиком,
- максимальной синхронизации работы производственных участков и службы снабжения
- заданном темпе выпуска по типу продукции

В качестве объекта исследования взят крупнейший в России электротехнический концерн. Концерн Русэлпром – разработчик и производитель электрических машин и энергетического оборудования самого широкого спектра применения. В концерн входит три предприятия под руководством управляющей компании.

Для расчета циклограммы и отработки алгоритма планирования выбрали тяговый асинхронный двигатель для карьерного транспорта БЕЛАЗ модели ТАД-320-6В2. Асинхронные двигатели ТАД-320-6В2 изготавливаются на производственной площадке концерна Русэлпром в г. Сафоново. В связи с этим первичное внедрение алгоритма планирования изготовления готовой продукции было реализовано на данной производственной площадке.

В качестве исходных данных были подготовлены конструкторские спецификации, технологические маршруты, нормы расхода материалов и нормы времени выполнения технологических операций. Полученный состав изделия представлен на рисунке 1.

[p31221]	ТАД-320-6В2 (ГАЕИ528572007-02)	
[d103488]	Знак маркировочный (ГАЕИ754442117)	
[d113171]	Ротор (ГАЕИ684261185)	
[d113172]	Кольцо (ГАЕИ711151214)	
[d113174]	Фланец (ГАЕИ301511179)	
[d160743]	Щит подшипниковый (ГАЕИ305125610-01)	
[d160747]	Щит подшипниковый (ГАЕИ305125814-01)	
[d160748]	Термопреобразователь сопротивления (ГАЕИ405211047)	
[d160749]	Термопреобразователь сопротивления (ГАЕИ405211047-01)	
[d162752]	Статор (ГАЕИ68422237-02)	

Рис. 1. Состав изделия ТАД-320-6В2

Для каждой детали был сформирован технологический маршрут по участкам и операциям, а каждая технологическая операция была отнормирована по трудоемкости и длительности. При расчете длительности операций была принята поправка о передачи заготовок, деталей и узлов с одного производственного участка на другой один раз в день. Технологический процесс изготовления каждой детали последовательный, при этом часть деталей, например Статор и Ротор можно изготавливать параллельно, что было учтено при построении циклограммы. Пример технологического маршрута представлен на рисунке 2.

Все входящие материалы были классифицированы по группам, после чего были собраны данные по срокам поставки материалов на основе накопившейся истории закупок. Для каждой группы материалов были установлены базовые сроки поставки.

На основе имеющихся данных по длительности всех производственных операций и длительности закупки материалов сформирована полная циклограмма изготовления продукции (рисунок 3).

При наличии даты выпуска готового изделия, определенной договором с клиентом, для всех входящих в изделие деталей возможно рассчитать плановые даты начала и окончания каждой технологической операции. Кроме того, возможно рассчитать срок начала закупки материалов и плановую дату поставки материала на производство.

[d113171] Ротор (ГАЕИ684261185)						
Место	Ст	Название	Длит	Труд	Кп	
0602	06	#1-Комплектование ▼[623] Участок сборки роторов асинхронных двигателей	0.33ч	0.33ч	1	
0602	06	#2-Слесарно-сборочная ▼[623] Участок сборки роторов асинхронных двигателей	5.5ч	5.5ч	1	
0602	06	#3-Контроль ▼[]	1ч		1	
0602	06	#4-Сварка в ин.газе неплав. эл-дом с прис. мат-лом ▼[82] Участок сварки в аргоне УДГ-501	7.7ч	7.7ч	1	
0602	06	#5-Контроль ▼[]	1.47ч		1	
0101	01	#6-Токарная ▼[795] Станок токарно-винторезный 1М65	1.6ч	1.78ч	1	
0101	01	#7-Контроль ▼[125] Стол контролера (круп. стор.)	6.4ч		1	
0602	06	#8-Сборка ▼[80] Подставка для безваловых роторов	0.363ч	0.363ч	1	
0602	06	#9-Токарная ▼[219] Станок токарный 165, 1А660	1.049ч	1.049ч	1	
0602	06	#10-Балансировка ▼[631] Станок балансировочный ВМ3000	0.77ч	0.77ч	1	
0602	06	#11-Слесарная ▼[633] Стойки ГАЕИ296371025	0.11ч	0.11ч	1	
0602	06	#12-Контроль ▼[]	5.708ч		1	
0600	06	#13-Грунтование ▼[545] Установка бескамерной окраски ГЛ 211012	8ч	0.22ч	1	

Рис. 2. Технологический маршрут изготовления Ротора электродвигателя ТАД-320-6В2

Плановый график изготовления изделия по заказу сдвинут вправо от даты выпуска готового изделия. Состав изделия представлен в виде дерева и для каждой детали и узла рассчитана плановая дата начала и окончания работ.

Название	ст	ст	К	Оп	От	До	Дн
[j31221] ТАД-320-6B2 (ГАЕИ528572007-02)	06	02	1	10	18.12.24	23.12.24	5
[i103488] Знак маркировочный (ГАЕИ754442117)	06	02	1	11	18.12.24	18.12.24	0
[d113171] Ротор (ГАЕИ684261185)	06	02	1	13	13.12.24	18.12.24	5
[d113172] Кольцо (ГАЕИ711151214)	06	02	3	11	17.12.24	18.12.24	1
[d113174] Фланец (ГАЕИ301511179)	06	02	1	9	17.12.24	18.12.24	1
[d160743] Щит подшипниковый (ГАЕИ305125610-01)	06	02	1	15	16.12.24	18.12.24	2
[d160747] Щит подшипниковый (ГАЕИ305125614-01)	06	02	1	9	17.12.24	18.12.24	1
[d160748] Термопреобразователь сопротивления (ГАЕИ405211047)	06	02	1	2	18.12.24	18.12.24	0
[d160749] Термопреобразователь сопротивления (ГАЕИ405211047-01)	06	02	1	2	18.12.24	18.12.24	0
[d162752] Статор (ГАЕИ68422237-02)	06	02	1	29	09.12.24	18.12.24	9

Рис. 3. Циклограмма изготовления электродвигателя ТАД-320-6В2

Поскольку на предприятии одновременно производятся работы по нескольким производственным заказам требуется правильное планирование выпуска изделий по заказам, а также планирование изготовления деталей и узлов, входящих в изделие.

Требуется классифицировать продукцию по группам по признакам: трудоемкость, габариты, цикл изготовления, узкие места на производстве. После формирования групп требуется задать темп выпуска для каждой группы продукции. При наличии темпа выпуска и заданных рабочих дней формируется графика выпуска готовой продукции на месяц.

Таблица 1. Шаблон заполнения графика выпуска готовой продукции на месяц

Группа	01.июля	02.июля	03.июля	04.июля	05.июля	06.июля	07.июля
№1	5	5	5	5	5		
№2	3	3	3	3	3		
№3	2	2	2	2	2		
№4	1	1	1	1	1		
№5	1	1	1	1	1		
Итого, шт/день	12	12	12	12	12	0	0

При наличии зафиксированных фактов готовности деталей на участках, а также факта поставки материалов можно рассчитать прогнозную дату выпуска готовой продукции путем прибавления остаточной циклограммы изготовления к текущей дате. Таким образом, появляется возможность отслеживания отклонений в изготовлении продукции от плановых дат, установления причин отклонений и подготовка мероприятий по их устранению. Также актуальная прогнозная дата выпуска готовой продукции позволяет менеджерам по продажам своевременно оповещать заказчика, что повышает лояльность клиентов.

Прогнозная дата рассчитывается по формуле:

$$D_p = D + T_m + T_d,$$

где D – текущая дата; T_m – оставшаяся длительность поставки материалов, календарных дней; T_d – оставшаяся длительность изготовления деталей, календарных дней.

Прогнозный график изготовления изделия по заказу сдвинут влево.

№		Название	ст	дт	К	Оп	От	До	Дн	Б
☐	☒	 [p31221] ТАД-320-6B2 (ГAEИ528572007-02)			1	um	10 21.11.24	25.11.24	4	
☐	☒	 [d162752] Статор (ГAEИ68422237-02)			1	um	29 12.11.24	21.11.24	9	0
☐	☒	 [d113210] Сердечник статора (ГAEИ684342071)			1	um	7 11.11.24	12.11.24	1	0
☐	☒	 [d113237] Лист статора (ГAEИ757221157)			824	um	5 08.11.24	11.11.24	3	0
☐	☒	 [d113211] Катужка статора (ГAEИ685421218)			68	um	11 08.11.24	12.11.24	4	0
☐	☒	 [d59538] Скоба (ГAEИ745422020-03)			4	um	3 11.11.24	11.11.24	0	0
☐	☒	 [d50443] Скоба (Заготовка для ГAEИ.745422.020-03) (ГAEИ745421002-03)			12	um	3 08.11.24	11.11.24	3	

Рис. 4. Прогнозный график изготовления в режиме критического пути

На прогнозном графике представлен критический путь изготовления изделия, на котором отображаются детали и материалы, которые не имеют запаса времени и на прямую влияют на дату выпуска готовой продукции. Отклонение прогнозной даты выпуска от плановой (смещение вправо) является сигналом для управленцев о необходимости ускорения производства/снабжения, при этом прежде всего по деталям/материалам, находящимся на критическом пути. Приведение в соответствие прогнозного и планового графика становится основной задачей в оперативном управлении производством.

Разработанный алгоритм планирования выпуска готовой продукции позволяет синхронизировать работу производства и снабжения предприятия, своевременно начинать закупку материалов и передавать их на производство, осуществлять выдачу сменных заданий и перемещение заготовок между производственными участками строго по графику.

Литература

1. <https://www.ruselprom.ru/>
2. Питер Ф. Друкер Практика менеджмента, Издательство Манн, Иванов и Фербер, 2015.
3. Производственный менеджмент: Учебник для вузов/ Под ред. С.Д. Ильенковой. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2000.
4. Сушко А.В., Полицинская Е.В. Управление и организация производством на предприятии: теоретический аспект: электронное учебное пособие - ЮТИ ТПУ, 2015.
5. Система непрерывного производственного планирования Родова – советская Lean/MRP 1961 года. Взлет, закат и новое рождение
6. А. Родов, Д. Крутянский План, Поток, Ритм. Ростовское книжное издательство 1964 г.
7. Управление – это наука и искусство: А.Файоль, Г.Эмерсон, Ф.Тейлор, Г.Форд. – М: Республика 1992. – 351 с.
8. Научная организация и нормирование труда в машиностроении: Учебник для инженерно-экономических вузов и факультетов/ А.П.Степанов, И.М.Разумов, С.В.Смирнов и др.; 2-е изд., перераб. И доп. – М.: Машиностроение, 1984 – 464 с.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА В 2D НАНОСИСТЕМАХ

В. С. Дрякина

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

127055, Вадковский пер. 3а

Tel.: (+7 499)972-42-55, e-mail: vadryakina@yandex.ru

Аннотация. Статья посвящена математическому моделированию структуры и процессов переноса в 2D-наносистемах. Рассматривается расширение применения наноматериалов, особенно 2D-материалов, таких как графен и переходные металлы дихалькогениды, в различных высокотехнологичных областях, включая электронику, биомедицину, энергетику и экологию. Основное внимание уделено уникальным физико-химическим свойствам 2D-материалов, которые обеспечивают их роль как переходного звена между молекулярными, квантовыми и макроскопическими уровнями. В статье исследуются квантовые эффекты, проявляющиеся в этих материалах, а также их макроскопические свойства, которые делают 2D-наноматериалы перспективными для создания новых устройств и технологий, таких как эффективные транзисторы, сенсоры, солнечные элементы и биосенсоры. Особое внимание уделяется применению математических моделей для описания процессов переноса в этих материалах, что способствует более глубокому пониманию их поведения и дальнейшему развитию технологий на их основе.

Ключевые слова: 2D-наноматериалы, математическое моделирование, квантовые эффекты, графен, процессы переноса, молекулярные сборки.

В последние годы применение наноматериалов значительно расширилось, охватывая широкий спектр областей, от электроники до биомедицины и экологии. Эти материалы, благодаря своим уникальным свойствам на наноуровне, открывают новые горизонты для создания более эффективных и экономичных технологий.

Наноматериалы, особенно 2D-материалы, такие как графен и переходные металлы дихалькогениды, находят широкое применение в производстве транзисторов, сенсоров и гибких дисплеев. Эти материалы обладают высокой проводимостью, прозрачностью и механической гибкостью, что способствует развитию носимой электроники и гибких устройств нового поколения. В области нанофотоники наноматериалы активно используются для создания оптических компонентов, таких как лазеры, светодиоды и фотодетекторы. Эти устройства имеют улучшенные характеристики, включая высокую чувствительность и низкое энергопотребление, что открывает новые возможности для усовершенствования телекоммуникационных и медицинских технологий.

Наноматериалы также находят применение в энергетике, значительно улучшая характеристики аккумуляторов и солнечных элементов. В частности, литий-ионные батареи нового поколения используют наноструктурированные аноды и катоды для увеличения их емкости и сокращения времени зарядки. Это делает аккумуляторы более эффективными и долговечными, что особенно важно для электротранспорта и мобильных устройств. В солнечных элементах наноматериалы, такие как перовскиты и квантовые точки, повышают эффективность преобразования солнечной энергии. Эти инновации делают солнечные панели более доступными и эффективными, способствуя переходу к устойчивым источникам энергии.

В биомедицинской области наноматериалы играют ключевую роль в разработке новых методов лечения и диагностики. Наночастицы используются для целевой доставки лекарств непосредственно в клетки организма, что уменьшает побочные эффекты и повышает эффективность лечения. Вдобавок, наноматериалы способствуют созданию высокочувствительных биосенсоров для диагностики заболеваний, таких как рак и инфекционные болезни, на ранних стадиях. Эти сенсоры могут быть использованы для мониторинга здоровья и раннего выявления заболеваний, что значительно улучшает исход лечения.



Рис. 1. Наноробот в медицине

Наноматериалы также играют важную роль в решении экологических проблем. Например, нанофильтры и нанокатализаторы эффективно удаляют загрязнители, тяжелые металлы и органические вещества из воды и воздуха, способствуя улучшению качества окружающей среды. Кроме того, наноматериалы используются в создании энергосберегающих покрытий для зданий и транспорта, таких как теплоизоляционные и самоочищающиеся покрытия, которые помогают снизить энергозатраты и улучшить устойчивость конструкций.

В промышленном производстве наноматериалы применяются для создания высокоэффективных и прочных материалов. Например, нанокомпозиты, полученные путем усиления материалов с помощью наночастиц, используются для создания легких и прочных конструкций в авиационной, автомобильной и космической промышленности. В химической и нефтегазовой промышленности катализаторы на основе наночастиц ускоряют реакции и повышают их эффективность, что способствует более эффективному производству и снижению затрат на сырье и энергию.

Современные тенденции использования наноматериалов охватывают широкий спектр областей, от электроники и энергетики до биомедицины и экологии. Эти материалы, благодаря своим уникальным свойствам, проявляющимся на наноуровне, обеспечивают значительные преимущества в сравнении с традиционными материалами. Одной из наиболее перспективных категорий таких материалов являются 2D-наноматериалы, которые занимают особое место в исследованиях благодаря своей структуре, состоящей из одного или нескольких атомных слоев. Их уникальные физико-химические свойства делают их идеальными кандидатами для различных высокотехнологичных приложений.

Важным аспектом, который отличает 2D-наноматериалы от других типов наноматериалов, является их способность служить переходным звеном между молекулярным уровнем, квантовыми частицами и макроскопическими материалами. Это означает, что 2D-материалы могут объединять характеристики, присущие

отдельным атомам или молекулам, с макроскопическими свойствами твердых материалов, что открывает новые горизонты для разработки инновационных устройств и технологий. В дальнейшем рассмотрим более подробно, как 2D-наноматериалы, благодаря своей структуре и свойствам, играют ключевую роль в связке между молекулярными и макроскопическими системами.

2D-наноматериалы, такие как графен, графеновые оксиды, переходные металлы дихалькогениды и другие, занимают уникальное положение в современных нанонауках и технике, являясь связующим звеном между молекулярным уровнем, квантовыми частицами и макроскопическими материалами. Их необычные свойства, возникающие благодаря двумерной структуре, открывают новые возможности для создания устройств и материалов с уникальными характеристиками.

1. Переход от молекул к квантовым частицам

2D-материалы обладают атомарной толщиной и, как правило, имеют значительные квантовые эффекты, такие как дискретизация энергетических уровней и сильное влияние поверхностных эффектов. На молекулярном уровне взаимодействия между атомами или молекулами в таких материалах определяются взаимодействиями между сильно связанными атомами, что приводит к возникновению уникальных физических свойств. В частности, в таких материалах проявляются квантовые эффекты, такие как сверхпроводимость, квантовый эффект Холла и квантовая конфайнментная зависимость, которые обусловлены малыми размерами и высокоразвитыми поверхностными свойствами. Формула (1) объясняет природу квантового эффекта Холла.

$$\sigma_{xy} = \nu \left(\frac{e^2}{h} \right) \quad (1)$$

где ν – число заполненных уровней Ландау, e – заряд электрона, h – постоянная Планка.

Для материалов в двумерной структуре характерна высокая чувствительность к внешним воздействиям, например, электрическому или магнитному полю, что подчеркивает их квантовое поведение. Например, графен в одиночном слое имеет линейную дисперсию электронов, что позволяет ему вести себя как двухмерный материал, демонстрируя квантовые эффекты даже при относительно высоких температурах. Плотность состояний в двумерных системах, таких как графен можно определить как:

$$D(E) = \frac{g}{2\pi} \frac{|E|}{(\hbar v_F)^2}, \quad (2)$$

где g – фактор вырождения, v_F – скорость фермионов Дирака, E – энергия.

2. Переход от квантовых частиц к макроскопическим свойствам

С другой стороны, 2D-наноматериалы при масштабировании их до больших размеров (например, в виде пленок или слоев) начинают проявлять макроскопические свойства, которые могут быть использованы в различных приложениях. Эти материалы сохраняют квантовые особенности при достаточно большом масштабе, но при этом начинают демонстрировать типичные для твердых тел механические, электрические и тепловые характеристики, такие как высокая прочность, проводимость и теплопроводность. Например, графен, будучи материалом с исключительными механическими свойствами, может использоваться для создания сверхпрочных и одновременно легких материалов. Тепловые процессы определяются в виде:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T, \quad (3)$$

где T – температура, t – время, α – коэффициент теплопроводности.

3. Молекулярная сборка и композитные материалы

Кроме того, 2D-наноматериалы могут быть использованы для создания новых молекулярных сборок и гибридных материалов. Из-за своей структуры они могут эффективно взаимодействовать с молекулами, образуя композиты с уникальными свойствами, которые могут быть полезны для различных технологий, включая электронику, оптику, биомедицину и экологию. В таком контексте 2D-материалы представляют собой идеальное «переходное звено» между молекулярным уровнем, где свойства материала определяются его молекулярной структурой, и макроскопическим миром, где эти материалы могут быть применены в реальных устройствах.

4. Применения и перспективы

Роль 2D-материалов как переходного звена раскрывается в таких областях, как микроэлектроника, нанофотоника, энергетика и биотехнологии. Например, благодаря своей способности к тонкой настройке электронных свойств 2D-материалы могут служить основой для создания высокоэффективных транзисторов и сенсоров. В области энергетики они используются для создания более эффективных солнечных элементов и аккумуляторов. В биотехнологии 2D-материалы находят применение в создании новых систем для целевой доставки лекарств и биосенсоров. Формула (4) демонстрирует вклад 2D-материалов в поглощение света, где ω – частота света, ϵ – диэлектрическая проницаемость.

$$A(\omega) = \frac{\pi e^2}{\hbar c} * \frac{1}{\epsilon}. \quad (4)$$

Исследования 2D-наноматериалов открывают уникальные перспективы для разработки высокотехнологичных устройств и материалов, обладающих как квантовыми, так и макроскопическими свойствами. Эти материалы, благодаря своей двумерной структуре, становятся связующим звеном между молекулярными уровнями и макроскопическими системами, предоставляя возможности для создания инновационных технологий в таких областях, как электроника, нанофотоника, энергетика и биотехнологии. Применение 2D-материалов значительно расширяет возможности для создания более эффективных и устойчивых устройств, начиная от транзисторов и сенсоров до солнечных элементов и биосенсоров. Несмотря на существующие вызовы, связанные с производственными процессами и интеграцией в реальные технологии, дальнейшие исследования и разработки в области 2D-наноматериалов обещают значительно повлиять на развитие высокотехнологичных отраслей, улучшая качество жизни и открывая новые горизонты для науки и промышленности.

Литература

1. Васильева Л.Ю., Уварова Л.А., Романова Е.Ю. Некоторые проблемы нанотехнологий. Исследования и моделирование наносистем, нанокмплексов, кластеров и наночастиц: Учебное пособие/ Л.Ю. Васильева, Л.А. Уварова, Е.Ю. Романова. – М.: Янус-К, 2015 – 154 с.
2. Проблемы современной нанотехнологии; Дрофа - Москва, 2010. – 272 с.
3. Ковшов А.Н., Назаров Ю.Ф., Ибрагимов И.М. Основы нанотехнологии в технике; Академия – Москва, 2011. – 240 с.
4. Шляхто Е.В. Нанотехнологии в биологии и медицине; СПб: Санкт-Петербург – Москва, 2009. – 320 с.

ЛОКАЛЬНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ТОНКОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПРОВОЛОКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОБОБЩЕННОЙ МОДЕЛИ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ

Э.В. Завитаев¹, О.В. Русаков², Т.Э. Симонова³

¹Мытищинский филиал МГТУ им. Н. Э. Баумана,
141005, Московская область, г. Мытищи, 1-я Институтская ул., 1
e-mail: eduardzavitaev@yandex.ru

²Государственный гуманитарно-технологический университет,
142600, Московская область, г. Орехово-Зуево, Зелёная ул., 22
e-mail: olegrusmail@mail.ru

³Государственный гуманитарно-технологический университет,
142600, Московская область, г. Орехово-Зуево, Зелёная ул., 22
e-mail: shuher_96@mail.ru

Рассмотрим тонкую металлическую проволоку, радиус которой сравним с средней длиной свободного пробега электронов в металле. В статье [1] приведено выражение для расчета локальной проводимости проволоки

$$\sigma(x) = \sigma_0 F(x),$$

где

$$\sigma_0 = \frac{ne^2 R}{v_F m}, F(x) = \frac{3}{\pi} \int_0^\pi \frac{\rho \sqrt{1-\rho^2}}{x-iy} \left\{ \frac{(q-1) \exp(-(x-iy)\eta/\rho)}{1-q \exp(-(x-iy)\eta_0/\rho)} + 1 \right\} d\rho d\alpha, \\ \xi = \frac{r_\perp}{R}, \rho = \frac{v_\perp}{v_F}, \left(\frac{1}{\tau} - i\omega \right) \frac{R}{v_F} = \frac{R}{\tau v_F} - i \frac{R\omega}{v_F} = x-iy, \\ \eta = \xi \cos \alpha + \sqrt{1-\xi^2 \sin^2 \alpha}, \eta_0 = 2\sqrt{1-\xi^2 \sin^2 \alpha}. \quad (1)$$

Здесь n – концентрация электронов проводимости в проволоке, e – заряд электрона, R – радиус проволоки, v_F – скорость Ферми, m – эффективная масса электрона, τ – электронное время релаксации, ω – частота электрического поля, $\vec{r}_\perp$ – компонента радиус-вектора электрона $\vec{r}$ в плоскости перпендикулярной оси симметрии проволоки, $\vec{v}_\perp$ – компонента скорости электрона $\vec{v}$ в плоскости перпендикулярной оси симметрии проволоки.

Также в [1] приведена обобщенная модель граничных условий:

$$q(\rho, \alpha) = q_0 + (1 - q_0) \exp(-b_1 |\rho \cos \alpha| - b_2 \rho^2 \cos^2 \alpha),$$

где b_1 и b_2 некоторые положительные коэффициенты, q_0 – коэффициент зеркальности внутренней поверхности проволоки.

В случае, когда $b_1 \gg 1$ и $b_2 \gg 1$, имеем $q(\rho, \alpha) = q_0$ и переходим к модели Фукса [2], в случае, когда $q_0 = 0$, а $b_1 \ll b_2$, переходим к модели Соффера [2].

В следствие перехода к классическому случаю при $q = 1$ [3], имеем

$$F_d(x) = \frac{1}{x-iy}, \quad (2)$$

Исходя из этого, найдем относительные погрешности модуля $P(x)$ и аргумента $B(x)$ локальной проводимости

$$P(x) = \left| \frac{|F_d(x)| - |F(x)|}{|F(x)|} \right|, \quad B(x) = \left| \frac{\arg(B_d(x)) - \arg(B(x))}{\arg(B(x))} \right|.$$

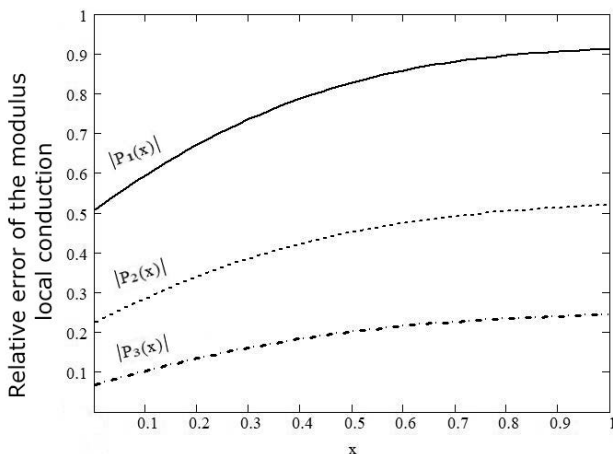


Рис. 1. Относительная погрешность P модуля локальной проводимости σ от безразмерной обратной длины свободного пробега электронов x . При $y = 1$ и $\xi = 1$:
1) $q_{01} = 0, b_{11}=10, b_{21}=10$; 2) $q_{02} = 0, b_{12}=1, b_{22}=10$; 3) $q_{03} = 0, b_{13}=1, b_{23}=1$

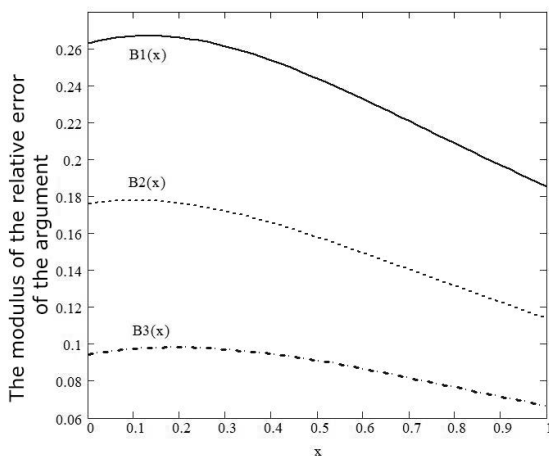


Рис. 2. Модуль относительной погрешности B аргумента локальной проводимости σ от безразмерной обратной длины свободного пробега электронов x . При $y = 1$ и $\xi = 1$:
1) $q_{01} = 0, b_{11}=10, b_{21}=10$; 2) $q_{02} = 0, b_{12}=1, b_{22}=10$; 3) $q_{03} = 0, b_{13}=1, b_{23}=1$

Исследуем поведение коэффициентов R и B в случаях граничных условий Фукса, Соффера и обобщенной модели Юшканова.

Как видно из рис. 1 и 2, применение обобщенной модели граничных условий значительно влияет на локальную проводимость. Наблюдается существенное отклонение модуля и аргумента проводимости при применении граничных условий Фукса и Соффера от классического результата.

Литература

1. *Завитаев Э.В., Русаков О.В., Симонова Т.Э.* Расчет электрической проводимости тонкой цилиндрической проволоки из металла с обобщенными граничными условиями Юшканова. М., // Ежегодная национальная (с международным участием) научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана по итогам научно-исследовательских работ за 2022 г.
2. *Каримов Ф. А., Юшканов А. А.* Зеркально-диффузные граничные условия для электронов на поверхности металла с учётом зависимости от угла падения // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика. 2020. № 1. С. 50–56.
3. *Э.В. Завитаев, Т.Э. Симонова, А.И. Уткин* к вопросу о расчете проводимости тонкой цилиндрической проволоки из металла с применением обобщенной модели граничных условий // Седьмая международная научная конференция «Моделирование нелинейных процессов и систем» 2023 г. С. 85-86.

РАСЧЕТ САМОИНДУКЦИИ ТОНКОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПРОВОЛОКИ ИЗ МЕТАЛЛА

Э.В. Завитаев¹, О.В. Русаков², А.И. Уткин², К.Е. Харитонов²

¹Мытищинский филиал ФГОУ ВО «МГТУ им. Н. Э. Баумана»,
Мытищи, Россия 141005, ул. 1-я Институтская, 1
EduardZavitaev@yandex.ru

²ГОУ ВО МО «Государственный гуманитарно-технологический университет»,
Орехово-Зуево, Россия 142611, ул. Зелёная, 22
olegrusmail@mail.ru, aiutkin@yandex.ru, kirillharitonov1@mail.ru

Аннотация. Выполнен расчет самоиндукции внутри тонкой цилиндрической проволоки из металла на основе решения кинетического уравнения Больцмана для электронов в металле. Рассмотрен общий случай, когда отношение длины свободного пробега электронов к радиусу проволоки может принимать произвольные значения. В качестве граничных условий задачи принято условие зеркально-диффузного отражения электронов от внутренней поверхности проволоки.

Ключевые слова: тонкая проволока, самоиндукция, энергия магнитного поля, сила тока, магнитная индукция, плотность тока.

Электрические и магнитные свойства проводников, линейный размер которых сравним с длиной свободного пробега электронов Λ , существенно отличается от свойств «массивных» проводящих объектов.

Вопросы, касающиеся расчета электрической проводимости тонкой цилиндрической проволоки из металла, обсуждались в работах [1, 2]. Магнитная индукция внутри такой проволоки определялась в работах [3, 4]. В упомянутых работах применяется подход, основанный на решении кинетического уравнения Больцмана, для электронов в металле.

Рассматривается цилиндрическая проволока из немагнитного металла (относительная магнитная проницаемость $\mu \approx 1$) радиуса R и длины D (будем считать, что $D \gg R$), к концам которой приложено переменное электрическое напряжение частоты ω :

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \exp(-i\omega t).$$

Проведем расчет самоиндукции L , обусловленной магнитным полем внутри проволоки:

$$W = \frac{LI^2}{2} \Rightarrow L = \frac{2W}{I^2}, \quad (1)$$

где W – энергия магнитного поля; I – сила тока, через поперечное сечение проволоки.

Энергия магнитного поля W :

$$W = \frac{\mu_0 n^2 e^4 R^6 E_z^2 D}{v_F^2 m^2} J_W, \quad (2)$$

где

$$J_W = \frac{9}{\pi} \int_0^1 \frac{1}{\delta} \left(\int_0^\delta \int_0^1 \int_0^\pi \frac{\xi \rho \sqrt{1-\rho^2}}{\nu} \left(\frac{(q-1) \exp(-\nu \eta / \rho)}{1-q \exp(-\nu \eta_0 / \rho)} + 1 \right) d\xi d\rho d\alpha \right)^2 d\delta.$$

Сила тока I :

$$I^2 = \frac{n^2 e^4 R^6 E_z^2}{v_F^2 m^2} J_I, \quad (3)$$

где

$$J_I = 36 \left(\int_0^1 \int_0^1 \int_0^\pi \frac{\xi \rho \sqrt{1-\rho^2}}{\nu} \left(\frac{(q-1) \exp(-\nu \eta / \rho)}{1-q \exp(-\nu \eta_0 / \rho)} + 1 \right) d\xi d\rho d\alpha \right)^2.$$

Здесь

$$\xi = \frac{r_\perp}{R}, \quad \rho = \frac{v_\perp}{v_F}, \quad \delta = \frac{r_{\perp B}}{R}, \quad \nu = \left(\frac{1}{\tau} - i\omega \right) \frac{R}{v_F},$$

$$\eta = \xi \cos \alpha + \sqrt{1 - \xi^2 \sin^2 \alpha}, \quad \eta_0 = 2\sqrt{1 - \xi^2 \sin^2 \alpha},$$

μ_0 – магнитная постоянная вакуума; e , m , n – соответственно, заряд, масса и концентрация электронов; E_z – составляющая напряженности электрического поля вдоль оси симметрии проволоки; v_F – скорость Ферми; q – коэффициент зеркальности поверхности; δ – «безразмерный радиус индукции»; $r_{\perp B}$ – компонента радиус-вектора электрона в плоскости перпендикулярной оси симметрии проволоки при определении магнитной индукции; $r_\perp$ и $v_\perp$ – соответственно, компоненты радиус-вектора и скорости электрона в плоскости перпендикулярной оси симметрии проволоки; τ – электронное время релаксации.

Подставив (2) и (3) в (1), найдем искомую самоиндукцию L внутри проволоки:

$$L = 2\mu_0 D \frac{J_W}{J_I}. \quad (4)$$

Литература

1. Завитаев Э.В. Высокочастотная проводимость тонкой цилиндрической проволоки из металла / Э.В. Завитаев, А.А. Юшканов // Микроэлектроника. 2008. Т. 37. № 6. С. 429–438.
2. Кузнецова И.А. Влияние механизма поверхностного рассеяния электронов на высокочастотную проводимость тонкой металлической проволоки / И.А. Кузнецова, А.В. Чапкин, А.А. Юшканов // Микроэлектроника. 2011. Т. 40. № 1. С. 45–51.
3. Завитаев Э.В. Расчет магнитной индукции внутри тонкой цилиндрической проволоки из металла / Э.В. Завитаев, О.В. Русаков, К.Е. Харитонов // Вестник Московского государственного областного университета. Серия «Физика-Математика». 2016. № 2. С. 74–84.
4. Завитаев Э.В. Зависимость магнитной индукции внутри тонкой цилиндрической проволоки из металла от механизма поверхностного рассеяния электронов / Э.В. Завитаев, О.В. Русаков, А.И. Уткин, К.Е. Харитонов // Микроэлектроника. 2022. Т. 51. № 2. С. 148–154.

ЛОКАЛЬНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ТОНКОГО СЛОЯ В СЛУЧАЕ НЕОДНОРОДНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Э.В. Завитаев¹, О.В. Русаков², Т.Э. Симонова², А.И. Уткин²

¹Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана,
1-я Институтская ул., 1, г. Мытищи, Московская обл., Россия, 141005

²Государственный гуманитарно-технологический университет,
ул. Зеленая, 22 г. Орехово-Зуево, Московская обл., Россия, 142611

E-mail: aiutkin@yandex.ru

Аннотация. Выполнен расчёт локальной проводимости тонкого слоя в случае неоднородного электрического поля. Проанализирована зависимость модуля и аргумента функции локальной проводимости тонкого слоя σ^* от безразмерного параметра неоднородности поля k в случае произвольного значения безразмерного химического потенциала u_0 .

Ключевые слова: локальная проводимость, тонкий полупроводниковый слой, коэффициенты зеркальности, химический потенциал, неоднородное электрическое поле, кинетическое уравнение Больцмана.

При достижении определенного значения размера тонкой плёнки необходимо учитывать вклад рассеяния носителей зарядов (электронов и дырок) на поверхностях плёнки [1–5]. Когда толщина плёнки становится, по порядку величины, сравнима с расстоянием межчастичных столкновений, то в ней начинают проявляться специфические резонансные эффекты. Таким образом, исследование данного обстоятельства имеет важное прикладное значение [6]. Скин-эффект в данном случае не учитывается, поскольку рассматриваемая толщина тонкого слоя не превышает минимального значения толщины скин-слоя для типичных металлов, которая составляет порядка 100 нм [7]. Квантовые эффекты также не учитываются.

Рассмотрим тонкий проводящий слой толщиной a и коэффициентами зеркальности верхней q_1 и нижней q_2 поверхностей слоя. Пусть неоднородное электрическое поле параллельно слою и направлено вдоль оси X . Ось Z имеет направление вверх и вглубь тонкого слоя. Тогда:

$$\mathbf{E} = E_0 \exp(iky - i\alpha t),$$

где ω – частота электрического напряжения, приложенного к проводящему слою, k – волновое число.

Представим функцию распределения электронов (дырок) в виде $f(\mathbf{v}, z, t) = f_0(\varepsilon) + f_1(\mathbf{v}, z, t)$ [8] и будем искать ее как решение кинетического уравнения Больцмана [9]:

$$e v_x E \frac{\partial f_0}{\partial \varepsilon} + v_z \frac{\partial f_1}{\partial z} - i \omega f_1 + i k v_y f_1 = - \frac{f_1}{\tau}, \quad (1)$$

где e – заряд электрона (дырки), v_z , v_x , v_y – соответствующие проекции вектора их скорости на координатные оси, τ – время релаксации электрона (дырки), $\varepsilon = mv^2/2$ – кинетическая энергия электрона (дырки), v – модуль вектора скорости электрона (дырки), m – эффективная масса электрона (дырки).

Здесь

$$f_0 = \left(1 + \exp\left((\varepsilon - \mu) / k_b T\right)\right)^{-1},$$

$$\frac{\partial f_0}{\partial \varepsilon} = -\exp\left((\varepsilon - \mu) / k_b T\right) \left(\exp\left((\varepsilon - \mu) / k_b T\right) + 1\right)^{-2} k_b T^{-1},$$

где μ – химический потенциал, k_b – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура.

Решив уравнение (1) и используя зеркально-диффузные граничные условия для функции f_1 , при отражении носителей заряда от поверхностей слоя ($f_1^+(v_z, 0) = q_1 f_1^-(v_z, 0)$, $f_1^-(v_z, a) = q_2 f_1^+(v_z, a)$) можно получить аналитическое выражение для локальной проводимости тонкого слоя:

$$\sigma = \frac{4ame^2 k_b T}{h^3} \ln\left(1 + \exp(u_\mu)\right) \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{\sin^3(\theta) \cos^2(\varphi)}{x - iy + i\kappa \sin(\theta) \sin(\varphi)} \times$$

$$\times \left(2 + \frac{q_1(\exp(\gamma) + q_2) - (\exp(\gamma) + q_1)}{\exp(\gamma) - q_1 q_2 \exp(-\gamma)} \exp(-\gamma \xi) + \right.$$

$$\left. + \frac{q_2(\exp(-\gamma) + q_1) - (\exp(-\gamma) + q_2)}{\exp(-\gamma) - q_1 q_2 \exp(\gamma)} \exp(-\gamma(\xi - 1)) \right) d\theta d\varphi. \quad (2)$$

где h – постоянная Планка, $u_\mu = \mu/k_b T$ – безразмерный химический потенциал, $y = a\omega/v$ – безразмерная частота электрического поля, $\kappa = ka$ – безразмерный параметр неоднородности электрического поля, $x = a/tv$ – безразмерная частота объёмных столкновений носителей зарядов, $\xi = z/a$ – безразмерная координата внутри тонкого слоя, $\gamma = (x - iy + i\kappa \sin(\theta) \sin(\varphi))/\cos(\theta)$.

Для дальнейших расчётов в выражении (2) выделим функцию локальной проводимости σ^* :

$$\sigma^* = \ln\left(1 + \exp(u_\mu)\right) \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{\sin^3(\theta) \cos^2(\varphi)}{x - iy + i\kappa \sin(\theta) \sin(\varphi)} \times$$

$$\times \left(2 + \frac{q_1(\exp(\gamma) + q_2) - (\exp(\gamma) + q_1)}{\exp(\gamma) - q_1 q_2 \exp(-\gamma)} \exp(-\gamma \xi) + \right.$$

$$\left. + \frac{q_2(\exp(-\gamma) + q_1) - (\exp(-\gamma) + q_2)}{\exp(-\gamma) - q_1 q_2 \exp(\gamma)} \exp(-\gamma(\xi - 1)) \right) d\theta d\varphi.$$

Рассмотрим поведение модуля и аргумента функции локальной проводимости σ^* от безразмерного параметра неоднородности электрического поля κ .

На рис. 1 видно, что для менее легированных полупроводников характер зависимости их модуля функции локальной проводимости от безразмерного параметра неоднородности электрического поля κ менее выражен, чем для более легированных полупроводников. В то же время во всех случаях модуль функции локальной проводимости тонкого полупроводникового слоя увеличивается, достигая своего максимума, а затем начинает уменьшаться, при увеличении параметра неоднородности поля κ .

На рис. 2 можно наблюдать, что аргумент функции локальной проводимости тонкого слоя не зависит от химического потенциала.

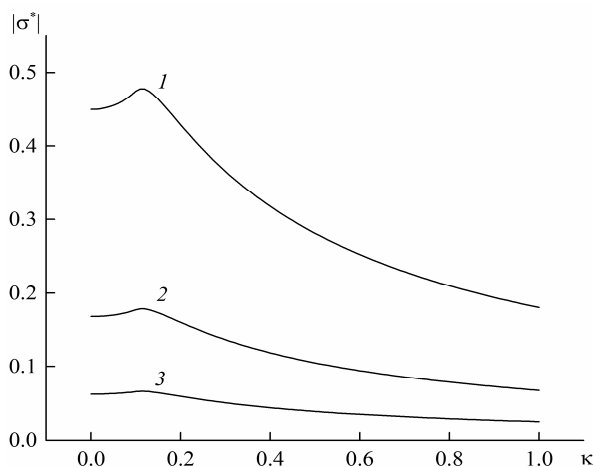


Рис.1. Зависимость модуля функции локальной проводимости σ^* от безразмерного параметра неоднородности электрического поля κ . Кривая 1 отвечает значениям: $x = 0.01, y = 0.1, \xi = 0.5, q_1 = q_2 = 0.5, u_\mu = -3$; 2 – $x = 0.1, y = 0.1, \xi = 0.5, q_1 = q_2 = 0.5, u_\mu = -4$; 3 – $x = 0.1, y = 0.1, \xi = 0.5, q_1 = q_2 = 0.5, u_\mu = -5$

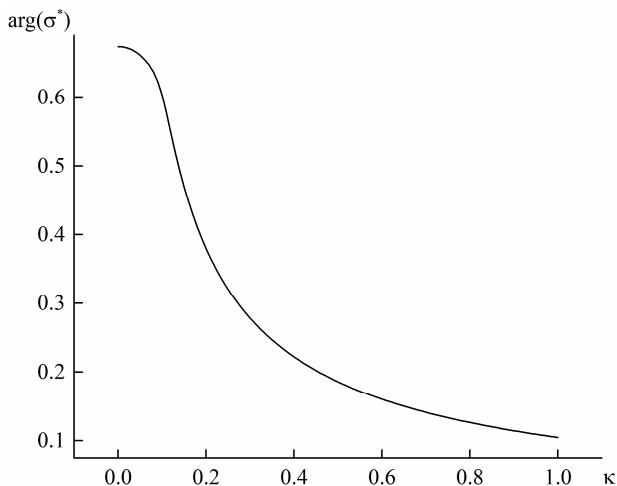


Рис.2. Зависимость аргумента функции локальной проводимости σ^* от безразмерного параметра неоднородности электрического поля κ , когда $x = 0.01, y = 0.1, \xi = 0.5, q_1 = q_2 = 0.5$, при трёх значениях обезразмеренного химического потенциала u_μ : -3, -4 и -5. Все три кривые совпадают

Таким образом, можно сделать вывод о том, что вариация параметра неоднородности электрического поля κ оказывает существенное влияние на локальную проводимость тонкого слоя.

Литература

1. Fuchs K. The conductivity of thin metallic films according to the electron theory of metals. *Proc. Camb. Phil. Soc.*, 1938, vol. 34, no. 11, pp. 100-108. DOI: 10.1017/S0305004100019952
2. Хасс Г. Физика тонких пленок. Т. 2. М., Мир, 1967.
3. Sondheimer E.H. The mean free path of electrons in metals. *Advances in Physics*, 2001, vol. 50, no 6, pp. 499-537. DOI: 10.1080/00018730110102187
4. Завитаев Э.В., Юшканов А.А. Высокочастотная проводимость тонкой цилиндрической проволоки из металла. *Микроэлектроника*, 2008, Т. 37, № 6, с. 429–438.
5. Кузнецова И.А., Чапкин А.В., Юшканов А.А. Влияние механизма поверхностного рассеяния электронов на высокочастотную проводимость тонкой металлической проволоки. *Микроэлектроника*, 2011, Т. 40, № 1, с. 45–51.
6. Войтович И.Д., Лебедева Т.С., Шпилевой П.Б., Беднов Н.В. Покрытия из нанопористого анодного оксида алюминия для сенсорных применений. *Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии*, 2014, Т. 12, № 1, с. 169–180.
7. Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Теоретическая физика. Том 10. Физическая кинетика. М., Физматлит, 2002.
8. Завитаев Э.В., Русаков О.В., Чухлеб Е.П. Влияние парных столкновений носителей зарядов на электрическую проводимость тонкого проводящего слоя. *Журнал технической физики*, 2023, Т. 93, № 11, с. 1561–1569.
9. Уткин А.И., Юшканов А.А. Влияние коэффициентов зеркальности на проводимость тонкого металлического слоя в случае неоднородного, периодического по времени электрического поля. *Микроэлектроника*, 2016, Т. 45, № 5, с. 386–395.

DEVELOPMENT OF A NEW COMPUTATIONAL ALGORITHM FOR CONVERTING THE MOVEMENTS OF A GRINDING WHEEL IN AN INSTRUMENTAL COORDINATE SYSTEM TO THE 4-AXIS KINEMATICS OF A CNC GRINDING MACHINE

Artem Ershov^{1,2,3,4}

¹ Лаборатория Технологий Микрообработки, Московский Государственный Технологический Университет “СТАНКИН”, 127055 Москва, Россия;

² кафедра инструментальной техники и технологии формообразования, Московский Государственный Технологический Университет “СТАНКИН”, 127055 Москва, Россия;

³ кафедра прикладной математики, Московский Государственный Технологический Университет “СТАНКИН”, 127055 Москва, Россия;

⁴ Молодежная Лаборатория цифрового моделирования кибер-физических инструментальных систем, Московский Государственный Технологический Университет “СТАНКИН”, 127055 Москва, Россия.

Abstract. Шлифование является одним из основных методов производства режущего инструмента. В работе предложен расчет форм стружечных канавок проектирования стружечных канавок режущих инструментов и соответствующей заданным геометрическим параметрам преобразование позиционирования шлифовального круга для осуществления инструментальной наладки на многокоординатный станков с ЧПУ. Были получены результаты настройки и проанализированы диапазоны геометрических параметров профиля винтовой канавки в зависимости от различных параметров наладки станка, что позволило определить наиболее рациональные условия в зоне шлифования при получении требуемого функционального изделия.

1. Введение

Шлифование канавки на цельном режущем инструменте подразумевает непрерывный контакт абразивных зерен шлифовального круга с винтовой поверхностью обрабатываемой заготовки, однако только часть этих абразивных частиц удаляет материал и формируют витки и элементы стружки [1]. Остальные частицы вызывают трение или плунжерное врезание в поверхность, что увеличивает тепловыделение в зоне резания [2, 3]. В результате на поверхностном слое образуются дефекты, изменяется поверхностная микроструктура, неэффективное формообразование приводит к погрешностям геометрии [4], эти недостатки могут быть нивелированы за счет подачи СОЖ в зону резания либо изменения площади контакта для повышения эффективности отвода тепла из зоны обработки [5, 6]. Геометрия канавки инструмента задается внешним диаметром d , передним углом γ и задним углом α , углом наклона винтовой канавки [7–10]. Геометрия режущего инструмента зависит не только от конструктивных особенностей, заложенных на этапе проектирования [11, 12], но и от подготовки оборудования и процесса обработки рабочих поверхностей [13, 14]. Шлифование стружечных канавок является одна из самых сложных операций при обработке концевых фрез и спиральных сверл [15]. Определение положения

шлифовального круга относительно заготовки должно учитывать геометрию профиля стружечной канавки, форму шлифовального круга, а также схему шлифовального станка. Определением положения шлифовального круга занимались многие научные группы. Таким образом, для определения условия касания шлифовального круга и обрабатываемой винтовой поверхности сверла (фрезы) применяются математические методы определения параметров технологической наладки.

Таблица 1. Список основных обозначений

Обозначение параметра	Определение
R	Радиус шлифовального круга
R_0	Радиус сердцевины сверла
ω	Угол наклона стружечной канавки
M	Расстояние между осями заготовки и шлифовального круга
ε	Угол между осями шлифовального круга и осью заготовки
L_r	Длина стружечной канавки
δ	Расстояние между торцем заготовки и осью шлифовального круга при его повороте на 90 градусов
σ	Угол раствора стружечной канавки
γ	Передний угол на профиле стружечной канавке
r_1	Радиус передней поверхности на стружечной канавке
r_2	Радиус спинки на стружечной канавке
$x'y'z'$	Система координат заготовки
$X_wY_wZ_w$	Система координат шлифовального круга
...	

Методы аналитической геометрии позволяют определять положение шлифовального круга не только специальной [17, 18], но и стандартных форм, таких как 1V1, 1A1, 1F1. Применение методов проекции производящей поверхности круга при винтовом движении, позволяет определить профиль стружечной канавки, как огибающая к спроецированным кривым [19]. Данный метод может использоваться для поиска конкретных точек, например точек перехода формируемых за две операции шлифовании стружечных канавок с большим углом раствора и большим радиусом сердцевины на каждой из операций [20].

Расчетный подход к технологической подготовке для создания наладки на шлифовальном станке с ЧПУ, с учетом формы шлифовального круга для конкретной рабочей поверхности и расчет его формообразующих движений на фактической компоновке станка позволяет сформировать профили с различными условиями контакта

круга и заготовки. В улучшение условий процесса шлифования и более эффективный отвод тепла из зоны обработки обеспечивается за счет подачи СОЖ повышения площади контакта шлифовального круга с заготовкой.

2. Методы и подходы

К основным геометрическим параметрам определяющих геометрию винтовых канавок инструментов могут относиться: параметры радиус сердцевины сверла, угол конуса производящей поверхности резания, форма и геометрические параметры подточки, задние углы вдоль режущей кромки, передние углы вдоль винтовой канавки, ширина зуба, а также точка положения касания образующей относительно производящей поверхности и оси сверла [21–24]. Длина главной режущей кромки в контрольной точке, определяемая от начального положения (в точке пересечения главной и поперечной режущих кромок), а длина режущей части с учетом запаса на переточку [25]. Разработанный подход учитывает исходные геометрические параметры инструмента и позволяет установить взаимосвязь с технологическими параметрами. Такой подход позволяет не только определить подходящую конструкцию инструмента на стадии проектирования, но и определить показатели процесса его изготовления. На рис. 1 показаны основные параметры кинематики станка для шлифования винтовых канавок и представлена последовательность преобразования положений шлифовального круга относительно заготовки. Наладка шлифовального станка подразумевает настройку по параметрам установки – межосевому расстоянию M и углу скрещивания осей ε . Позиционирование круга задается относительно системы координат заготовки $x'y'z'$. Перемещение шлифовального круга по осям Z и X определяют величину параметра δ . Формообразование винтовой стружечной канавки осуществляется за счет согласованных перемещений X , Z и A .

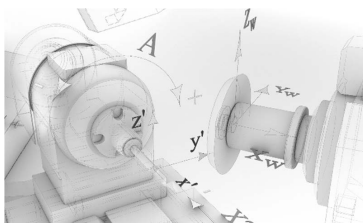


Рис. 1. Схема положения основных узлов шлифовально-заточного станка с расположением систем координат заготовки и шлифовального круга

Для гибкого управления профилем стружечной канавки в данной работе предлагается метод, определяющий межосевое расстояние в зависимости от двух других параметров установки. В радиальной плоскости при угле скрещивания осей $\varepsilon = 0^\circ$, определить межосевое расстояние для ε можно по формуле:

$$M = (R + R_0) \cdot \cos \left(90 - \arccos \left(\frac{\delta}{R + R_0} \right) \right), \quad (1)$$

где Dw - диаметр шлифовального круга, dc - диаметр сердцевины.

При угле $\Psi \neq 0^\circ$ проекция круга на радиальную плоскость будет являться эллипсом, параметры которого:

$$a = R \cdot \sin(90^\circ - \varepsilon), \quad (2)$$

$$b = R, \quad (3)$$

Для нахождения точки на эллипсе:

$$\begin{cases} x = a \cdot \cos \left(\arctan \left(\frac{a}{b} \cdot \tan \left(\arccos \left(\frac{\delta}{R+R_0} \right) \right) \right) \right) \\ y = b \cdot \sin \left(\arctan \left(\frac{a}{b} \cdot \tan \left(\arccos \left(\frac{\delta}{R+R_0} \right) \right) \right) \right) \end{cases} \quad (4)$$

По координатам x и y можно найти радиус в данной точке r , тогда расчет межосевого расстояния с условием касания к диаметру сердцевинки при различных сочетаниях R , ε и δ :

$$M = (r + R_0) \cdot \cos \left(90 - \arccos \left(\frac{\delta \varepsilon}{r + R_0} \right) \right). \quad (5)$$

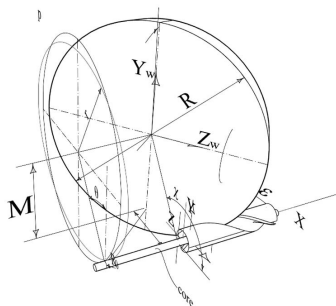


Рис. 2. Схема инструментальной наладки при шлифовании винтовой поверхности инструмента

При создании конструкции с прямолинейными главными режущими кромками, когда радиальный передний угол принимает небольшие значения зона шлифования круга смещается, меняя параметр M . Из-за разницы в количестве зубьев, меняется угол раствора канавки. В первом случае r_1 меньше, чем во втором случае, как и σ , что непосредственно влияет на M , который в данном случае оказывает прямое влияние сразу на ε и δ (рис. 2).

3. Результаты и обсуждение

Рассмотрим шлифование набора профилей винтовых канавок при различных величинах позиционирования круга относительно поперечного направления заготовки по оси OY (рис. 3). В данном случае исходными параметрами стружечной канавки являлись $R_0 = 3$ мм и $\varepsilon = 38,5^\circ$, форма шлифовального круга -1V1, с параметрами: $R=61,779$ мм, угол конуса $19,55$, ширина круга 10 мм, радиус скругления $0,1$ мм. Из характера зависимостей на графиках можно установить, что при диапазоне значения параметра δ от 27 до 31 передний угол принимает значения от $1,5^\circ$ до $2,8^\circ$, что обеспечит прямолинейную режущую кромку, однако при данном диапазоне δ , приоритетным значением параметра инструментальной наладки будет являться $\delta = 31$, так как при нем будет обеспечивать наилучший отвод тепла из зоны обработки. Параметр инструментальной наладки со значением $\delta = 33$ может быть использован например для производства конструкций спиральных сверл.

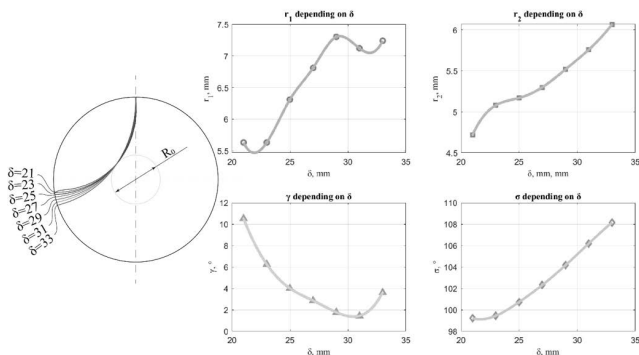


Рис. 3. Изменение геометрических параметров на профиле стружечной канавки в зависимости от различных параметров инструментальной наладки шлифовального круга

При применении данного подхода могут быть улучшены условия в зоне шлифования. Ограничение только параметром диаметра сердцевины, позволяет гибко настраивать параметры ϵ и δ , при том, что параметр M определяется автоматически, позволит закладывать в расчет формы профиля канавки такие параметры как форма кромки и/или форма задней поверхности, а также совершенствовать технологический процесс производства за счет радиальных условий шлифования.

4. Заключение

Разработанный подход позволяет создавать инструментальную наладку для производства существующих и новых конструкций режущих инструментов с винтовыми канавками. Предложенный метод включает определение положения шлифовального круга стандартного профиля (1A1, 1V1) для обработки заданного профиля стружечной канавки, а также переход от проектирования к универсальной наладке оборудования. Расчет инструментальных наладок на шлифовальном станке с ЧПУ учитывает форму шлифовального круга для формообразования поверхности инструмента и расчет его формообразующих движений на фактической компоновке станка, что позволяет сформировать профили с различными условиями контакта круга и заготовки. В улучшение условий процесса шлифования и более эффективный отвод тепла из зоны обработки обеспечивается эффективный доступ в зону шлифования СОЖ и повышения площади контакта шлифовального круга с заготовкой.

5. Благодарности

The support of this work under the project FSFS-2024-0011 of the State Research Task is gratefully acknowledged and was carried out using equipment provided by the Center of Collective Use of MSUT STANKIN.

Литература

1. Tian, Lin & Fu, Y. & Xu, Jiuhua & Li, Haiyan & Ding, Wenfeng. (2015). The influence of speed on material removal mechanism in high speed grinding with single grit. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 89. 192–201. 10.1016/j.ijmachtools.2014.11.010

2. Combined processing of micro cutters using a beam of fast argon atoms in plasma / A. Metel, Y. Melnik, E. Mustafaev [et al.] // *Coatings*. — 2021. — Vol. 11, № 4. — P. 465. — DOI: 10.3390/coatings11040465.
3. High-precision method for determining the optimal trajectory of movement of a conical grinding wheel relative to the helical groove of solid ceramic mills / S.N. Grigoriev, P.M. Pivkin, M.A. Volosova [et al.] // *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*: 3, Virtual, Online, 21–25 сентября 2020 года. – Virtual, Online, 2020. – P. 115401E. – DOI 10.1117/12.2574389.
4. Rabiei, F. Performance improvement of eco-friendly MQL technique by using hybrid nanofluid and ultrasonic-assisted grinding / F. Rabiei, A.R. Rahimi, M.J. Hadad // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2017. – Vol. 93. – No 1–4. – P. 1001–1015. – DOI 10.1007/s00170- 017-0521
5. Breuer, Peter & Gilles, Mick & Knothe, Jan & Prinz, Sebastian & Bergs, Thomas. (2025). Thermal analysis of the polycrystalline diamond grinding process with a water-based cooling lubricant by numerical simulation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 136. 2325–2337. 10.1007/s00170-024-14953-2.
6. Разработка цельных концевых фрез из режущей керамики для обработки заготовок из труднообрабатываемых материалов / С.Н. Григорьев, В.А. Гречишников, М.А. Волосова [и др.] // *Вестник МГТУ "Станкин"*. – 2018. – № 4(47). – С. 87–93.
7. A new method for modeling edges of a toroidal cutting surface of solid ceramic end mills / P. M. Pivkin, M. A. Volosova, I. V. Minin [et al.] // *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*: 3, Virtual, Online, 21–25 сентября 2020 года. – Virtual, Online, 2020. – P. 115401G. – DOI 10.1117/12.2574391.
8. A new approach for controlling of curved cutting edges of toroid-shaped end-milling cutter / P. M. Pivkin, I. V. Minin, A. A. Ershov [et al.] // *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*: 10, Virtual, Online, 12–16 апреля 2021 года. – Virtual, Online, 2021. – P. 117320. – DOI 10.1117/12.2588699.
9. Denkena, Berend & Bergmann, Benjamin & Worpenberg, Sebastian. (2022). Simulation-based design of flank face modification for the milling of Ti-6Al-4V and Inconel 718. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 120. 10.1007/s00170-022-09016-3.
10. M. Pivkin, A. A. Ershov, M. A. Volosova [et al.] // *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*: 18, Virtual, Online, 13–17 сентября 2021 года. – Virtual, Online, 2021. – P. 118670. – DOI 10.1117/12.2602170.
11. Oezkaya, Ekrem & Michel, Sebastian & Biermann, Dirk. (2022). Experimental and computational analysis of the coolant distribution considering the viscosity of the cutting fluid during machining with helical deep hole drills. *Advances in Manufacturing*. 10. 1–15. 10.1007/s40436-021-00383-w.
12. Design of Toroid-Shaped Solid Ceramic End Mill / V. Grechishnikov, S. Grigoriev, P. Pivkin [et al.] // *EPJ Web of Conferences: Modeling of Nonlinear Processes and Systems (MNPS-2019)*, Moscow, 15–17 октября 2019 года. – EDPsciences: EDPsciences, 2019. – P. 05001. – DOI 10.1051/epjconf/201922405001.
13. Physicomechanical nature of acoustic emission preceding wire breakage during wire electrical discharge machining (Wedm) of advanced cutting tool materials / S. N. Grigoriev, P. M. Pivkin, M. P. Kozochkin [et al.] // *Metals*. – 2021. – Vol. 11, No. 11. – DOI 10.3390/met11111865
14. Wolf, T.; Iovkov, I.; Biermann, D. Influence of a Discontinuous Process Strategy on Microstructure and Microhardness in Drilling Inconel 718. *J. Manuf. Mater. Process*. 2021, 5, 43. <https://doi.org/10.3390/jmmp5020043>

15. Li, Guochao & Dai, Lei & Liu, Jiao & Zhou, Honggen & Tian, Guizhong & Li, Lei. (2020). An approach to calculate grinding wheel path for complex end mill groove grinding based on an optimization algorithm. *Journal of Manufacturing Processes*. 53. 99–109. 10.1016/j.jmapro.2020.02.011.
16. Wang, Liming & Jianping, Yang & Fang, Yang & Zhu, Jiang & Li, Jianfeng. (2023). A novel wheel path generation approach for grinding taper end-mills subjected to variable cross-section. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 129. 1–17. 10.1007/s00170-023-12315-y.
17. Chen, Keyan & Dai, Xing & Zhang, Xiaojian & Liu, Chao & Ding, Han. (2024). On the path planning method of polishing tool based on the abrasive belt flap wheel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 133. 1–14. 10.1007/s00170-024-13821-3.
18. Zheng, Gaojun & Yue, Caixu & Liu, Xianli & Jiang, Zhipeng & Hongyang, Wang. (2023). A novel method for flute grinding of conical end milling cutter. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 126. 1–11. 10.1007/s00170-023-11071-3.
19. H. Wang, X. Liu, C. Yue, S. Wang, G. Zheng, and K. Zhao, “A novel grinding method for the flute with the complex edge by standard wheel,” *Int J Adv Manuf Technol* **125**(1–2), 577–586 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10501-y>.
20. Z. Chen, X. Liu, G. He, C. Yue, L. Wang, and S.Y. Liang, “An iteration-based algorithm for two-pass flute grinding of slide round milling tools,” *Int J Adv Manuf Technol* **111**(9–10), 2533–2543 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06278-7>.
21. Пивкин, П. М. Технология изготовления цельной конструкции резца для обработки торцевых канавок сложной формы / П. М. Пивкин // Вестник МГТУ "Станкин". – 2016. – № 4(39). – С. 40–46.
22. Выбор шага смещения формообразующего контура при трохойдальном фрезеровании паза концевыми фрезами / В. А. Гречишников, Ю. Е. Петухов, П. М. Пивкин [и др.] // СТИН. – 2017. – № 4. – С. 21–23.
23. Roy, Rohit & Tzen, Jong-Jer & Chieng, Wei-hua. (2022). Automated contour mill-tool grinding path generation via deep learning. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 1–22. 10.1080/0951192X.2022.2128221.
24. Denkena, Berend & Dittrich, Marc-Andre & Wichmann, Marcel & Friebe, Sven. (2019). Self-optimizing process planning for helical flute grinding. *Production Engineering*. 13. 10.1007/s11740-019-00908-0.
25. Denkena, Berend & Wichmann, Marcel & Wulf, Michael. (2025). Architecture for autonomous shape error compensation in tool grinding. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 58. 80–86. 10.1016/j.cirpj.2025.02.001.

ВОЗМОЖНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ БЕСКОНЕЧНОГО СОЦИАЛЬНОГО ГРАФА СОТРУДНИКА

М.Ю. Ибатуллин

ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет
«СТАНКИН», Москва, Россия, 127055, Москва, Вадковский пер., д. 3а
Тел. (+7 926) 341-13-47, e-mail: uits_stankin@mail.ru

В условиях стремительной цифровизации общества объемы социальных данных увеличиваются семимильными шагами, что создает необходимость в эффективных методах их обработки и анализа. В настоящее время одним из ключевых направлений в области анализа данных являются исследования, которые изучают социальные взаимодействия с использованием теории сетей. В частности, анализ социальных сетей сосредоточен на структуре, представляющей собой повторяющиеся и регулярные паттерны отношений [1]. Социальные данные, которые мы можем получить из различных источников (социальные сети, платформы обмена сообщениями и открытые базы данных), а также внутрикорпоративных, содержат ценную информацию о поведении, интересах и взаимодействиях пользователей. Однако, чтобы извлечь полезные знания из этих данных, требуется их визуализация, что позволяет упростить восприятие сложной информации и выявить скрытые закономерности.

По мнению автора, достаточно востребованным видом анализа в ближайшее время станет социальный профиль сотрудника предприятия (СП), который представляет собой обобщенную информацию о его профессиональных и личных характеристиках, включающий данные о квалификации, опыте работы, навыках, а также о его социальном взаимодействии внутри организации. Такой профиль способствует более эффективному управлению командой, а также помогает работодателям выявить сильные стороны сотрудников и области для их развития.

Бесконечный социальный граф – это концепция, которая расширяет традиционное представление о социальном графе, добавляя динамичность и возможность постоянного обновления (рис.1). Он представляет собой модель, в которой узлы (сотрудники, проекты и другие объекты) и рёбра (социальные связи между ними) могут бесконечно расти и изменяться в зависимости от новых взаимодействий и данных. С математической точки зрения это пара $(V(Gr), E(Gr))$, где $V(Gr)$ — это бесконечное множество элементов, известных как вершины (Vertex), а $E(Gr)$ — это бесконечное семейство неупорядоченных пар элементов из $V(Gr)$, которые называются рёбрами (edges).

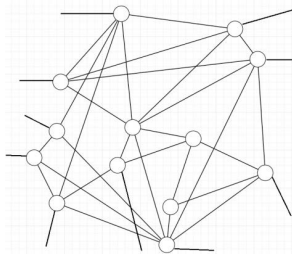


Рис. 1. Бесконечный социальный граф

Построение бесконечного социального графа сотрудника включает в себя создание динамической модели, которая отображает не только текущие, но и потенциальные связи и взаимодействия между сотрудниками в организации. Этот подход позволяет учитывать изменения в структуре команды и взаимодействиях, что особенно важно в условиях цифровизации и стремительного развития бизнеса. Рассмотрим основные аспекты построения бесконечного социального графа:

Узлы могут представлять собой сотрудников, проекты, команды или другие социальные объекты, а ребра отображать связи между узлами и варьироваться от формальных (например, рабочие отношения) до неформальных (дружеские связи). Бесконечный социальный граф требует постоянного обновления данных для отражения изменений в команде и новых взаимодействий, что может быть реализовано через автоматизированные системы сбора данных, таких как электронная почта, мессенджеры, системы мониторинга и оценки эффективности работы сотрудников на рабочих местах и персональных носимых устройствах, системы управления проектами и социальные сети. Все эти данные могут помочь создать полную картину взаимодействия и выявить группы сотрудников с плотными связями. Кроме того необходимо применять алгоритмы для анализа сетей, такие как алгоритмы выделения сообществ или методы кластеризации.

Если говорить о вершинах графа, то это может быть информация о должности, обязанностях, уровне образования и квалификации, что позволяет оценить соответствие сотрудника требованиям компании. Навыки и компетенции включают в себя технические (*hard skills*), так и личные качества (*soft skills*), которые необходимы для выполнения работы. Опыт работы помогает понять карьерный путь сотрудника, указывая на предыдущие места работы, должности и достижения. Вершины интересы и увлечения помогают нам выявить личные качества сотрудника, которые могут быть полезны в командной динамике.

Ребра социального взаимодействия включают в себя данные о взаимодействиях с коллегами, участие в командных проектах и мероприятиях, что позволяет оценить уровень вовлеченности и коммуникабельности.

Использование бесконечного социального графа позволяет руководителям организаций выявлять сильные стороны сотрудников и эффективно распределять задачи, а также понимать, как сотрудники взаимодействуют друг с другом, что помогает выявить узкие места в коммуникациях, что может способствовать повышению общей эффективности работы команды.

Литература

1. Визуализация данных социального профиля для использования в прикладных задачах / А. Ю. Тимонин // Вестник Пензенского государственного университета. – 2017. – № 3 (17). – С. 112–118.
2. Генерация социальных графов и поиск сообществ /Н.О. Бузун // «Информационные технологии и системы - 2014» 38-я конференция-школа ИППИ РАН 1–5 сентября, Нижний Новгород, Россия. Сборник трудов. ISBN 978-5-901158-25-8.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГИГРОМЕТРА НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

И.В. Иванов

Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева,
Калужский филиал, Калуга, Россия
248007, г. Калуга, ул. Вишневского, 27
тел. (8-4842)72-50-27, e-mail: mcxa_iv@inbox.ru

О.К. Иванова

МГТУ «СТАНКИН», Москва, Россия
127055, г. Москва, Вадковский пер., 3а
тел. (8-910)468-23-85, e-mail: oksivgor@mail.ru

В настоящее время успешно разрабатываются и используются в промышленности и сельском хозяйстве гигрометры на принципах молекулярной электроники. В сравнении с первыми простейшими гигрометрами, основанными на изменении упругих свойств некоторых материалов в зависимости от влажности воздуха, точность новых датчиков гораздо выше, а диапазон измеряемых величин существенно шире. Датчики данного типа применяются на различных объектах с повышенными требованиями к поддержанию влажности в нужном диапазоне, например, в лабораториях по переработке и изготовлению полупроводниковых приборов, на фармацевтических предприятиях, птицефабриках, в теплицах, хранилищах, сушильках и т.д.

Чувствительный элемент такого датчика – это ионообменный полимер, помещенный между двумя электродами. Такие полимеры имеют специфическую особенность к поглощению молекул воды с последующей диссоциацией поверхностных ионных групп [1–4]. При адсорбции воды возникают свободные носители заряда, и проводимость системы растет. С точки зрения технических приложений необходимо иметь однозначную зависимость сопротивления образца от влажности среды и температуры. Поэтому исследование процессов адсорбции воды ионообменными материалами, сопровождающихся переносом заряда через границу раздела твердой и жидкой фаз, имеет принципиальное значение с точки зрения стабилизации режимов работы устройств на основе полимерных ионообменников, входящих в состав гигрометров нового поколения, особенно в области малых влажностей, где проблема стоит особенно остро.

В качестве экспериментальной модели чувствительного элемента гигрометра было разработано специальное устройство, состоящее из двухосной стеклянной камеры с двумя боковыми соосными цилиндрическими шлифами, на торцах которых установлено по три платиновых электрода, расположенных соосно друг против друга. Между электродами размещался образец перфорированной полимерной катионообменной мембраны МФ-4СК в виде литиевой соли сульфокислоты обменной емкостью 0,78 ммоль/г. Это позволяет измерить сопротивление мембраны методом «полюса» с обеих сторон, методом «двойной мембраны», а также по диагонали и тем самым исключить вклад контактных сопротивлений. Устройство обеспечивает измерение массы образца и его толщины без извлечения из камеры. Измерялась зависимость сопротивления образца от влажности воздуха в камере. Измерения проводились с помощью моста переменного тока с частотой 1 кГц.

Для теоретического описания результатов этого эксперимента в данной работе в рамках термодинамического подхода, последовательно развитого в работах [5-10], построена математическая модель переноса заряда в ионообменных полимерах при сорбции паров воды. Задача решена с помощью минимизации полного термодинамического потенциала системы, который складывается из термодинамического потенциала стандартного состояния, в качестве которого взят полимер, содержащий молекулы воды, непосредственно взаимодействующие с его гидрофильными центрами; изменения потенциала при последующей конденсации воды; потенциала ионной подсистемы, связанного с диссоциацией ионогенных групп и формированием их гидратных оболочек, образованием раствора, состоящего из гидратированных ионов и свободной воды, а также энтропийным вкладом, обусловленным различными конфигурациями в размещении диссоциированных и недиссоциированных ионогенных групп на полимерной матрице и ионов в растворе; и, наконец, потенциала, связанного с упругой деформацией полимерных цепочек при влагопоглощении.

На основании данной модели получены теоретические зависимости сопротивления ионообменного полимера от относительной влажности воздуха при физически допустимых значениях параметров системы. Результаты сравнения показали, что теоретические зависимости сопротивления ионообменного полимера от относительной влажности воздуха вполне адекватно объясняют экспериментальные данные, полученные на описанном выше устройстве, в диапазоне влажностей от 10 до 100% и температур от 15 до 40 °С.

Таким образом, при теоретической интерпретации имеющихся экспериментальных данных по проводимости ионообменного полимера, находящегося в равновесии с водяным паром, в рамках предложенной модели принципиально важно как можно точнее учитывать электростатическую энергию зарядов в адсорбированной пленке воды (дебавеское экранирование, поверхностный заряд, ион-дипольное взаимодействие при адсорбции полярных молекул). Вклад этих факторов наиболее существен в области малых и средних влажностей.

Однако для дальнейшего развития модели переноса заряда в пористых ионообменных материалах с целью получения точных количественных результатов и детального их сравнения с экспериментом необходимо установить аналитическую зависимость сопротивления ионообменного полимера от температуры. Это позволит полностью решить проблему температурной коррекции выходных параметров измерителей влажности нового поколения в максимально широком диапазоне.

Литература

1. Кокотов Ю.А. Иониты и ионный обмен. Л.: Химия. 1980. 172 с.
2. Гантман А.И. Основные закономерности сорбции воды полимерными ионитами // Журнал физической химии. 1992. Т. 66. № 7. С. 1713.
3. Gregor H., Sundheim B., Held K., Waxman M. Studies on Ion-Exchange Resins. Water Vapor Sorption // Journal of Colloid Science. 1952. V. 7. P. 511.
4. Тимаев С.Ф., Гладких С.Н. О механизме переноса ионов в перфторированных сульфокатионитовых мембранах // Доклады Академии Наук. 1982. Т. 262. № 3. С. 656.
5. Агафонов В.М., Иванов И.В. Фазовый переход при сорбции паров воды на поверхности ионообменных материалов // Журнал физической химии. 1996. Т. 70. № 8. С. 1490.
6. Иванов И.В. Проводимость полимерных ионообменных материалов при сорбции паров воды // Журнал физической химии. 2005. Т. 79. № 3. С. 534.

7. *Иванов И.В.* Физическая модель гигрометра с чувствительным элементом из ионообменного полимера // Естественные и технические науки. 2017. № 4. С. 12.
8. *Иванов И.В.* Фазовые переходы в ионообменных материалах при сорбции паров воды // Журнал физической химии. 2021. Т. 95. № 12. С. 1893.
9. *Иванов И.В., Иванова О.К.* Математическое моделирование изотерм адсорбции в полимерных ионитах // В сборнике: Самарские чтения (в память об академике А.А. Самарском). Материалы международной конференции. Москва, 2022. С. 265.
10. *Ivanov I.V., Ivanova O.K.* Mathematical Modeling of Adsorption Isotherms of Water Vapour on Polymeric Ionites Used in Agrochemical Practice // E3S Web of Conferences. 2023. V. 463. P. 01035.

ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГИХ СВОЙСТВ ТОРФА ПРИ ПРОМЕРЗАНИИ С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАЗВУКА

Г.Н. Иванов, И.В. Кривенко, М.А. Смирнова, С.Р. Испирян

Тверской государственный технический университет, г.Тверь, Российская Федерация
170026, Тверь, наб. Аф.Никитина, 22

Tel.: (+7 4822)78-91-90, e-mail: Григорий Иванов ivanovgrigoriy@mail.ru

Разработанная методика определения процентного состава незамерзшей воды в образцах торфа основана на явлении изменения скорости продольных ультразвуковых волн в предварительно замороженных торфяных образцах при их оттаивании.

Известно, что фазовый состав воды, определяющий физико-механические, тепловые, электрические и другие свойства мерзлых грунтов, является их важнейшей характеристикой. Возникновение и развитие различных криогенных физико-геологических явлений связано с изменением фазового состава торфа при его промерзании и оттаивании.

Для определения количества незамерзшей воды в мерзлых грунтах ранее чаще всего применялся калориметрический метод [1]. Методы, основанные на физико-химических свойствах мерзлых пород: dilatометрический; криоскопический, гигроскопический использовались реже. Все большее применение находят методы, основанные на различии физических свойств влаги в твердой и жидкой фазах, и, в частности, ультразвуковой метод. Его преимуществами являются простота и возможность применения в полевых условиях (экспресс-метод).

В настоящей работе была использована экспериментальная установка ДУК-20, позволяющая измерять скорости ультразвука V_p в образце торфа при промораживании. Температуру образцов регистрировали с помощью термопары.

В результате исследований установлена зависимость V_p в торфе от его относительной влажности. Так, при относительной влажности более 90%, V_p по своему значению приближается к скорости звука в воде, т.к. пустоты между агрегатами твердой фазы (поры) почти полностью заполнены водой. При уменьшении относительной влажности наблюдается резкое снижение скорости распространения звуковых волн. Установлено, что при влажности 70-75% скорость достигает минимального значения. Это объясняется тем, что основным «носителем» упругой волны становится газообразная фаза, а связь между частицами торфа при этом еще недостаточно жесткая. Дальнейшее снижение влажности приводит к росту упругих связей между агрегатами твердой фазы, уменьшению размера пор, и как следствие, к возрастанию скорости звука.

Проведенные исследования также показали, что с постепенным повышением влажности торфа в зоне распространения упругих волн в результате миграции влаги к месту промерзания в образце торфа имеются два резких увеличения скорости звука при температурах +1,5 и -1°C.

Изменения скорости звука при направленном равномерном охлаждении образца происходит двумя скачками: сначала до скорости 1200-1300 м/с в течение 2,5 часов, а затем до 2300-2500 м/с в течение 4,5 часов. Это происходит потому, что сначала формируются крупные кристаллы и прослойки льда в микрополостях в порах торфа, а затем происходит образование мелких кристаллов за счет «отжатия» воды из набухших волокон и частиц торфа.

В основе методики определения количества незамерзшей воды лежит использование зависимости скорости звука V_p от этого количества для водонасыщенных грунтов различных типов [2]. Однако практическая реализация такого подхода встречает ряд существенных трудностей, т.к. на абсолютные значения скорости V_p существенно влияют плотность грунта, криогенная текстура, трещиноватость и другие факторы. Другой подход заключается в получении зависимостей скорости звука от температуры на образцах одного и того же грунта с различной влажностью и с последующим использованием только одной точки каждой из этих кривых, соответствующих началу или окончанию фазовых переходов воды [3].

Полученный с использованием такой методики график зависимости количества незамерзшей воды от температуры в низинном торфе степенью разложения 25%, зольностью 30% согласуются с данными по определению количества незамерзшей воды в мерзлом торфе калориметрическим методом [4]. Таким образом, описанная методика позволяет, довольно просто и с хорошей точностью определять количество незамерзшей воды в мерзлом торфе с помощью ультразвука.

Литература

1. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. М.: Высшая школа, 1973. 445 с.
2. Фролов А.Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. 2-е изд. – Пушино: ОНТИ ПНЦ РАН. 2005. – 607 с.
3. Новые методы исследования состава, строения и свойств мерзлых грунтов / Под ред. С.Е. Гречищева, Э.Д. Ершова. М.: Недра, 1983. 140 с.
4. Исследования фазового состава воды в торфе при низких температурах // Коллоидный журнал/ И.И. Лиштван, Г.Н. Бровка, П.Н. Давидовский. 1979. Т.41 № 6 С. 1095–1099.

ИССЛЕДОВАНИЕ САПРОПЕЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ ТРУБЫ

Г.Н. Иванов, И.В. Кривенко, М.А. Смирнова, С.Р. Испирян

Тверской государственный технический университет, г.Тверь, Российская Федерация
170026, Тверь, наб. Аф.Никитина, 22

Tel.: (+7 4822)78-91-90, e-mail: Григорий Иванов ivanovgrigoriy@mail.ru

Использование сапропелей в различных отраслях промышленности зависит от их состава, физико-химических, физико-механических и др. свойств, обусловленных происхождением сапропеля. При исследовании сапропелей с помощью акустической трубы мы учитывали такие характеристики, как влажность, плотность, зольность и загазованность, влияющие на их акустические свойства.

Скорость распространения акустических волн и коэффициент поглощения вещества сапропеля зависят влажности, зольности и плотности вещества, меняющейся с глубиной слоя [1]. Наиболее существенное влияние на акустические свойства оказывает загазованность сапропеля. Так, при изменении загазованности на 1-2% акустические свойства сапропеля изменяются значительно больше, чем при изменении влажности и зольности более чем на 10%.

На гидроакустической трубе исследованы акустические свойства сапропелей из озер Тверской, Владимирской и Рязанской областей при различных параметрах акустического поля и физико-механических свойствах самого сапропеля.

Было установлено, что 1) в интервале частот 8–13 кГц дисперсия скорости звука в образцах и изменение их акустических свойств обусловлены нелинейностью физико-механических свойств сапропеля при воздействии различных внешних нагрузок; 2) на характер распространения волн в сапропелях в большей степени влияет резонансная дисперсия скорости звука, обусловленная включением резонаторов как в виде твердых частиц, так и газовых пузырьков, обусловленных процессами диагенеза, связанным с образованием газов (CO_2 , NH_3 , H_2S , N_2 , CH_4) при разложении органических веществ.

По результатам проведенных экспериментов были разработаны практические рекомендации по исследованию сапропелевых месторождений, позволяющие изучить их состав, насыщенность влагой, загазованность, слоистость, условия формирования, объем их залежей и подобрать параметры звуколокационной аппаратуры, а также и расшифровать результаты полевых эхограмм.

Литература

1. Иванов Г.Н., Кривенко И.В., Смирнова М.А., Испирян С.Р. Исследование изменения спектрального состава упругого импульса при отражении и прохождении через сапропель// *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Строительство. Электротехника и химические технологии*. 2023. № 4 (20). С. 97–105.

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ ОЦЕНКИ ИНДЕКСА ЦИФРОВОЙ ЗРЕЛОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ

И.В. Кайкова, Н.В. Елисеева

ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН", Москва, Российская Федерация,
127055, Москва, Вадковский пер., д.3а,
E-mail: kaikova03@mail.ru

Математический аппарат для расчета индекса цифровой зрелости предприятия предназначен для оценки готовности организации к цифровой трансформации и эффективности использования цифровых технологий. Его основная цель заключается в обеспечении возможности диагностировать текущий уровень зрелости, сравнивать показатели разных предприятий и подразделений, а также прогнозировать будущие изменения с учетом выявленных данных. Этот инструмент особенно важен для разработки стратегий оптимизации цифровых процессов, позволяя определить направления, требующие дополнительных ресурсов и усилий [1].

Авторская методика основывается на математическом подходе, где применяется многокритериальная оценка ключевых областей цифровой зрелости. В данном математическом аппарате предлагаются формулы, которые позволяют более точно учитывать динамику и взаимосвязь структурных областей цифровой зрелости.

Математический аппарат для расчета индекса цифровой зрелости предприятия позволяет:

1. Диагностировать текущий уровень цифровой зрелости предприятия.
2. Сравнивать различные предприятия или структурные подразделения по единой метрике.
3. Прогнозировать изменения индекса зрелости в зависимости от вводимых параметров.
4. Оптимизировать стратегию цифровой трансформации, определяя слабые места, требующие доработки.

Подход и математическая модель

Особенность подхода заключается в многокритериальном анализе, где общий индекс цифровой зрелости ($I_{цз}$) определяется через агрегированные показатели, представляющие разные структурные области предприятия, такие как культура, данные, кадры, модели, инфраструктура и инструменты, процессы и продукты. Каждая область анализируется на основе характеристик, которым присваиваются весовые коэффициенты (B_i), задающие степень их значимости. Для расчета показателей применяется метод взвешенной суммы, что позволяет учитывать, как количественные, так и качественные аспекты цифровой зрелости [2]. Весовые коэффициенты получены экспертным путем и проходят через математические методы, а именно аналитическую иерархию процессов [3]. Иерархическая структура аппарата делает методику модульной, то есть ее можно адаптировать под специфику конкретного предприятия или отрасли. Индекс цифровой зрелости рассчитывается через интеграцию отдельных областей по принципу геометрического среднего, что позволяет минимизировать влияние высоких или низких значений в отдельных областях. За счет включения параметров, таких как стандартное отклонение (σ) и коэффициент вариативности (γ), обеспечивается устойчивость методики к экстремальным значениям данных, что особенно важно при работе с разнородными или неполными источниками информации.

Формула расчета индекса цифровой зрелости

Определение индекса цифровой зрелости предприятия $I_{цз}$ рассчитывается по формуле:

$$I_{цз} = K_{авт} \times K_{ц}, \quad (1)$$

где $K_{авт}$ — результат самодиагностики предприятия по цифровому паспорту; $K_{ц}$ — уровень цифровой зрелости по всем структурным областям предприятия.

Цифровой паспорт предприятия служит документом, отражающим информацию о внедрении и использовании цифровых технологий в организации. Он включает данные о цифровых сервисах, использовании платформ и приложений, степени автоматизации процессов, уровне защиты данных и других аспектах цифровой зрелости [4]. Включение цифрового паспорта в процесс оценки цифровой зрелости позволяет интегрировать данные о текущем состоянии предприятия и его цифровых решений в рамках единой системы. Применение таких данных в расчете индекса цифровой зрелости позволяет получить более объективную и точную картину, обеспечивая прозрачность и доступность информации для анализа.

Использование цифрового паспорта для оценки цифровой зрелости предприятий, несмотря на свою практическую ценность, имеет значительное ограничение. Цифровой паспорт фокусируется только на аспектах автоматизации и внедрения технологий. Однако цифровая зрелость предприятия – это гораздо более комплексное понятие, которое включает не только технические аспекты, но и культурные, организационные и иные факторы [5].

Расчет уровня цифровой зрелости всех структурных областей

Расчет сводного индекса цифровой зрелости предприятия $K_{ц}$, объединяющий вклад всех структурных областей, определяется по следующей формуле:

$$K_{ц} = \frac{\sum_{i=1}^N K_i \times B_i}{\sum_{i=1}^N B_i} \times (\prod_{i=1}^N K_i)^{1/N}, \quad (2)$$

где K_i — интегральный показатель зрелости конкретной области (например, области «Культура»); B_i — весовой коэффициент для каждой области, отражающий ее значимость; N — общее количество структурных областей.

Средневзвешенная оценка по всем областям, где весовые коэффициенты нормализованы методом аналитической иерархии процессов (АНР), что позволяет учитывать различный вклад характеристик в итоговый результат:

$$K_{ц} = \frac{\sum_{i=1}^N K_i \times B_i}{\sum_{i=1}^N B_i}, \quad (3)$$

Для расчета формулы используется корень n -й степени из произведения показателей зрелости, что снижает влияние крайне высоких или низких значений, делая расчет более устойчивым к отклонениям. Геометрическое среднее показателей зрелости всех областей, учитывающее равномерность распределения зрелости между областями:

$$(\prod_{i=1}^N K_i)^{1/N}, \quad (4)$$

Углубленный расчет показателя одной из областей

Для каждой из шести структурных областей К1–К6 расчет уровня зрелости производится по уточненной формуле, учитывающей отдельные характеристики и их влияние на общий показатель:

$$K_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{K_{ij} \times B_{ij}}{1 + \gamma \times \sigma_{K_{ij}}}, \quad (5)$$

где: K_{ij} — оценка уровня зрелости j -й характеристики внутри i -й области, полученная из первичных данных при прохождении анкетирования; B_{ij} — весовой коэффициент, отражающий степень значимости характеристики j внутри области i ; γ — параметр сглаживания, учитывающий разброс значений (вариативность); $\sigma_{K_{ij}}$ — стандартное отклонение оценки K_{ij} по характеристике j (для учета неоднородности данных); N — количество характеристик в одной области.

Все структурные области рассчитываются аналогичным образом.

Используемые методы

Оценка включает в себя использование следующих математических и статистических методов:

1. Многокритериальный анализ. Формулы включают расчет показателей по нескольким структурным областям, каждый из которых зависит от совокупности характеристик, взвешенных по степени значимости. Это позволяет учитывать, как количественные, так и качественные параметры цифровой зрелости.

2. Иерархическая структура. Индекс цифровой зрелости ($I_{цз}$) определяется как агрегированный показатель, который строится на основе интеграции отдельных областей (K_i) и характеристик (K_{ij}). Такая структура обеспечивает модульность, позволяя адаптировать методику под специфику конкретного предприятия.

3. Весовые коэффициенты. Для каждой характеристики применяется весовой коэффициент (B_i), который задает ее значимость в рамках области и общего индекса. Весовые коэффициенты могут быть определены на основе экспертного анализа или с помощью аналитической иерархии процессов [6].

4. Учет вариативности данных [7]. Формулы включают параметры для обработки статистической неоднородности данных, такие как стандартное отклонение (σ) и коэффициент вариативности (γ). Это снижает влияние экстремальных значений и делает итоговый расчет более устойчивым.

5. Агрегация показателей. Для объединения характеристик в рамках одной области используется метод взвешенной суммы, а для интеграции областей — геометрическое среднее. Это минимизирует искажения от высоких или низких значений в отдельных областях.

Заключение

Преимущество такого подхода заключается в объективности оценки цифровой зрелости предприятий, достигаемой за счет использования математических и статистических методов, гибкости, а также устойчивости к аномальным данным, что минимизирует субъективность оценки. Расчет индекса адаптируема для предприятий разных отраслей и масштабов благодаря возможности настройки весовых коэффициентов и характеристик, что позволяет использовать его в различных отраслевых предприятиях и особенно важно в условиях быстро меняющихся требований к цифровой зрелости [8]. Методика позволяет объединять данные из разных источников (результаты анкетирования, цифровой паспорт предприятия), что делает расчет комплексным [9]. Кроме того, единый итоговый индекс легко интерпретировать, что упрощает использование результатов для стратегического планирования и мониторинга, сравнительного анализа. Таким образом, данный аппарат является комплексным инструментом для оценки и повышения цифровой зрелости.

Литература

1. Bican P. M., Brem A. (2020). Digital business model, digital transformation, digital entrepreneurship: Is there a sustainable “digital”? Sustainability, vol. 12, no. 13, 5239. DOI: 10.3390/su12135239.
2. Schlechtendahl J., Keinert M., Kretschmer F., Lechler A., Verl (2014). Making existing production systems Industry 4.0-ready: Holistic approach to the integration of existing production systems in Industry 4.0 environments. Production Engineering, 9 (1), 143-148. DOI: 10.1007/s11740-014-0586-3.
3. Carolis A., Macchi M., Negri E., Terzi S. (2017). A maturity model for assessing the digital readiness of manufacturing companies. In: Lodding H., Riedel R., Cieminski G., von, Kiritsis D. (eds.) Proc. IFIP Int. Conf. on Advances in Production Management Systems “Advances in Production Management Systems. Collaborative and Sustainable Manufacturing” (APMS 2017). Springer, vol. 513, pp. 13–20. DOI: 10.1007/978-3-319-66923-6_2.7
4. Dikhanbayeva D., Shaikholla S., Suleiman Z., Turkyilmaz A. (2020). Assessment of Industry 4.0 maturity models by design principles. Sustainability, vol. 12, no. 23, 9927. DOI: 10.3390/su12239927.
5. Weber C., Königsberger J., Kassner L., Mitschang B. (2017). M2DDM – A maturity model for data-driven manufacturing. Procedia CIRP, vol. 63, pp. 173–178. DOI: 10.1016/j.procir.2017.03.309.
6. Bordeleau F. E., Mosconi E., Santa-Eulalia, (2019). Business intelligence and analytics value creation in Industry 4.0: a multiple case study in manufacturing medium enterprises. Production Planning & Control, 31(2-3), 173-185. DOI:10.1080/09537287.2019.1631458.
7. Schumacher A., Erol S., Sihni W. (2016). A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises. Procedia CIRP, (52), 161-166. DOI: 10.1016/j.procir.2016.07.040.
8. Klötzer C. (2017). Toward the Development of a Maturity Model for Digitalization within the Manufacturing Industry’s Supply Chain. Proc. 50th Hawaii Int. Conf. on System Sciences, pp. 4210–4219. <https://doi.org/10.24251/HICSS.2017.509>.
9. Schuh G., Potente T., Wesch-Potente C., Weber A. R., Prote J. P. (2014). Collaboration Mechanisms to Increase Productivity in the Context of Industry 4.0. Procedia CIRP, 19, 51-56. DOI:10.1016/j.procir.2014.05.016.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НОТНЫХ СИСТЕМ ЗАПИСИ В КАЧЕСТВЕ СТЕГАНОГРАФИЧЕСКИХ КОНТЕЙНЕРОВ В РАМКАХ ЗАДАЧИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОНФИДЕНЦИАЛЬНОСТИ ИНФОРМАЦИОННЫХ РЕСУРСОВ ПРЕДПРИЯТИЯ

Кузнецова Н. М.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет

«СТАНКИН», г. Москва, Россия

127055, Вадковский пер., д. 3а

Тел.: +7 (903)581-80-15, e-mail: knm87@mail.ru

Ключевые слова: защита информации, автоматизация, конфиденциальность, стеганография, криптография.

Использование стеганографических методов в рамках задачи обеспечения конфиденциальности информационных ресурсов является эффективным способом достижения цели защиты данных. Однако методы стеганографии имеют ряд ограничений применения, в частности, наличие требований к минимизации объема полезной информации относительно размеров контейнера. На сегодняшний день наиболее эффективными по использованию объема контейнера считаются методы Least Significant Bit – методы последнего значащего бита. Данные методы позволяют использовать до 1/8 контейнера [1–5].

В статье представлен подход, позволяющий увеличить «полезный объем» контейнера, и тем самым повысить эффективность стеганографии как метода защиты.

На рисунке 1 представлена функциональная модель автоматизированной системы обеспечения конфиденциальности информационных ресурсов предприятия, ядро которой составляют стеганографические методы.

Согласно рисунку 1, на «вход» стеганографической автоматизированной системы поступают:

- конфиденциальная информация;
- ноты или запись музыкального произведения.

В качестве «методов» выступают:

- инструменты изменения стиля музыкального произведения;
- криптографические методы;
- стеганографические методы.

«Контроль» составляют:

- правила изменения стиля музыкального произведения;
- правила арпеджио.

«Выходом» является стеганографический контейнер.

На рисунке 2 представлен алгоритм получения стеганографического контейнера, в качестве которого выступает музыкальное произведение.

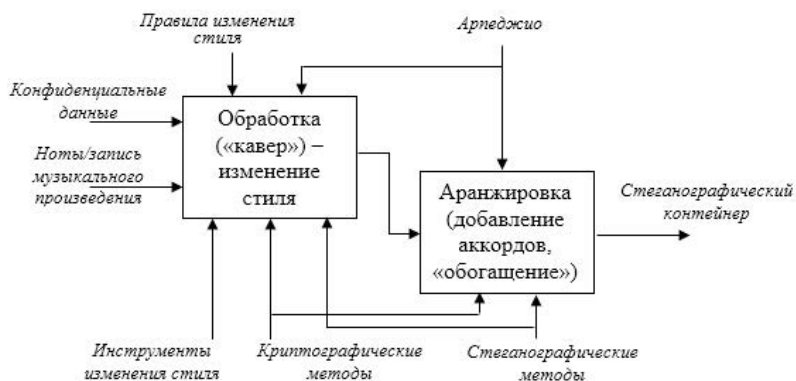


Рис. 1. Функциональная модель стеганографической автоматизированной системы (в нотации IDEF)



Рис. 2. Алгоритм получения стеганографического контейнера – музыкального произведения

Представленные в статье функциональная модель стеганографической автоматизированной системы и алгоритм получения в качестве стеганографического

контейнера музыкального произведения позволят повысить уровень конфиденциальности информационных ресурсов предприятия.

Литература

1. Tatyana V. Karlova, Alexander Y. Bekmeshov, Natalia M. Kuznetsova. Protection the Data Banks in State Critical Information Infrastructure Organizations / Proceedings of the 2019 IEEE International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies» (IT&QM&IS), Sochi, Russia // Proceedings Edited by S. Shaposhnikov, St. Petersburg, Russia: Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», 2019, ISBN 9781728125947
2. Хорев П.Б. Программно-аппаратная защита информации : учеб. пособие / П.Б. Хорев. – 2-е испр. и доп. – М. ФОРУМ : ИНФА-М, 2019. – 352 с. – (Высшее образование).
3. T.V. Karlova, A.Y. Bekmeshov, S.A. Sheptunov, N.M. Kuznetsova Methods Dedicated to Fight Against Complex Information Security Threats on Automated Factories Systems / 2016 IEEE Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&MQ&IS). – М.: «Quality», 2016. pp. 23-27. ISBN 978-5-94768-071-3
4. Kuznetsova N.M., Karlova T.V. Application of Digital Twin Technology for Modelling of Information Security Level of Industrial Plant // EPJ Web of Conferences Volume 248 (2021), V International Conference «Modeling of Nonlinear Processes and Systems» (MNPS-2020) Moscow, Russia Published online: 26 April 2021 id.02007 <https://doi.org/10.1051/epjconf/202124802007>
5. Nataliya M. Kuznetsova, Tatiana V. Karlova, Alexander Y. Bekmeshov Method of Timely Prevention from Advanced Persistent Threats on the Enterprise Automated Systems // 2022 International Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS)

МНОГОФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ ПАТОГЕНЕЗА РЕТИНОПАТИИ БОЛЬНЫХ ДИАБЕТИЧЕСКОЙ АНГИОПАТИЕЙ И РЕТИНОПАТИЕЙ

И.И.Колесниченко*, Л.М.Балашова**,***

*ФГБУ Институт физической химии и электрохимии
им. А.Н.Фрумкина Российской академии наук,
119071, Москва, Ленинский проспект, 31, корп. 4

**НП Международный научно-практический Центр пролиферации тканей

***Российский национальный исследовательский медицинский университет
им. Н.И.Пирогова Минздрава РФ
Tel. (8 916)885-98-51, kolesnichenko-ii@mail.ru

Аннотация. Исследована кровь и слезная жидкость больных диабетической ангиопатией и непролиферативной диабетической ретинопатией у пожилых пациентов с помощью метода мультисенсорной инверсионной вольтамперометрии. Подтверждена принципиальная возможность применения электрохимического мультисенсорного устройства в формате: «Электронный язык», «Электронный нос», основанного на использовании метода инверсионной вольтамперометрии для оценки крови и слезной жидкости пациентов в целях медицинской диагностики. Образцы крови пациентов, больных диабетической ангиопатией и непролиферативной диабетической ретинопатией с количественным определением Т-регуляторных кдеток CD4+CD25highFoxp3+CD127low по-разному влияют на характер инверсионных вольтамперограмм по сравнению с соматически здоровыми пациентами (контролем).

Ключевые слова: офтальмология, мультисенсорная инверсионная вольтамперометрия, Т-регуляторные кдетки CD4+CD25highFoxp3+CD127low, плазма крови, ангиопатия, диабетическая ретинопатия

Непролиферативная диабетическая ретинопатия (ДР) является заболеванием, входящим в группу ишемических ретинопатий, которые характеризуются значительным нарушением капиллярной перфузии, развитием внутриглазных новообразованных сосудов и ретинальным отеком. Диабетическая ангиопатия сетчатки обозначает группу патологических состояний светочувствительной ткани глаза, развивающихся вследствие поражения питающих ее кровеносных сосудов на фоне сахарного диабета – как правило, запущенного и длительно протекающего.

В ИФХЭ РАН разработан электрохимический метод анализа органических веществ- мультисенсорная инверсионная вольтамперометрия (МИВ)[1]. В отличие от существующих мультисенсорных систем в разработанном методе используется один индикаторный электрод, а роль сенсоров выполняет набор катионов металлов, находящихся в растворе (тест-система). Анализируемые органические вещества образуют с металлами комплексы, а методом инверсионной вольтамперометрии определяется изменение активности катионов металлов, что дает возможность

определять концентрацию органических веществ. Поскольку в растворе находится несколько металлов, то это дает возможность определять одновременно ряд органических веществ.

Целью работы является: решение проблемы эффективной диагностики заболеваний посредством раннего выявления болезни, что упрощает первичные мероприятия при одновременном снижении временных и трудовых затрат на их проведение при помощи метода мультисенсорной инверсионной вольтамперометрии.

Измерения проводились в растворе 0.05М KCl, содержащем катионы Zn^{2+} , Cd^{2+} , Pb^{2+} , Cu^{2+} , Co^{3+} , Hg^{2+} в концентрации $5 \cdot 10^{-5}$ М. В этом растворе снималась фоновая инверсионная вольтамперограмма в отсутствии пробы. При контакте органических соединений с металлами тест-системы образуются комплексы. Эти изменения в составе раствора фиксируются инверсионной вольтамперограммой [2–6]. При определении неизвестных органических веществ необходимо провести поиск оптимального соотношения между концентрациями тест- системы и органическими веществами. В ряде случаев большие концентрации металлов тест-системы могут быть нежелательны, поскольку при электроосаждении на электроде могут образовываться сплавы и в связи с этим чувствительность определения органических веществ может уменьшаться.

Всего было обследовано 18 пациентов (36 глаза) в возрасте до 82 года. Из них 9 пациентов (18 глаз) с диабетической ангиопатией, 11 пациентов (22 глаза) с диабетической ретинопатией и 5 здоровых пациентов (10 глаза) того же возраста. Было также проведено исследование **Т-регуляторных кдток CD4 + CD25highFoxp3 + CD127low**. Произведено иммунофенотипирование клеток периферической крови, включая Т регуляторные клетки (Т-reg). При **статистической обработке** полученных результатов использовался критерий Стьюдента (программа Statistica 7) и модуля «Вероятностный калькулятор».

Проведено иммунофенотипирование клеток периферической крови, включая Т регуляторные клетки (Т-reg):

1. Забор крови у во время оперативного вмешательства. Периферическую кровь отбирали в пробирки с антикоагулянтом K3EDTA (Greiner Bio One, Austria). Проведено иммунофенотипирование клеток периферической крови, включая Т регуляторные клетки (Т-reg).

2. Лизирование эритроцитов проводили при помощи лизирующего буферного раствора Red Blood Cell Lysing buffer (Life technologies, (США) по протоколу производителя. Клетки в количестве 5×10^6 из осадка ресуспендировали в 200 мкл фосфатного буферного раствора.

3. Т-reg клетки периферической крови пациентов и доноров метили при помощи Treg detection staining cocktail (Miltenyi Biotec, Германия) по протоколу производителя. Количество Трег определяли методом проточной цитометрии на цитометре MACS Quant (Miltenyi iBiotec). Исследование экспрессии гена VEGF А проводили с использованием стандартной программы в ФГАОУ ВО РНИМУ им. Н.И.Пирогова Минздрава России При статистической обработке полученных результатов использовался критерий Стьюдента (программа Statistica 7) и модуля «Вероятностный калькулятор».

Результаты и их обсуждение

Образцы сыворотки крови пациентов с диабетической ретинопатией (ДР) и диабетической ангиопатией (ДА) по-разному влияют на характер инверсионных вольтамперограмм тест-системы. (рис. 1, 2).

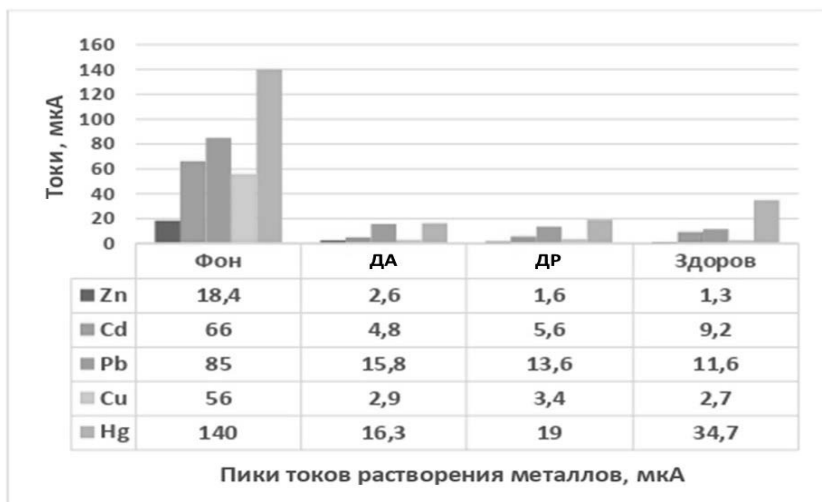


Рис.1. Влияние на пики токов растворения металлов крови пациентов больных диабетической ангиопатией (ДА), диабетической ретинопатией (ДР) и здоровых людей

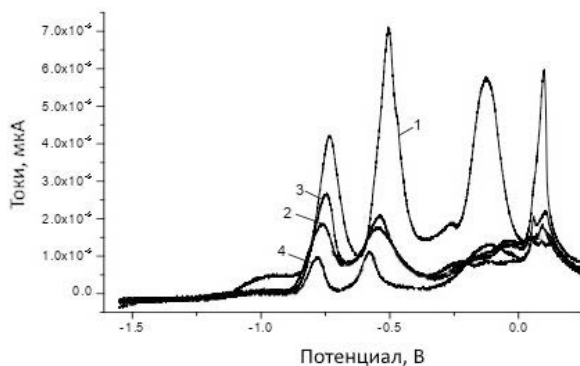


Рис.2. Вид вольтамперограмм. 1 – тест-система, 2 – влияние на тест-систему слезной жидкости пациентов с ретинопатией, 3 – влияние на тест-систему слезной жидкости пациентов с диабетической ангиопатией, 4- влияние на тест-систему слезной жидкости здоровых

Вольтамперограммы слезной жидкости также существенно отличаются друг от друга, Образцы слезной жидкости пациентов с диабетической ретинопатией (ДР) и диабетической ангиопатией (ДА) по-разному влияют на характер инверсионных вольтамперограмм тест-системы (табл. 1).

Таблица 1. Влияние на тест-систему слезной жидкости пожилых больных с катарактой и диабетом: 1 – тест-система, 2 – слезная жидкость пациентов с диабетической ангиопатией (ДА), 3- слезная жидкость больных ДР (СД II типа); слезная жидкость здоровых

		Пики токов растворения металлов, мкА					
		Zn	Cd	Pb	Cu	Co	Hg
1	Фон	24	64	74,0	34,2	40,0	60
2	Слезная жидкость пациентов с диабетической ангиопатией (ДА)	6	46	44	7	6	33
3	Слезная жидкость больных диабетической ретинопатией (ДР)	10	40	42	7	8	30
4	Слезная жидкость здоровых	11	37	40	8	9	37

Как показано на рис. 3, при использовании критерия Стьюдента определяется пограничная достоверность при сравнении количества Т-регуляторов при сравнении ДА и ДР ($p < 0,046$ и $p < 0,07$). При использовании модуля «Вероятностный калькулятор» определена достоверная разница между этими значениями ($p = 0,02$ и $p = 0,03$).

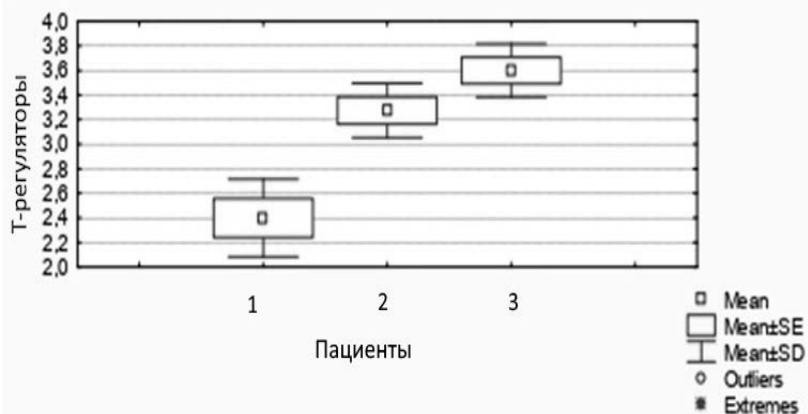


Рис. 3. Количество Т-регуляторов: здоровых – 1, больных с диабетической ретинопатией – 2(ДР), больных с диабетической ангиопатией – 3 (ДА)

Вольтамперограммы значительно различаются при исследовании богатой белками сыворотки крови (пики токов несколько ниже, чем при исследовании слезной жидкости), по высоте тока пиков (соответствующих, вероятно, образованию комплексов с ионами различных металлов) (Рис.2). Показана возможность применения электрохимического мультисенсорного анализа, основанного на методе инверсионной вольтамперометрии в формате «Электронный язык», для выявления различий при исследовании сыворотки крови, пациентов пожилого возраста с диабетической ангиопатией и больных неопролиферативной ДР при СД II типа в целях медицинского

скрининга Вольтамперограммы сыворотки крови и слезной жидкости также существенно отличаются друг от друга.

Вольтамперограмма – зависимость тока от потенциала рабочего электрода, меняющегося по линейному закону во времени. Пики соответствуют окислению металлов тест-системы. Цифровые значения (453 точки) поступают в программу для последующей обработки в виде файла, из которого извлекаются значения тока. Вольтамперограмма разбивается на N участков, количество которых зависит от сложности исследуемой системы. Таким образом формируется N -мерный образ высотой пиков тока объекта.

Заключение. Показана принципиальная возможность применения электрохимического мультисенсорного анализа, основанного на методе инверсионной вольтамперометрии в формате “Электронный нос”, и выявлены различия при исследовании плазмы крови, жидкости передней камеры и стекловидного тела в целях медицинского скрининга офтальмопатологии. Вольтамперограммы сыворотки крови и слезной жидкости также существенно отличаются друг от друга, но эти жидкости не исследовались у детей до года.

Выводы

1. При проведении исследований выявлено различие между кровью пациентов пожилого возраста с диабетической ангиопатией и больных непролиферативной ДР при СД II типа ($p < 0,05$). Для установления достаточно существенного различия вольтамперограмм слезной жидкости больных ДР и диабетической ангиопатией. Необходимо проведение серии дополнительных экспериментов, а также установления различия слезной жидкости больных пролиферативной ДР и непролиферативной ДР.

2. Показана принципиальная возможность применения электрохимического мультисенсорного устройства «Электронный нос», основанного на использовании метода инверсионной вольтамперометрии для оценки летучих метаболитов сыворотки крови пациентов в целях медицинской диагностики

Литература

1. Андреев В.Н., Ганшин В.М., Доронин А.Н., Луковцев В.П. Способ электрохимического мультисенсорного обнаружения и идентификации алкалоидов. Патент РФ №2375705, Оpubл. 10.12.2009.
2. Колесниченко И.И., Ключев А.Л., Ганшин В.М., Кантаржи Е.П. и др. Экспресс-скрининг биологических объектов с использованием мультисенсорной инверсионной вольтамперометрии с распознавания образов//Методы исследования физико-химических систем по защите металлов и физической химии поверхностей. 2014, Т.50, №4, С.543–547.
3. Kolesnichenko I.I., Balachova L.M., Kantarzhi E.P. Express Screening of Biological Objects Using Multisensor Stripping Voltamperometry with Pattern Recognition // American Journal of Analytical Chemistry, 2016, №7, P. 588–596.
4. A Multisensory Stripping Voltammetry Method for Analysis of the Generic Anti-Glaucoma. Drug Betoptic. L. M. Balashova, I. I. Kolesnichenko, V. A. Namiot, A. N. Doronin, Biophysics, 2019, Vol. 64, No. 6, pp. 885–889.
5. Определение визомитина методом мультисенсорной инверсионной вольтамперометрии. Балашова Л.М. Колесниченко И.И., Кантаржи Е.П. // Клиническая геронтология. 2017г, Т.23 № 9-10, с. 6–8.
6. Determination of Ropivacaine in Lacrimal Fluid of Children under Conduction Anesthesia by Multisensory Stripping Voltammetry . Balashova L.M., Namiot V.A., Kolesnichenko I.I., Korobova L.S., Kuznetsova Yu D., *Biophysics*, 2022, Vol 67, No 1, pp. 111–115.

СПЛАЙН-ИНТЕРПОЛЯЦИОННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

И.А. Колесников

Аннотация. При построении алгоритма нахождения сплайн-интерполяционного решения задачи оптимальных динамических измерений важным является вид начального условия для получения сплайн функции на каждом отрезке разбиения. В статье кратко представлены алгоритм построения сплайн-интерполяционного решения указанной задачи, представлены результаты вычислительных экспериментов, подтверждающих выбор начальных условий.

Ключевые слова: Математическое моделирование, оптимальное управление, система леонтьевского типа, условие Шоултера-Сидорова, динамические измерения, фильтрация, сплайн, входной сигнал.

Задача оптимальных динамических измерений заключается в восстановлении динамически искаженного сигнала по известному наблюдаемому выходному сигналу и параметрам измерительного устройства (ИУ) с использованием методов теорий оптимального управления и уравнений соболевского типа [4].

Измерительное устройство моделируется системой

$$\begin{cases} L\dot{x} = Ax + Bu, \\ y = Cx, \end{cases} \quad (1)$$

с начальным условием Шоултера-Сидорова

$$[(\alpha L - A)^{-1}L]^{p+1}(x(0) - x_0) = 0, \quad (2)$$

которое отражает начальное состояние ИУ для некоторого $x_0 \in R^n$, $\alpha \in \rho^L(M)$ [2].

В системе (1) первое равенство определяет систему леонтьевского типа (конечномерный аналог уравнения соболевского типа), L и A – матрицы, характеризующие структуру ИУ; $x(t)$ и $\dot{x}(t)$ вектор-функции состояния ИУ и скорости изменения состояния соответственно; $y(t)$ – вектор-функция наблюдения; C – прямоугольная матрица, характеризующая взаимосвязь между состоянием системы и наблюдением; $u(t)$ – вектор-функция измерений; B – матрица, характеризующая взаимосвязь между состоянием системы и измерениями.

Неизвестный входной сигнал находится как решение задачи оптимального управления, в которой минимизируется штрафной функционал

$$J(v) = \min_{u \in U_\theta} J(x(u), u)$$

в виде

$$J(u) = J(x(u)) = \sum_{k=0}^1 \int_0^\tau \|Cx^{(k)}(t) - y_0^{(k)}(t)\|^2 dt. \quad (3)$$

Форма функционала (3) определяет основную идею математической модели оптимальных динамических измерений, которая заключается в минимизации расхождения между выходным сигналом $y(t) = Cx(t)$ моделируемым системой (1), и наблюдаемым выходным сигналом $y_0(t)$ (или наблюдением) по показаниям ИУ и их производным [3]. Функция $v(t)$, при которой достигается минимум штрафного функционала, называется оптимальным динамическим измерением. Используемые в работе подходы, подробно описаны в [1], [2].

Опишем алгоритм сплайн-метода решения задачи оптимального динамического измерения.

Предположим, что даны следующие компоненты: матрицы, входящие в систему (1) и начальное условие (2), начальное значение $x_0 \in R^n$; массив наблюдаемых значений Y_{0i} в узловых точках $t_i = 0, 1, \dots, n$ выходного сигнала, причём $t_{i+1} - t_i = \delta$, $t_0 = 0$, $t_n = \tau$.

1. Разбиваем интервал $[0, \tau]$ на M интервалов $[\tau_{m-1}, \tau_m]$, где $m = 1, 2, \dots, M$, и $t_0 = \tau_0 = 0$, $t_n = \tau_M$.

2. На каждом интервале $[\tau_{m-1}, \tau_m]$, построить интерполяционную функцию $y_{0m}^\ell(t)$ в виде полинома степени $\ell \leq (n-1)/M$.

3. Для $m = 1, 2, \dots, M$ на отрезке $[\tau_{m-1}, \tau_m]$, последовательно решаем задачу оптимального динамического измерения.

$$\begin{cases} L\bar{x}_m = A\bar{x}_m + B\bar{u}_m, \\ \bar{y}_m = C\bar{x}_m, \end{cases} \quad (4)$$

$$[(\alpha L - A)^{-1}L]^{p+1}(\bar{x}_m(\tau_{m-1}) - x_m) = 0, \quad (5)$$

$$J(\bar{v}_m^\ell) = \min_{\bar{u}_m \in U_\partial} J(\bar{x}_m(\bar{u}), \bar{u}) \quad (6)$$

$$J(\bar{u}) = J(\bar{x}(\bar{u})) = \sum_{k=0}^1 \int_{\tau_{m-1}}^{\tau_m} \|C\bar{x}_m^{(k)}(t) - (\bar{y}_{0m}^\ell(t))^{(k)}\|^2 dt. \quad (7)$$

Найдём приближенное значение оптимального измерения $\bar{v}_m^\ell(t)$ в виде полинома степени 1, накладывающего условие непрерывности

$$\bar{v}_m^\ell(\tau_m) = \bar{v}_{m+1}^\ell(\tau_m), \quad (8)$$

для $u \in \mathcal{U}_{\partial m}$, где $\mathcal{U}_{\partial m} \subset \mathcal{U}_\partial$ – замкнутое выпуклое подмножество $\mathcal{U}_\partial$.

4. В результате получаем сплайн-функцию

$$\bar{v}_k^\ell(t) = \bigcup_m v_{km}^\ell(t)$$

непрерывную на $[0, \tau]$.

В работе приведены результаты вычислительных экспериментов, в основе которых лежит система

$$\begin{cases} L\bar{x}_1 = \bar{x}_2, \\ L\bar{x}_2 = -25\bar{x}_1 - 5\bar{x}_2 + 25\bar{u}, \\ \bar{y} = \bar{x}_2, \end{cases} \quad (9)$$

Тестовый сигнал представляет собой один период синусоидальной волны с амплитудой 0,48В, частотой 2Гц, со сдвигом фаз 270 градусов, постоянным смещением 0,48В и $u = 0,48\sin(4\pi t + 3\pi/2) + 0,48$, $t = [0; 2\pi]$.

На всех рисунках тестовый сигнал показан синим графиком. В работе наблюдаемый сигнал (зеленый график) искажается только за счет инерции измерительного устройства (рис. 1).

При восстановлении входного сигнала с помощью алгоритма сплайн-метода принимаются следующие начальные условия:

$$\bar{x}_1(\tau_{m-1}) = \xi_{m-1}, \quad \bar{x}_2(\tau_{m-1}) = p_{m-1}, \quad (10)$$

где $\xi_{m-1} = y_0(\tau_{m-1})$, $p_{m-1} = y'_0(\tau_{m-1})$. Выполнение алгоритма было остановлено после шага 20 из-за увеличения ошибки с каждым последующим шагом (рис. 3). Аналогичная ситуация (рис. 4) была получена при использовании следующих начальных условий

$$\bar{x}_1(\tau_m) = \xi_m, \quad \bar{x}_2(\tau_{m-1}) = p_{m-1}, \quad (11)$$

где $\xi_m = y_0(\tau_m)$.

Также были использованы начальные условия вида

$$\bar{x}_1(\tau_m) = \xi_m, \quad \bar{x}_2(\tau_m) = p_m. \quad (12)$$

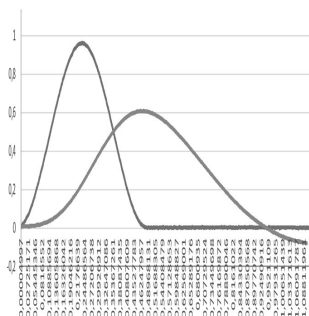


Рис. 1. Синий цвет– $u(t)$, зеленый цвет– $y_o(t)$

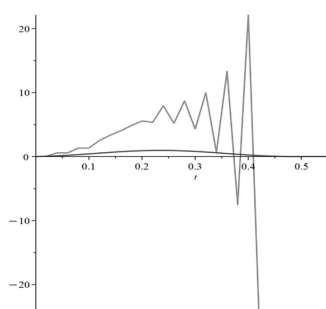


Рис. 2. Начальные условия (10)

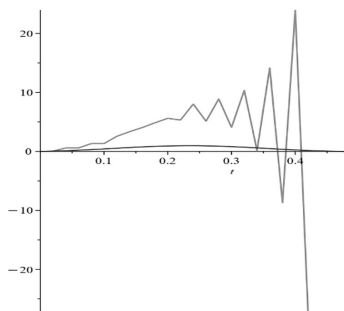


Рис. 3. Начальные условия (11)

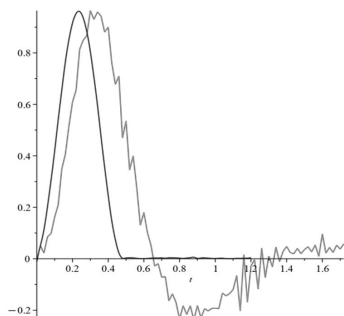


Рис. 4. Начальные условия (12)

Результаты восстановления входного сигнала приведены на рисунке 5. Отметим, что неполная проверка инерционности измерительного устройства при решении задачи восстановления входного сигнала встречается довольно часто.

Литература

1. Keller A.V. On algorithm of solving problems of optimal and hard control. *Software and systems*, 2011, no. 3, p. 42. (in Russian)
2. Keller A.V., Shestakov A.L., Sviridyuk G.A., Khudyakov Y.V. The numerical algorithms for the measurement of the deterministic and stochastic signals. *Semigroups of operators – theory and applications. Springer Proceedings in Mathematics and Statistics*, 2015, pp. 183–195.
3. Shestakov A.L., Keller A.V., Zamyshlyayeva A.A., Manakova N.A., Zagrebina S.A., Sviridyuk G.A. The Optimal Measurements Theory as a New Paradigm in the Metrology. *Journal of Computational and Engineering Mathematics*, 2020, vol. 7, no. 1, pp. 3–23.
4. Shestakov A.L., Sviridyuk G.A. A New Approach to Measurement of Dynamically Perturbed Signal. *Bulletin of the South Ural State University. Series Mathematical Modelling, Programming Computer Software*, 2010, no. 16 (192), iss. 5, pp. 116–120.

ОБЗОР СИСТЕМ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ О СМЕНЕ ПОЛОСЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМ ПРЕДСКАЗАНИЯ ДВИЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ РЕКУРРЕНТНЫХ СЕТЕЙ

Коновалов М.Д.

REVIEW OF LANE CHANGE DECISION MAKING SYSTEMS USING TRAFFIC PREDICTION SYSTEMS BASED ON RECURRENT NETWORKS

M.D. Kononov

Institute for Design-Technological Informatics RAS, Moscow, Russia

127055, Vadkovskii lane, 18a, building 1

Tel.: (+7 985)777-54-93, e-mail: m.kononov98@yandex.ru

В статье описаны две модификации систем смены полосы легкового автомобиля, основанные на методе обучения с подкреплением с использованием двух типов систем предсказания движения окружающих автомобилей, основанных на архитектурах рекуррентных нейронных сетей, таких как Long short-term memory (LSTM) и Echo state network (ESN). Рекуррентные нейронные сети широко используются для решения задачи прогнозирования временных рядов, что делает их незаменимым инструментом для решения задачи предсказания движения транспорта. В рамках системы смены полосы данные, полученные из системы предсказания движения транспортных средств используются алгоритмом, основанным на обучении с подкреплением, для формирования будущего манёвра автомобиля. Также будут проведены эксперименты с каждой реализацией системы и проведен анализ результатов с использованием таких метрик, как: средняя скорость и количество столкновений.

Ключевые слова: система смены полосы, система помощи водителю, предсказание движения, автономные транспортные средства, обучение с подкреплением, резервуарные сети,

Введение

В последние годы разработки в области автономных транспортных средств (AV) и систем помощи водителю (ADAS) активно стимулируют развитие IT сектора в транспортной отрасли. Система управления автономных и автоматизированных транспортных средств состоит из:

- 1) Системы восприятия;
- 2) Системы контроля;
- 3) Системы планирования;
- 4) Системы принятия решений.

Система принятия решений получает информацию от системы восприятия и дает указания системе планирования. Система принятия решения, основываясь на данных, полученных от системы восприятия, формирует необходимые координаты положения в пространстве и скорость. Затем система планирования формирует траекторию движения. Далее, эта информация передается в систему контроля для формирования управляющих сигналов [1]. Алгоритм, основанный на обучении с подкреплением с архитектурой Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG), совмещает в себе и систему принятия решения и систему планирования движения.

В данной статье разобраны две реализации системы смены полосы с разными модификациями систем предсказания движения окружающих автомобилей. Данные системы предсказания основаны на рекуррентных нейронных сетях: LSTM и ESN.

ESN

Представленная Гербертом в 2001 году [2], сеть эхо-состояний (ESN) представляет собой вариант рекуррентной нейронной сети (RNN), которая использует фреймворк резервуарных вычислений. Традиционные RNN часто страдали от нестабильности, вычислительной сложности и медленной скорости сходимости. ESN предлагают более простые вычисления, быстрое время обработки и более короткие циклы, что значительно улучшает приложения прогнозирования временных рядов.

Типичная структура ESN включает входные, резервуарные и выходные слои, как показано на рисунке 1. Эта структурная модель включает N входных узлов, N нейронов обработки резервуара и L выходных узлов.

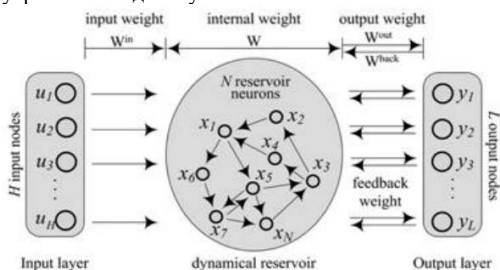


Рис. 1. Схема ESN

Здесь $u = [u_1, u_2, \dots, u_H]$ обозначает входной вектор, $y = [y_1, y_2, \dots, y_L]$ выходной вектор сети и $x = [x_1, x_2, \dots, x_N]$ обозначает вектор состояний в резервуаре. Связи внутри ESN определяются несколькими матрицами:

- Входной матрицей весов (W_{in}) размером $N \times K$.
- Матрица весов обратной связи (W_{back}) от выхода к резервуару размером $N \times L$.
- Матрицей весов внутри резервуара (W) размером $N \times N$.
- Выходной матрицей весов (W_{out}) размера $L \times (K+N+L)$.

В отличие от традиционных нейронных сетей, матрицы W_{in} , W и W_{back} в ESN инициализируются случайным образом при создании сети и не требуют дальнейшего обучения за пределами матрицы W_{out} . Резервуар обновляет свое состояние с каждым новым входом с помощью уравнения обновления состояния, а выход определяется с помощью уравнения выхода состояния. Такая настройка сводит к минимуму необходимость в обширном обучении, что делает ESN особенно эффективным для прогнозирования сложных временных рядов. Структуры резервуарных вычислений, такие как ESN, известны своей способностью становиться универсальными аппроксиматорами для динамических нелинейных систем[3], таких как фондовый рынок, экономические системы в кризисном состоянии, климатические изменения и т.п.

LSTM

Нейронные сети на основе LSTM являются одной из модификаций рекуррентных сетей, способных к запоминанию долгосрочных зависимостей в последовательности данных. Данная архитектура была представлена Зеппом Хохрайтером и Юргеном Шмидхубером в 1997 году и их появление было адресовано проблеме затухания

градиента, являющейся общей проблемой для многих архитектур рекуррентных сетей. На рисунке 2 отражена архитектура LSTM.

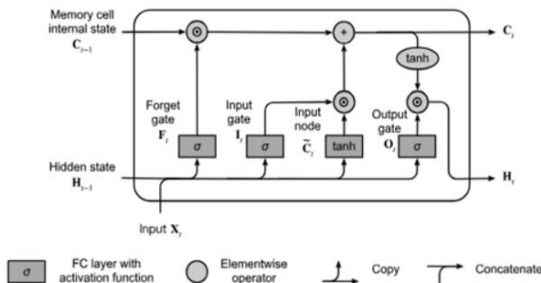


Рис. 2. Схема LSTM

- Forget Gate (F_t): решает, какую информацию следует удалить из состояния ячейки. Он смотрит на предыдущее скрытое состояние (H_{t-1}) и текущий вход X_t и применяет сигмоидальную функцию для определения частей состояния ячейки, которые следует удалить.
- Входной шлюз (I_t): решает, какую новую информацию хранить в состоянии ячейки. Этот шлюз включает в себя сигмоидный слой, который обновляет значения состояния ячейки, и слой $\tanh$, который создает вектор новых значений-кандидатов (C_t), которые могут быть добавлены к состоянию
- Состояние ячейки (C_t): Это часть «памяти» LSTM, измененная вентилем забывания и вентилем ввода. Старое состояние (C_{t-1}) умножается на выход вентиля забывания, а затем добавляется выход вентиля ввода, что подразумевает добавление значений кандидатов, масштабированных по тому, сколько новой информации мы решили включить.
- Выходной шлюз (O_t): определяет следующее скрытое состояние, которое содержит отфильтрованную информацию из состояния ячейки, используемую для прогнозов. Состояние ячейки передается через функцию $\tanh$ (для нормализации значений между -1 и 1), а затем умножается на выход сигмоидного вентиля на скрытом состоянии и входе, решая, какие части состояния ячейки попадают на выход.

Эта архитектура позволяет им эффективно обрабатывать долгосрочные зависимости и избегать проблемы исчезающего градиента, которая преследует стандартные RNN. Следовательно, LSTM особенно подходят для задач, требующих последовательных данных, таких как прогнозирование временных рядов, обработка естественного языка и сложные процессы принятия решений.

Интеграция системы предсказания движения автомобилей в систему смены полосы

В данной статье система предсказания движения окружающих автомобилей является одной из ключевых систем для системы смены полосы. На рисунке 3 показана схема смены полосы.

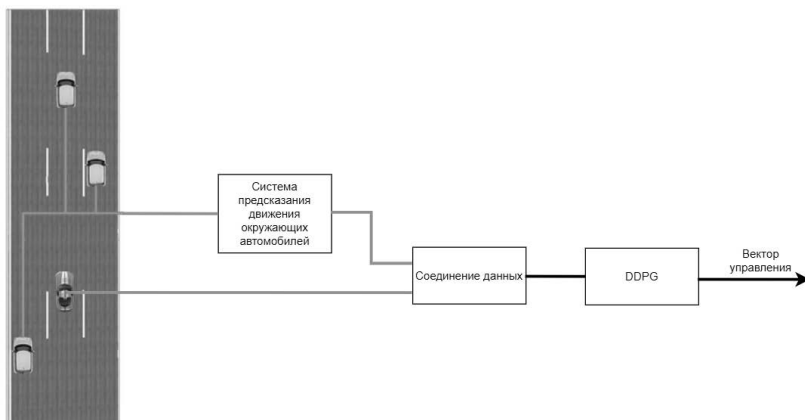


Рис. 3. Схема системы смены полосы

Модель прогнозирования движения обрабатывает сигналы от различных датчиков транспортного средства, фиксируя текущее состояние транспортного средства и его окружения. Эта модель предсказывает будущие траектории движения окружающих транспортных средств. Используя прогнозируемую траекторию в сочетании с текущим положением транспортного средства, данные подаются в сеть действий DDPG. Затем сеть акторов генерирует непрерывные значения действия для ускорения и угла поворота передних колес на основе стратегии действия. Тем временем сеть критиков обрабатывает состояние, преобразованное системой предсказания, вместе с выходными данными действия из сети акторов, создавая вектор критических значений. Этот вектор используется для оценки и постоянного уточнения стратегии сети акторов. На выходе формируется вектор управления, включающий в себя угол поворота колеса и значения ускорения.

Обучение с подкреплением

Обучение с подкреплением [4] относится к классу задач машинного обучения, в рамках которого агент обучается в процессе взаимодействия со средой с помощью различных стратегий. На рисунке 4 отражена схема обучения с подкреплением.

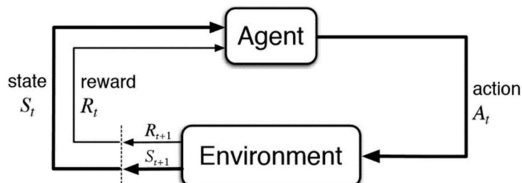


Рис. 4. Схема алгоритма обучения с подкрепления

Среда (Environment) – это поле, с которым взаимодействует агент (Agent). Сам агент реализует обучение с подкреплением. Процесс обучение начинается с отправки в среду начальных состояний (State) s агенту. Агент на основе состояния формирует действие (Action) a . Агент обновляет своё знание с получением награды (Reward) r , полученной от среды после последней итерации. Данный процесс обновления

происходит в цикле до тех пор, пока среда не пошлёт сигнал о завершении моделирования.

Определения:

1. Действие (*Action* (A, a)): всевозможные команды, которые агент может послать среде;
2. Состояние (*State* (S, s)): текущее состояние, возвращаемое средой;
3. Награда (*Reward* (R, r)): поощрение агента за действие со стороны среды;
4. Политика (*Policy* (π)): стратегия агента, используемая им для выбора следующего действия (a) с учётом текущего состояния s ;
5. Ценность (*Value* (V) or *Estimate* (E)): ожидаемая награда с учётом дисконтирования, получаемая агентом, с учётом данной политики π и состояния s ;
6. Q-ценность (*Q-value* (Q)): тоже самое что и ценность, с учётом текущего действия a . Таким образом, финальная оценка ценности в случае соблюдения агентом политики π может быть выражена: $Q^\pi(s, a)$ с учётом полученных на вход значений состояния s и действия a .

DDPG

Policy Gradient (PG) может параметризовать политику, вычислить функцию градиента относительно действия и улучшить политику с помощью градиентного спуска, что в конечном итоге приведёт к оптимальному набору действий, основанному на оптимальной политике. Результат стохастического градиента распределения вероятностей политики и, следовательно, конкретное значение выходного действия остаются неопределёнными. В детерминированной политике конкретное значение действия соответствует конкретному действию, таким образом, когда в сеть передается одно и то же состояние, выходное действие остается согласованным.

Ключевой частью DDPG [5] алгоритма является актор-критик фреймворк [6]. Существует 4 сети в структуре DDPG алгоритма: целевая сеть политики и онлайн сеть политики (Actor Network), целевая Q – сеть и онлайн Q – сеть (Critic Network).

В результате работы целевой сети политики и онлайн сети политики формируется действие μ . Далее оно поступает на целевую Q – сеть и онлайн Q – сеть. После этого формируется действие a в соответствии с состоянием s . Функция потерь L может быть рассчитана следующим образом:

$$L = \frac{1}{n} \sum_i^n (Q(s_i, a_i | \theta^Q) - y_i)^2, \quad (1)$$

$$y_i = R_i + \lambda Q^-(s'_i, \mu^-(s'_i | \theta^{\mu^-}) | \theta^{Q^-}), \quad (2)$$

где n это номер выборки, R_i награда при выборке i ; λ дисконтный фактор, θ^Q это параметры онлайн Q – сети, θ^{Q^-} параметры целевой Q-сети, $Q(s_i, a_i | \theta^Q)$ ценность действия, полученного после работы онлайн Q – сети, и $Q^-(s'_i, \mu^-(s'_i | \theta^{\mu^-}) | \theta^{Q^-})$ это будущая Q –ценность действия, получаемая при использовании целевой сети политики и целевой Q – сети.

В качестве состояний системы смены полосы можно выделить: позицию и скорость управляемого транспортного средства, позиции и скорости окружающих транспортных средств. В качестве действий можно выделить: угол поворота рулевого колеса и значение ускорения $A[t]: \{a[t], \delta[t]\}$.

Функция вознаграждения формируется из трёх частей: безопасности, эффективности движения и комфорта. Таким образом, могут быть сформулированы несколько уравнений:

$$D_{safe} = vt + D_{-default}, \quad (3)$$

где D_{safe} безопасная дистанция при заданной скорости v , временной задержке t и безопасного расстояния $D_{-default}$, независящего от скорости и временной задержки.

$$r_1 = \begin{cases} -k_c, & \text{if } d < L_{vehicle} \\ -k_{sd}, & \text{if } d < D_{safe} \\ -k_{wt}, & \text{if } y > L_{lane}, \delta \geq 0, \\ -k_{wt}, & \text{if } y < L_{lane}, \delta \leq 0, \end{cases} \quad (4)$$

где k_{wt} – штрафная константа за неправильный поворот, k_{sd} – штрафная константа за несоблюдение дистанции, k_c – штрафная константа за столкновение, d – дистанция между управляемым автомобилем и преследуемым автомобилем, y координата бокового положения управляемого транспортного средства, $L_{vehicle}$ – длина управляемого транспортного средства и L_{lane} – расстояние между транспортными средствами.

Продолжительные маневры при смене полосы движения могут снизить эффективность использования дороги, и, таким образом, это влечёт за собой дополнительные издержки для агента. Награда за эффективное вождение может быть выражена следующим образом:

$$r_2 = -dt, \quad (5)$$

где dt обозначает размер шага симуляции.

Последняя часть функции вознаграждения отвечает за комфорт и может быть определена с помощью уравнения:

$$r_3 = \frac{1}{1+|a|+|\Delta a|}, \quad (6)$$

где a обозначает ускорения управляемого автомобиля, и Δa обозначает его рывок.

Общая сумма вознаграждения может быть выражена следующим образом:

$$R = \omega_1 r_1 + \omega_2 r_2 + \omega_3 r_3, \quad (7)$$

где ω_1 , ω_2 and ω_3 обозначают веса функции вознаграждения, связанные с безопасностью, эффективностью смены полосы движения и комфортом соответственно. Вес безопасности связан с правилами дорожного движения и принятием решений в условиях текущей дорожной обстановки. Коэффициент эффективности смены полосы движения связан с процессом принятия решения о манёвре и его эффективностью. Коэффициент комфорта связан с ускорением и характером изменения ускорения транспортного средства, т.е. рывком.

Эксперименты

Для отработки обоих методов был разработан сценарий с 3 окружающими транспортными средствами на прямолинейной, двухполосной дороге без встречного движения. Одно транспортное средство занимает положение слева позади управляемого транспортного средства, другое транспортное средство занимает положение слева перед транспортным средством, а последнее транспортное средство занимает положение перед управляемым транспортным средством. Схема дороги представлена на рисунке 3.

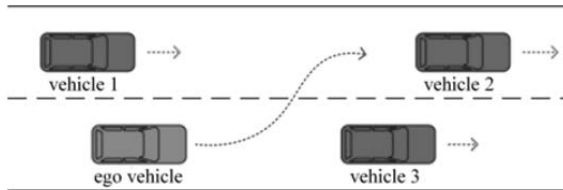


Рис.3. Иллюстрация эксперимента

Начальные условия для экспериментов включают скорость транспортных средств, их местоположение. Первое транспортное средство движется со скоростью в диапазоне 55-75 км/ч. Второе транспортное средство имеет скорость в диапазоне 50-90 км/ч. Третье транспортное средство движется в диапазоне скоростей 55-75 км/ч. Начальная скорость управляемого транспортного средства составляет 65 км/ч, а допустимая скорость - до 110 км/ч. Расстояние до транспортного средства составляет 35 м. Длительность симуляции для управляемого автомобиля составляет 3 секунды. Гиперпараметры обучения включают в себя максимальный период обучения, равный 1400, размер выборки, равный 64, скорость обучения, равную 0,001, коэффициент дисконтирования λ , равный 0,99.

Для алгоритма DDPG часть критической сети состоит из трех полностью соединенных слоёв размером 10x256, 256x256 и 256x1 соответственно. Сетевая часть Actor состоит из трех полностью подключенных слоев размером 8x256, 256x256 и 256x2 соответственно. Функция активации после каждого слоя выполняется повторно. Для функции поощрения коэффициент наказания k_{wt} равен 5, k_{sd} равен 5, k_c равен 10. Диапазон выходного сигнала ускорения равен от -5 до 5, а после активации функции диапазон выходного сигнала равен от -1 до 1. Угол поворота колеса равен от -30° до 30°, а после активации функции выходной диапазон равен от -1 до 1. ω_1 , ω_2 и ω_3 равны 5,0, 2,0 и 1,0 соответственно. Для резервуарной сети параметр g равен 2.2.

В качестве оптимизатора используется оптимизатор Adam [7].

Для анализа и сравнения мы рассматриваем два показателя: среднюю скорость и количества столкновений.

Таблица 1. Результаты экспериментов

	<i>Средняя скорость (km/h)</i>	<i>Количество столкновений</i>
Алгоритм DDPG + LSTM	85.5	2
Алгоритм DDPG + ESN	87.4	1

Обсуждение результатов

В процессе проведения экспериментов было показано, что модификация алгоритма DDPG с системой предсказания движения, основанной на алгоритме ESN превосходит алгоритм DDPG с системой предсказания движения, основанной на алгоритме LSTM. Это достигается за счёт того, что модель актора в модификации алгоритма с ESN обладает внутренней хаотической динамикой, что задаёт исследовательский характер действия агента, в контексте обучения с подкреплением. Также у данного агента проявляется большая способность к адаптации к нелинейной и динамически изменяемой среде за счёт способности на основе поступающих на вход векторов данных создавать внутреннюю хаотическую динамику с учётом текущего состояния среды обучения. Это ведёт к получению принципиально нового и неизвестного для агента опыта.

Выводы

В данной статье были разобраны системы смены полосы на основе алгоритмов DDPG с модификацией системы предсказания движения, основанной на архитектуре LSTM и модификацией системы предсказания движения, основанной на архитектуре ESN. Были проведены эксперименты, в результате которых были получены результаты, показывающие, что модификация алгоритма DDPG с ESN даёт качественно лучшие

результаты. Данное повышение эффективности связано с использованием резервуарных сетей, что ведёт к внесению дополнительной хаотической динамики в процессе обучения агента и даёт возможность получить агента с гибким и адаптивным поведением, действующего в условиях динамической и нелинейно изменяемой среды.

Литература

1. He. Y., Feng. J., Wei. K., Cao. J., Chen. S., Wan. Y. Modeling and simulation of lane-changing and collision avoiding autonomous vehicles on superhighways // *Phys. A Stat. Mech. Its Appl.* 2023, 609, 128328.
2. Jaeger, Herbert. Echo State Approach to Analysing and Training Recurrent Neural Networks-with an Erratum Note // *ResearchGate*, 6 Dec. 2001
3. J. Boedecker, O. Obst, J. T. Lizier, N. M. Mayer, M. Asada, Information processing in echo state networks at the edge of chaos // *Theory in Biosciences* 131 (3) (2012) 205–213.
4. Bertsekas D., *Reinforcement Learning and Optimal Control* // Athena Scientific: Nashua NH, USA, 2019.
5. Lillicrap T. P., Hunt J. J. Pritzel A., Continuous control with deep reinforcement learning // *arXiv preprint arXiv*, 1509.02971, 9 September 2015
6. Haarnoja T., Zhou A., Hartikainen K. Soft actor-critic algorithms and applications // *arXiv preprint arXiv*, 1812.05905, 13 December 2018.
7. S. Fujimoto, H. Hoof, D. Meger, Addressing function approximation error in actor-critic methods, in: *International conference on machine learning* // PMLR, 2018, pp. 1587–1596.

ВОЛНОВОЙ РЕЖИМ ВОЗМУЩЕНИЯ И МОРФОЛОГИЧЕСКИ УСТОЙЧИВЫЙ РОСТ ДЕНДРИТА В ПЕРЕОХЛАЖДЕННЫХ РАСПЛАВАХ НИКЕЛЯ И МЕДИ

И. А. Концевой

Учреждение образования «Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого», Гомель, Беларусь

246029, г. Гомель, пр. Октября, 48

Тел.: (+37529) 114-67-22, e-mail: ivankon@yandex.by

Изучено влияние переохлаждения расплава на кинетические параметры фронта высокоскоростной кристаллизации чистого металла. Расчеты выполнены для никеля и меди.

Ключевые слова: высокоскоростная кристаллизация, неустойчивость линии роста, кривизна фазовой границы, дендритный рост.

Введение. В настоящее время экспериментально достигнуты скорости роста 20–70 м/с в расплавах, переохлажденных до 300 К, [1]. Дендритный рост кристаллов при высокоскоростной кристаллизации глубоко переохлажденных расплавов чистого вещества является одним из объектов современных исследований. Прикладное значение этих исследований связано с технологиями получения материалов, обладающих высокими эксплуатационными свойствами. Вопрос о морфологической устойчивости линии роста дендрита рассматривался в [2, 3]. Цель данной работы: выполнить анализ кинетических свойств фазовой границы кристаллизации (ФГК) в чистых расплавах никеля и меди.

Теплоотвод от твердой фазы. Уравнение роста дендрита при глубоких переохлаждениях расплава получено в [4, 5] с учетом локально-неравновесных свойств теплопереноса. Анализ этого уравнения показывает, что объемный сток энергии $q_0 < 0$, который моделирует отвод тепла от кристалла, определяется следующей зависимостью:

$$|q_0| = \frac{L_1}{\gamma} + N_m \left(K_0 L_1 + \frac{c}{\gamma \mu} \right) + K_0 N_m^2 \frac{c}{\mu}, \quad (1)$$

$$L_1 = L_* + K_0 U_2, \quad L_* = L - c_* \Delta T, \quad U_1 = U/L, \quad U_2 = c T_c U_1.$$

Обозначения здесь такие же, как в [4, 5]. При проведении расчетов применяются полуэмпирические зависимости [6] для скорости роста $N_m = N_m(\Delta T)$ и кинетического коэффициента $\mu = \mu(\Delta T)$. Выполнен анализ возмущения ФГК вида [7]:

$$f(y, t) / H = \exp(-rt) \cos(ky),$$

где H – малая постоянная первого порядка малости; t – время; y – координата, поперечная направлению роста; r – параметр затухания; k – частота. Обнаружено, что режим аperiodической устойчивости наблюдается в интервале $r^{(1)} < r < r^{(2)}$, где левая и правая границы (подробная запись не приводится) зависят от физических параметров процесса [см. формулу (1)] и от величины переохлаждения ΔT . В соответствии с этим интервалом устойчивости получена верхняя граница значений кривизны K_f вершины

дендрита, при которых линия роста морфологически устойчива: не возникает складка, являющаяся предвестником боковой ветви.

Границы морфологически устойчивого роста. Расчеты выполнены для никеля ($\Delta T, K \in [166; 312]$) и для меди ($\Delta T, K \in [180; 230]$) при $K_0 = 10^7 \text{ м}^{-1}$. Числовые значения теплофизических параметров следующие:

- Никель, Ni: $T_c = 172 \text{ К}$, $L = 2,14 \cdot 10^9 \text{ Дж/м}^3$, $U = 0,38 \text{ Дж/м}^2$, $\gamma = 1,380410^{-7} \text{ с}$, $c = 5,62 \cdot 10^6 \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{К)}$, $\lambda = 69 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, $\mu = 9,53 \text{ м/(К} \cdot \text{с)}$, $T_* = 156 \text{ К}$, $N_b = 5,3 \text{ м/с}$;
- Медь, Cu: $T_c = 135 \text{ К}$, $L = 1,77 \cdot 10^9 \text{ Дж/м}^3$, $U = 0,26 \text{ Дж/м}^2$, $\gamma = 4,75510^{-8} \text{ с}$, $c = 4,17 \cdot 10^6 \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{К)}$, $\lambda = 317 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, $\mu = 10,06 \text{ м/(К} \cdot \text{с)}$, $T_* = 117 \text{ К}$, $N_b = 1 \text{ м/с}$.

Зависимости объемного стока энергии $|q_v|$ и верхней границы значений кривизны K_f вершины дендрита от переохлаждения ΔT даны на рис. 1 в размерных величинах.

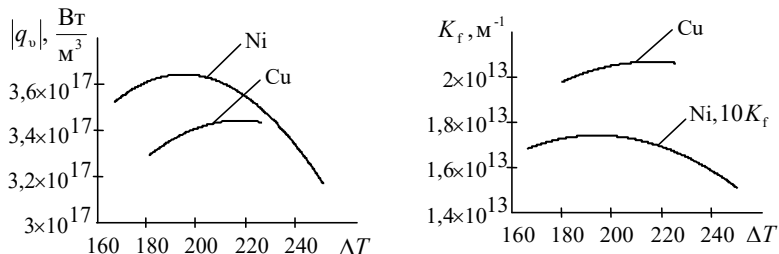


Рис. 1. Свойства теплоотвода $|q_v|$ и верхней границы значений кривизны K_f вершины дендрита

Полученные в результате расчетов числовые значения $K_f(\Delta T)$ говорят о том, что аperiодический режим (2) устойчив: верхняя граница K_f в данных условиях не достигается. На рис. 2 показан в безразмерном виде полупериод колебаний по координате y . Масштабы величин: $y_b = 10^{-6} \text{ м}$, $t_b = 10^{-7} \text{ с}$. Для обоих металлов

$$\frac{\partial(\pi/k)}{\partial r} < 0, \quad \frac{\partial(\pi/k)}{\partial(\Delta T)} > 0.$$

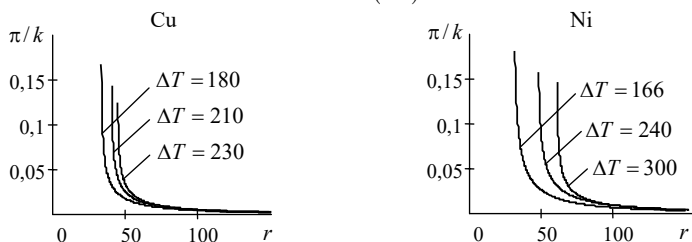


Рис. 2. Корреляция «параметр затухания по времени – параметр пространственной неоднородности возмущения»

Волновой режим возмущения. Незатухающая стоячая волна возмущения имеет вид

$$f(y,t)/H = \cos ky \sin mt, \quad t \geq 0, \quad y \in [0, y_1], \quad (2)$$

$$k^2 = \frac{\beta_1 \beta_2}{\beta_3 - \beta_0 \beta_2}, \quad m^2 = \frac{\beta_1 \beta_3}{\beta_3 - \beta_0 \beta_2}, \quad w_2 = m/k = (\beta_3 / \beta_2)^{1/2},$$

где m/k – скорость стоячей волны, перемещающейся со скоростью звука W_2 ; $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ – безразмерные коэффициенты, зависящие от переохлаждения расплава посредством функций $N_m = N_m(\Delta T)$, $\mu = \mu(\Delta T)$. Результаты расчета этого режима возмущения демонстрируют отчетливые различия между никелем и медью (рис. 3). Для меди имеем:

$$\frac{\partial(2\pi/m)}{\partial(\Delta T)} < 0, \quad \frac{\partial(m/k)}{\partial(\Delta T)} > 0.$$

Для никеля хорошо видна немонотонная, имеющая максимум зависимость скорости волны m/k от величины переохлаждения ΔT , см. рис. 3 б.

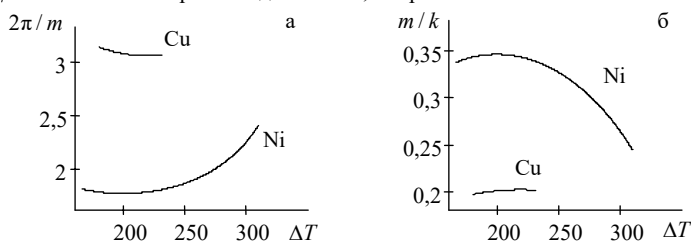


Рис. 3. Незатухающая стоячая волна возмущения:
а – период колебаний во времени; б – скорость волны.

Стоячая волна, затухающая с течением времени, определяется решением:

$$f(y,t)/H = \exp(-rt) \cos ky \sin mt, \quad (3)$$

$$k^2 = H_1/H_0, \quad m^2 = H_2/H_0, \quad H_0 = \beta_3 - \beta_0 \beta_2 + 2\beta_0 r,$$

$$H_1 = 9\beta_2 r^2 + \beta_1 \beta_2 - r(3\beta_1 + 9r^2 + 2\beta_2^2), \quad H_2 = \beta_1 \beta_3 + r[r(\beta_0 \beta_2 + 3\beta_3) - 2\beta_0 r^2 - 2\beta_2 \beta_3].$$

При $r = 0$ данное решение принимает вид (2). Эти выражения имеют физический смысл ($k^2 > 0$, $m^2 > 0$), соответствующий периодическому решению, в малой правой конечной окрестности $r = 0$. Для представленной на рис. 4–5 серии расчетов в безразмерных величинах $0 \leq r \leq 0,44$. Для никеля и меди периоды колебаний возмущения по координате y и по времени t ведут себя одинаково в качественном отношении:

$$\frac{\partial(2\pi/k)}{\partial(\Delta T)} > 0, \quad \frac{\partial(2\pi/m)}{\partial(\Delta T)} > 0.$$

Кроме того, по мере увеличения параметра затухания r оба эти периода колебаний монотонно растут, см. рис. 4–5. Так же, как в случае незатухающей волны (2), различия между никелем и медью наблюдаются в поведении скорости волны m/k при изменении ΔT : для никеля имеем $\partial(m/k)/\partial(\Delta T) < 0$, а для меди наоборот: $\partial(m/k)/\partial(\Delta T) > 0$ см. рис. 4 в, рис. 5 в.

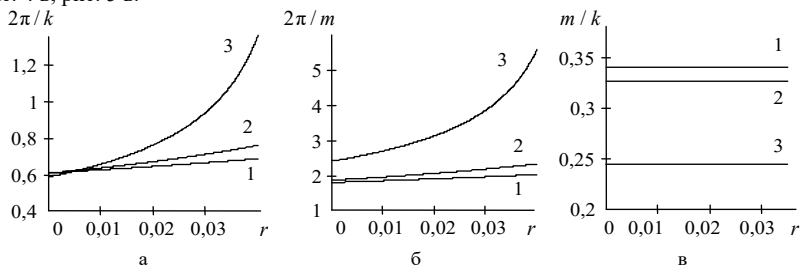


Рис. 4. Никель. Влияние параметра затухания на свойства стоячей волны возмущения

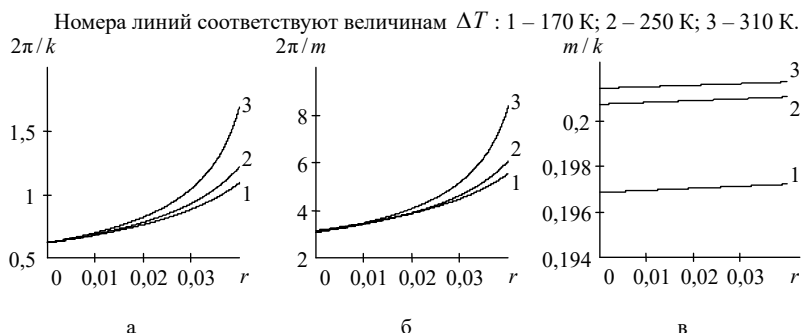


Рис. 5. Медь. Влияние параметра затухания на свойства стоячей волны возмущения. Номера линий соответствуют величинам ΔT : 1 – 180 К; 2 – 200 К; 3 – 230 К.

Заключение. Выполнен сопоставительный анализ свойств возмущенной фазовой границы кристаллизации никеля и меди при глубоких переохлаждениях расплава. Для никеля $\Delta T, \text{К} \in [166; 314]$, для меди $\Delta T, \text{К} \in [180; 230]$. Показано, что кинетические свойства фазовой границы высокоскоростной кристаллизации чистого расплава в значительной степени обусловлены локальной неравновесностью теплопереноса в твердой фазе. Получены свойства теплоотода $q_0(\Delta T)$ от твердой фазы и значения верхней границы кривизны K_f , обеспечивающей устойчивость аperiодического возмущения. Стоячая волна возмущения рассмотрена в незатухающем и затухающем режимах. Обнаружены важные в физическом отношении различия в поведении скорости стоячей волны для никеля и меди. Показано, что параметр затухания и величина переохлаждения оказывают значительное влияние на пространственно-временные свойства возмущенного состояния вершины дендрита.

Работа выполнена под научным руководством профессора О. Н. Шабловского.

Литература

1. Herlach D.M. Metastable Solids from Undercooled Melts / D. M. Herlach, P. Galenko, D. Holland-Moritz. – Oxford: Pergamon, 2007. – 448 p.
2. Шабловский О.Н. Тепловая градиентная катастрофа и рост двумерного свободного дендрита в переохлажденном расплаве / О. Н. Шабловский // Прикладная физика. – 2007. – №3. – С. 29–37.
3. Шабловский О.Н. Производство энтропии на фазовой границе кристаллизации / О. Н. Шабловский // Поверхность, синхротронные и нейтронные исследования. – 2010. – №12. – С. 81–87.
4. Шабловский О.Н. Кинетика роста вершины дендрита в глубоко переохлажденном расплаве. Часть 1. Уравнение фазовой границы кристаллизации / О. Н. Шабловский // Успехи прикладной физики. – 2013. – Т. 1, № 6. – С. 680–685.
5. Шабловский О.Н. Кинетика роста вершины дендрита в глубоко переохлажденном расплаве. Часть II. Аналитическая структура возмущений линии роста / О. Н. Шабловский // Успехи прикладной физики. – 2014. – Т. 2, № 1. – С. 12–17.
6. Шабловский О.Н. Динамика неустойчивости волновых возмущений и боковое ветвление дендрита в переохлажденном расплаве / О. Н. Шабловский, Д. Г. Кроль // Успехи прикладной физики. – 2022. – Т. 10, № 2. – С.189–202.
7. Шабловский О.Н. Кинетические свойства вершины дендрита в переохлажденном расплаве чистого металла / О.Н. Шабловский, И.А. Концевой // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П.О. Сухого: научно-практический журнал. – 2024. – № 1. – С. 5–14.

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И АВТОРСКОЕ ПРАВО: ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Г.В. Кошкина, Е.Е. Фомина, У.А. Иванова

ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»
170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22
Тел.: +7 (4822) 78-91-90

Активное развитие технологий искусственного интеллекта (ИИ), внедрение систем ИИ во все сферы деятельности человека привело к необходимости рассмотрения большого количества правовых вопросов, связанных с различными аспектами, среди которых можно выделить следующие: регулированием нового типа отношений, формирующихся в результате применения ИИ в различных областях деятельности (медицина, образование, экономика, наука и другие); формирование единой системы стандартов для оценки результатов применения ИИ-технологий в различных сферах; определение проблем и барьеров, которые могут затруднить внедрение систем ИИ в различные отрасли социальной сферы, экономики, промышленности; ведение реестров продукции с использованием ИИ; регулирование правовой ответственности в ситуациях, когда применение ИИ-системы нанесло вред или ущерб пользователю. Наряду с вышеперечисленными, важное место занимает правовой аспект, касающийся определения субъекта права интеллектуальной собственности, созданной с использованием технологии ИИ. В настоящее время ИИ уже создает произведения, которые могут быть объектами авторских прав. Однако вопрос об авторе произведений остается открытым и вызывает дискуссии по всему миру [1–3].

В Российской Федерации в настоящее время отсутствуют специальные нормативно-правовые акты, которые регулируют авторские права ИИ. Основные вопросы, касающиеся искусственного интеллекта изложены в Указе Президента РФ «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации» (вместе с «Национальной стратегией развития искусственного интеллекта на период до 2030 года») [4]. Согласно действующему Российскому законодательству искусственный интеллект не является субъектом авторских прав. Исходя из норм российского права, искусственный интеллект рассматривают только в качестве инструмента при создании объекта авторских прав. Однако тема, посвященная правовому регулированию вопросов регистрации объектов, созданных ИИ остается открытой, вызывает много дискуссий и пока невозможно говорить о выработке единой концепции.

Литература

1. Искусственный интеллект: современный подход : [перевод с английского] / Стюарт Рассел, Питер Норвиг. – 4-е изд. – Москва: Диалектика; Санкт-Петербург: Диалектика, 2021. с. 704.
2. Абрамова Е. Н., Старикова Е.В. Искусственный интеллект как субъект авторского права / Е.Н. Абрамова // Гипотеза. 2020 № 1 (10). С. 32–38.
3. Харитонов Ю. С., Савина В. С. Технология искусственного интеллекта и право: вызовы современности / Ю.С. Харитонов, В.С. Савина // Вестник Пермского университета. Юридические науки. 2020 Вып. 49 С. 524–549.
4. Указ Президента РФ от 10.10.2019 N 490 (ред. от 15.02.2024) О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации (вместе с Национальной стратегией развития искусственного интеллекта на период до 2030 года). [Электронный ресурс]. – режим доступа: <https://base.garant.ru/72838946/> (дата обращения: 10.11.2024).

ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ КИНКОВ В КОЛЬЦЕВЫХ ДНК

Л.А. Краснобаева*, Л.В. Якушевич**

*Сибирский государственный медицинский университет, Томск, Россия

634050, Московский тракт, 2, Тел.: (3822)901101, e-mail: kla1983@mail.ru

**Институт биофизики клетки Российской академии наук – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Пушкинский научный центр биологических исследований Российской академии наук», Московская обл., г. Пушкино, Россия

142290, Институтская ул. 3, Тел.: (466)7739252, e-mail: kind-@mail.ru

Нелинейные конформационные возмущения – кинки, представляющие собой локально расплетенные участки двойной спирали ДНК, играют важную роль для понимания механизмов регуляции генов [1], процессов транскрипции [2], репликации [3], денатурации ДНК [4].

В данной работе моделируется движение кинков в кольцевой ДНК – плазмиде рPF1 [5] с учетом эффектов диссипации и воздействия постоянного торсионного поля M_0 . Для этой цели была использована математическая модель Гриневича и соавторов [6], в рамках которой мы получили энергетические профили, определяющие особенности движения кинков в основной и комплементарной последовательностях плазмиды (рисунок 1).

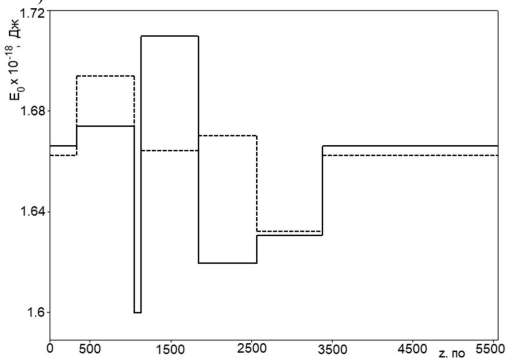


Рис. 1. Энергетические профили, определяющие особенности движения кинков в основной (сплошная линия) и комплементарной (штриховая линия) последовательностях плазмиды рPF1

Рассчитаны временные зависимости скорости кинков для начального положения кинка в центре 3-го участка и нулевой начальной скорости кинков, а также для двух значений торсионного момента $M_{0,1}M_0 = 2,50 \times 10^{-22}$ Дж $< M_{0,1,crit}$ и $|M_{0,2}M_0| = 6,50 \times 10^{-22}$ Дж $> |M_{0,2,crit}|$ (рисунок 2 а, б). Получены пороговые значения торсионного момента для основной последовательности: $M_{0,1,crit} = 4,95 \times 10^{-22}$ Дж, и для комплементарной последовательности: $|M_{0,2,crit}| = 4,20 \times 10^{-22}$ Дж.

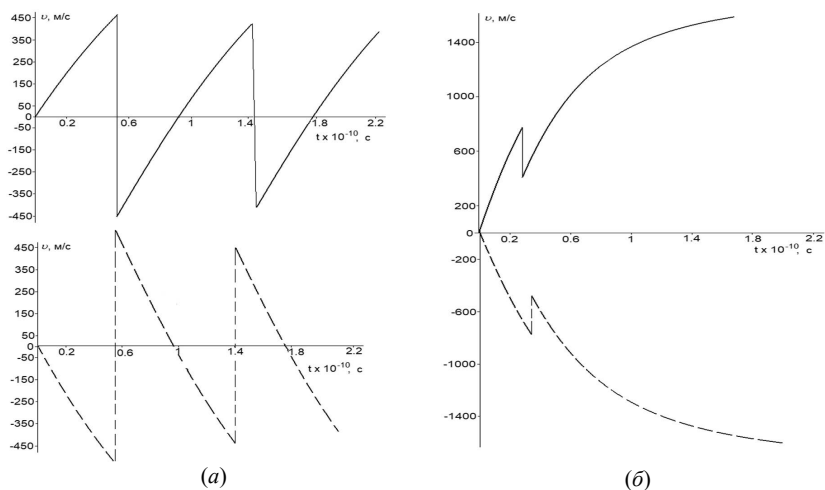


Рис. 2. Временная зависимость скорости кинков, движущихся в основной (сплошная линия) и комплементарной (штриховая линия) последовательностях плазмиды pPF1. Расчеты выполнены при: (а) $|M_{0,1}M_0| = 2,50 \times 10^{-22}$ Дж, (б) при $|M_{0,2}M_0| = 6,50 \times 10^{-22}$ Дж

Из полученных результатов видно, что поведение кинков определяется характером энергетических профилей, а также существенно зависит от величины торсионного момента: при достижении критического значения торсионного момента происходит переход от циклического движения кинка внутри области, расположенной между генами флуоресцентных белков Egfr и mCherry, к поступательному движению и выходу из этой области.

Литература

1. Dwiputra, D., Hidayat, W., Zen, F.P. Nonlinear dynamics of DNA bubble induced by site specific DNA-protein interaction // J. Phys.: Conf. Ser, v. 856, 2017, P. 012005–012009. DOI: 10.1088/1742-6596/856/1/011001
2. He, Y., Yan, C., Fang, J. et al. Near-atomic resolution visualization of human transcription promoter opening // Nature, v. 533, 2016, P. 359–365. DOI: 10.1038/nature17970
3. Bailey, L.J., Doherty, A.J. Mitochondrial DNA replication: a PrimPol perspective // Biochem Soc Trans, v. 45, 2017, P. 513–529. DOI: 10.1042/BST20160162
4. Singh, A.R., Granek, R. Manipulation of double-stranded DNA melting by force // Phys. Rev. E, v. 96, 2017, P. 032417–032422. DOI: 10.1103/PhysRevE.96.032417
5. Masulis, I.S., Babaeva, Z.Sh., Chernyshov, S.V. et al. Visualizing the activity of Escherichia coli divergent promoters and probing their dependence on superhelical density using dual-colour fluorescent reporter vector // Scientific Reports, v. 5, 2015, P. 11449. <https://doi.org/10.1038/srep11449>
6. Grinevich, A.A., Masulis, I.S., Yakushevich, L.V. Mathematical Modeling of Transcription Bubble Behavior in the pPF1 Plasmid and its Modified Versions: The Link between the Plasmid Energy Profile and the Direction of Transcription // Biophysics, v.66, 2021, P. 209–217. DOI: [10.1134/S000635092102007X](https://doi.org/10.1134/S000635092102007X)

ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИОННЫХ РЕСУРСОВ ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ДАННЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛОЕМОЙ ПРОДУКЦИИ

Н.М. Кузнецова^{1а}, Карлова^{1б..2} Т.В., Бекмешов^{1с..2} А.Ю., Шептунов^{1д}, ²А.С.,
Тихомиров^{2а} А.Э.

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва, Россия
127055, Вадковский пер., д. 3а

^аТел.: +7 (903)581-80-15, e-mail: knm87@mail.ru

^бТел.: +7 (903)776-90-78, e-mail: karlova-t@yandex.ru

^сТел.: +7 (926)582-34-35, e-mail: b-a-y-555@yandex.ru

^дТел.: +7 (903)166-83-56, e-mail: 1668356@gmail.com

²Федеральное государственное автономное учреждение науки Институт конструкторско-технологической информатики Российской академии наук, г. Москва, Россия
127055, Вадковский пер., 18, стр. 1А

^аТел.: +7 (962)959-99-96, e-mail: alexey.tikhomirov@list.ru

Ключевые слова: автоматизация, информационная безопасность, моделирование, защита данных, интеллектуальные данные.

Стратегически важными ресурсами современных промышленных предприятий являются интеллектуальные ресурсы. Владение данным типом ресурсов повышает качество производимой продукции, минимизирует убытки, и как следствие, обеспечивает конкурентоспособность предприятия. Кроме того, владение интеллектуальными данными стимулирует трудовые ресурсы предприятия к творчеству и генерации новых идей. В связи с этим, актуальной задачей является обеспечение должного уровня безопасности интеллектуальных данных.

Формирование модели системы по организации безопасности ресурсов предприятия укрупненно включает три уровня управления защитой информации:

- защита проектной документации разработок на всех этапах жизненного цикла изделия, включая программное и математическое обеспечение;
- защита от влияния технологий манипулирования информацией в отношении высокопрофессионального кадрового ресурса;
- защита материализованных объектов наукоемких изделий (на уровне исследований и испытаний).

При этом важным аспектом является сохранение должного уровня доступности интеллектуальных ресурсов для легальных пользователей – работников предприятия [1-5].

На рисунке 1 представлена схема безопасности интеллектуальных ресурсов предприятия – модель системы управления обеспечением безопасности интеллектуальных ресурсов, основанная на методах защиты от несанкционированного доступа (модель 1).



Рис. 1. Схема безопасности интеллектуальных ресурсов предприятия (модель 1)

Представленная на рисунке 1 модель системы управления обеспечением безопасности интеллектуальных ресурсов (модель 1) является наиболее эффективной с точки зрения защиты данных, однако одновременно является наименее удобной с точки зрения их модернизации.

Интеллектуальные данные являются наиболее модифицируемыми данными – технологии постоянно совершенствуются и сменяют друг друга. В связи с этим, в модели системы управления обеспечением безопасности должен присутствовать механизм обновления данных.

Механизм обновления интеллектуальных данных должен обеспечивать:

- проверку новых данных;
- поддержание целостности структуры данных при условии добавления новых или модификации существующих.

На рисунке 2 представлена модель системы управления обеспечением безопасности интеллектуальных ресурсов, учитывающая максимальное количество аспектов защиты.



Рис. 2. Схема безопасности интеллектуальных ресурсов, учитывающая максимальное количество аспектов защиты (модель 2)

Применение представленных в работе моделей системы управления обеспечением безопасности интеллектуальных данных позволит повысить уровень их защиты, и как следствие, повысить конкурентоспособность предприятия.

Литература

1. Kuznetsova N.M., Karlova T.V., Bekmeshov A.Yu., Mihailova M.V. Automation of the Collection, Storage and Processing the Information Related to the Developments of High-Tech Industrial Products of High-Risk // The modelling of nonlinear processes and systems // The 6 International Science Conference (MNPS-2022). Conference proceedings / Под редакцией Л.А. Уваровой
2. N.M. Kuznetsova, T.V. Karlova, S.A. Sheptunov Automation of Data Defence Processes in the Corporation Information Systems / Proceedings of the 2017 International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies» (IT&QM&IS) September, 24-30, 2017 – Proceedings Edited by S. Shaposhnikov 2017 St. Peterburg, Russia: Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», pp. 199-202. ISBN 978-1-5386-0703-9.
3. Nataliya M. Kuznetsova, Tatiana V. Karlova, Alexander Y. Bekmeshov Method of Timely Prevention from Advanced Persistent Threats on the Enterprise Automated Systems // 2022 International Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS)
4. Tatyana V. Karlova, Alexander Y. Bekmeshov, Natalia M. Kuznetsova. Protection the Data Banks in State Critical Information Infrastructure Organizations / Proceedings of the 2019 IEEE International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies» (IT&QM&IS), Sochi, Russia // Proceedings Edited by S. Shaposhnikov, St. Petersburg, Russia: Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», 2019, ISBN 9781728125947
5. T.V. Karlova, A.Y. Bekmeshov, S.A. Sheptunov, N.M. Kuznetsova Methods Dedicated to Fight Against Complex Information Security Threats on Automated Factories Systems / 2016 IEEE Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&MQ&IS). – M.: «Quality», 2016. pp. 23-27. ISBN 978-5-94768-071-3

ДИСТАНЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ АДДИТИВНЫМИ СИСТЕМАМИ

Кулизаде¹ Д. И., Скрипоченко² В. С., Медов³ Р. О.

ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, Россия

127055, Вадковский пер., 3а

¹Телефон: +79772658381, e-mail: d.kulizade@stankin.ru

²АО «НИИ НПО «ЛУЧ»

Телефон: +79101677197, e-mail: vadim.skripochenko@yandex.ru

³Телефон: +79250337529, e-mail: r.medov@stankin.ru

Аннотация: В статье рассматриваются вопросы дистанционного управления аддитивными системами, в частности управления 3D-печатью. Данные процессы становятся все более и более распространенными в различных отраслях промышленности. Однако, сопутствующие производственные риски и опасности, такие как выбросы вредных веществ, возгорания легко воспламеняемых материалов, исключение инцидентов с персоналом, требуют серьезного внимания. Предложен метод дистанционного управления, главной целью которого является повышение безопасности при использовании аддитивного формообразования.

Ключевые слова: аддитивные системы, 3D-печать, дистанционное управление, аддитивное формообразование, производственная безопасность.

В современном мире технологии 3D-печати становятся все более популярными и находят широкое применение в таких областях, как машиностроение, авиастроение, космическая отрасль, медицина, производство, дизайн и многие другие [1].

Использование аддитивных систем в производственных процессах произвело революцию в промышленности, кардинально изменив подходы к производству. 3D-принтеры открывают уникальные возможности для быстрого и точного прототипирования, создания объемных объектов и сложных механизмов. Цифровые аддитивные технологии способны трансформировать свойства распространённых материалов, позволяя изготавливать изделия сложной формы или ажурной структуры с совершенно новыми характеристиками. Например, металлический шар из титанового сплава может обладать упругостью, демонстрируя принципиально иные свойства [2].

Ряд применяемых фотополимерных смол и пластика являются продуктом нефтепереработки. Излишнее и неправильное использование оказывает негативное влияние как на окружающую среду, так и на организм человека. Например, фотополимер может застыть и от продолжительного воздействия естественного освещения. При печати же пластиком он нагревается до 215°C, таким образом в воздушную среду попадают различные химические элементы. Оказываемое негативное воздействие может проявляться в головокружениях, головных болях, проблемами с дыханием, а при длительном воздействии осуществляется накопительный эффект, что может привести к раковым опухолям дыхательных путей организма человека.

Для обеспечения производственной безопасности предлагается использовать модуль отечественной разработки дистанционного управления Iskra Mega. Это программируемый контроллер, основанный на 8-битном микроконтроллере семейства AVR – ATmega2560. Частота работа контроллера 16 МГц и 256 КБ Flash-памяти для

прошивки, 8 КБ SRAM-памяти для глобальных переменных и 4 КБ EEPROM-памяти для хранения параметров. Оснащен четырьмя аппаратными интерфейсами UART, что позволяет подключать до четырех модулей с Serial-интерфейсом, таких как GPRS Shield, Тройка Wi-Fi, GPS-модуль или Bluetooth, без использования дополнительных переходников [3].

На основании вышеперечисленного создана программа для дистанционного управления аддитивными системами с задействованием беспроводной технологии (Wi-Fi). В качестве объекта исследования рассмотрен 3D-принтер, созданный на базе Arduino UNO.

Литература

1. Каменев, С.В. Технологии аддитивного производства: учебное пособие / С.В. Каменев, К.С. Романенко. – Оренбург: Оренбургский государственный университет, ЭБС АСВ, 2017. – 145 с. – ISBN 978-5-7410-1696-1. – Текст: электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART: [сайт]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/71339.html> (дата обращения: 02.12.2024).
2. Тарасова, Т.В. Аддитивное производство: учебное пособие / Т.В. Тарасова. – 1. – Москва: ООО "Научно-издательский центр ИНФРА-М", 2021. – 196 с. – ISBN 978-5-16-014676-81.
3. Iskra Mega: подключение, настройка, распиновка и схемы [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://wiki.amperka.ru/продукты:iskra-mega> (дата обращения: 02.12.2023).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА В СИСТЕМЕ НАНОТРУБОК

А.В. Куница, Л.А. Уварова, А.С. Мягков

MODELING OF THE HEAT AND MASS TRANSFER PROCESS IN NANOTUBE SYSTEMS

A.V. Kunitsina, L.A. Uvarova, A.S. Myagkov

МГТУ «СТАНКИН», Москва, Россия

Ввиду широкого распространения фуллеренов, нанотрубок, наночастиц в различных технологиях стали использоваться неоднородные структуры, в частности с жидкими наполнителями полостей. В таких случаях представляется актуальным исследование процессов тепло- и массопереноса в таких структурах. При получении нанотрубок обычно появляются системы из нескольких связанных нанотрубок. В настоящей работе рассматривается тепломассоперенос и деформация двух взаимодействующих нанотрубок. Решение проводится в бицилиндрической системе координат, что представляется естественным для такой системы. Взаимосвязь между напряжением и деформацией моделируется с помощью уравнения Аифантиса [1, 2]:

$$\sigma = \lambda(\text{tr } \varepsilon) \mathbf{I} + 2G\varepsilon - c\nabla^2 [\lambda(\text{tr } \varepsilon) \mathbf{I} + 2G\varepsilon].$$

Здесь σ, ε тензоры деформации и напряжения,

$$\lambda = \frac{E\eta}{(1+\eta)(1-2\eta)}, \quad G = \frac{E}{2(1+\eta)},$$

где E – модуль Юнга, η – коэффициент Пуассона. Обобщенная сила выражается через механическое напряжение и градиент давления. Температура, от которой зависит давление, определяется с помощью решения уравнения теплопроводности в бицилиндрической системе координат с неоднородной правой частью, обусловленной внешним источником. Изменение концентрации также определяется в бицилиндрической системе координат. Решение проводится численно-аналитическим методом. При проведении расчётов используется разностная схема. После определения величины деформации на первом этапе методом итераций проводится уточнение величин температуры, концентрации, давления, а затем проводится уточнение величины деформации.

Проведённые расчёты показали, что имеет место некоторый вклад в деформацию, обусловленный тепломассопереносом и обратное влияние небольшой деформации нанотрубок на распределения температуры и концентрации в нанотрубках и в их окрестности.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (госзадание, проект № FSFS- 20240007).

Литература

1. E.C. Aifantic, International Journal of Fracture, 95, 299–314, 1999.
2. E.C. Aifantis, International Journal of Engineering Science, 49, 1367–1377, 2011.

ВЫВОД УРАВНЕНИЯ «ФУНКЦИЯ ТОКА И ВИХРЬ» ДЛЯ СТЕПЕННОЙ ЖИДКОСТИ ПРИ МАЛЫХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА

DERIVATION OF THE EQUATION "CURRENT FUNCTION AND VORTEX" FOR STEPPE FLUID AT SMALL REYNOLDS NUMBERS

Т.А. Ла, Т.А Ла

МГТУ «СТАНКИН», Москва, Россия

127055, Вадковский переулок, 3а

Тел.: (+7 996) 717-21-74, e-mail: latuananh0407@gmail.com

Динамика степной жидкости представляет собой важную область исследований в гидродинамике, особенно в тех случаях, когда число Рейнольдса мало, а вязкость играет решающую роль. Системы с малым числом Рейнольдса часто встречаются в природных процессах и инженерных приложениях, где требуется учитывать высокую степень диссипации энергии. Задача вывода уравнений, описывающих взаимодействие между функцией тока и вихрем, становится ключевой для точного моделирования таких явлений. Уравнения Навье-Стокса в рамках данной работы рассматриваются с учетом упрощений, связанных с низким числом Рейнольдса. Это позволяет получить аналитические решения и определить основные зависимости, которые описывают структуру течения и распределение вихрей в жидкости.

В данной работе рассматривается теоретический вывод уравнения «функция тока и вихрь» для степенной жидкости при малых числах Рейнольдса. Исследование показывает, как математическое моделирование и аналитический подход к решению уравнений Навье-Стокса позволяет эффективно описывать поведение таких жидкостей. В результате проведенного анализа получены важные формулы и зависимости, которые могут быть применимы для предсказания и управления поведением степной жидкости в различных инженерных и природных системах.

Обобщенные уравнения Навье-Стокса для случая течения жидкости степенным реологическом законом:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} &= F_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{k}{\rho} \left[A \Delta v_x + 2 \frac{\partial v_x}{\partial x} \frac{\partial A}{\partial x} + \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) \frac{\partial A}{\partial y} + \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) \frac{\partial A}{\partial z} \right] \\ \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} &= F_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{k}{\rho} \left[A \Delta v_y + 2 \frac{\partial v_y}{\partial y} \frac{\partial A}{\partial y} + \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \frac{\partial A}{\partial x} + \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) \frac{\partial A}{\partial z} \right] \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} &= F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{k}{\rho} \left[A \Delta v_z + 2 \frac{\partial v_z}{\partial z} \frac{\partial A}{\partial z} + \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \frac{\partial A}{\partial x} + \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) \frac{\partial A}{\partial y} \right] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где Δv_x – Лапласиан, равный $\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2}$

$$A = \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \right)^2 \right\}^{\frac{n-1}{2}} \quad (2)$$

Введем безразмерные координаты и скорость:

$$v_x = V v_{x_0}, \quad p = P p_0, \quad x = L x_0, \quad t = T t_0$$

Делая подстановку, легко получить для левой части уравнения (1) для x

$$\frac{V}{T} \frac{\partial v_{x_0}}{\partial t_0} + \left(\frac{V}{L}\right)^2 \left(v_{x_0} \frac{\partial v_{x_0}}{\partial x_0} + v_{y_0} \frac{\partial v_{x_0}}{\partial y_0} + v_{z_0} \frac{\partial v_{x_0}}{\partial z_0} \right). \quad (3)$$

В правую часть входит A . Поскольку во второй инвариант входит квадраты части производных

$$\left(\frac{\partial v_x}{\partial x}\right)^2 = \left(\frac{V}{L}\right)^2 \left(\frac{\partial v_{x_0}}{\partial x_0}\right)^2 \Rightarrow A = \left(\frac{V}{L}\right)^{n-1} A_0.$$

Производные от A запишутся

$$\frac{\partial A}{\partial x} = \frac{V}{L} \left(\frac{\partial v_{x_0}}{\partial x_0}\right)^{n-1} \frac{\partial A_0}{\partial x_0}.$$

Лапласиан Δv_x равен:

$$\Delta v_x = \frac{V}{L^2} \frac{\partial v_{x_0}}{\partial x_0}.$$

Поставим эти в уравнение (1) для x , и получим после некоторых преобразований:

$$\begin{aligned} \frac{V}{T} \frac{\partial v_{x_0}}{\partial t_0} + \left(\frac{V}{L}\right)^2 \left(v_{x_0} \frac{\partial v_{x_0}}{\partial x_0} + v_{y_0} \frac{\partial v_{x_0}}{\partial y_0} + v_{z_0} \frac{\partial v_{x_0}}{\partial z_0} \right) = \\ = g \cos(g, x) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial x_0} + \frac{k}{\rho} \frac{V}{L^2} \left(\frac{V}{L}\right)^{n-1} \left[A_0 \Delta v_{x_0} + 2 \frac{\partial v_{x_0}}{\partial x_0} \frac{\partial A_0}{\partial x_0} + \right. \\ \left. + \left(\frac{\partial v_{y_0}}{\partial x_0} + \frac{\partial v_{x_0}}{\partial y_0} \right) \frac{\partial A_0}{\partial y_0} + \left(\frac{\partial v_{z_0}}{\partial x_0} + \frac{\partial v_{x_0}}{\partial z_0} \right) \frac{\partial A_0}{\partial z_0} \right] \end{aligned}$$

Давайте разделим все члены этого уравнения на множитель, соответствующий безразмерному конвективному ускорению $\frac{V^2}{L}$. После этого преобразования уравнение примет вид, учитывающий множитель перед фигурной скобкой в правой части

$$\begin{aligned} \frac{L}{VT} \frac{\partial v_{x_0}}{\partial t_0} + v_{x_0} \frac{\partial v_{x_0}}{\partial x_0} + v_{y_0} \frac{\partial v_{x_0}}{\partial y_0} + v_{z_0} \frac{\partial v_{x_0}}{\partial z_0} = \\ = \frac{Lg}{V^2} g \cos(g, x) - \frac{P}{\rho V^2} \frac{\partial p_0}{\partial x_0} + \frac{k/\rho}{V^{2-n} L^n} \left(\frac{V}{L}\right)^{n-1} \left[A_0 \Delta v_{x_0} + 2 \frac{\partial v_{x_0}}{\partial x_0} \frac{\partial A_0}{\partial x_0} + \right. \\ \left. + \left(\frac{\partial v_{y_0}}{\partial x_0} + \frac{\partial v_{x_0}}{\partial y_0} \right) \frac{\partial A_0}{\partial y_0} + \left(\frac{\partial v_{z_0}}{\partial x_0} + \frac{\partial v_{x_0}}{\partial z_0} \right) \frac{\partial A_0}{\partial z_0} \right] \end{aligned}$$

Рассмотрим движение степенной жидкости Давайте проанализируем стационарный режим течения в условиях отсутствия массовых сил. Для этого рассмотрим уравнение движения в безразмерной форме в декартовой системе координат, проецированное на ось Ox .

$$v_{x_0} \frac{\partial v_{x_0}}{\partial x_0} + v_{y_0} \frac{\partial v_{x_0}}{\partial y_0} = -\frac{\partial p_0}{\partial x_0} + \frac{1}{\text{Re}} \left[A_0 \Delta v_{x_0} + 2 \frac{\partial v_{x_0}}{\partial x_0} \frac{\partial A_0}{\partial x_0} + \left(\frac{\partial v_{y_0}}{\partial x_0} + \frac{\partial v_{x_0}}{\partial y_0} \right) \frac{\partial A_0}{\partial y_0} \right] \quad (5)$$

где Re – обобщенное число Рейнольдса степенных жидкостей.

$$Re = \frac{V^{2-n} L^n}{k/\rho}$$

Конечно, другое уравнение Навье-Стокса в проекции на ось y может быть рассмотрено аналогичным образом.

$$v_{x_0} \frac{\partial v_{y_0}}{\partial x_0} + v_{y_0} \frac{\partial v_{y_0}}{\partial y_0} = -\frac{\partial p_0}{\partial y_0} + \frac{1}{Re} \left[A_0 \Delta v_{y_0} + 2 \frac{\partial v_{y_0}}{\partial y_0} \frac{\partial A_0}{\partial y_0} + \left(\frac{\partial v_{y_0}}{\partial x_0} + \frac{\partial v_{x_0}}{\partial y_0} \right) \frac{\partial A_0}{\partial x_0} \right] \quad (6)$$

Добавим сюда уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

Система уравнений (5)–(7) описывает движение жидкости в безразмерном виде.

Рассмотрим плоскую задачу, неньютоновская жидкость степенным реологическим законом протекает со скоростью V две соприкасающиеся покоящиеся сферы в размере $L \times D$ (L – длина, D – ширина). Предположим, что шарики находятся далеко от стены и не влияют на их движение.

Уравнение Навье-Стокса в безразмерном виде:

$$v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re} \left[A \Delta v_x + 2 \frac{\partial v_x}{\partial x} \frac{\partial A}{\partial x} + \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \frac{\partial A}{\partial y} \right] \quad (8)$$

$$v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re} \left[A \Delta v_y + 2 \frac{\partial v_y}{\partial y} \frac{\partial A}{\partial y} + \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \frac{\partial A}{\partial x} \right] \quad (9)$$

С помощью этого уравнения следует добавим уравнение неразрывности

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0 \quad (10)$$

Поскольку течение плоское, можно ввести функцию тока $\psi(x, y)$ и вихрь ω , такие что:

$$v_x = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad v_y = -\frac{\partial \psi}{\partial x}, \quad \omega = \frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y}$$

Продифференцировав уравнение (8) по y , а (9) по x , вычтем одно из другого:

$$\begin{cases} v_x \frac{\partial \omega}{\partial x} + v_y \frac{\partial \omega}{\partial y} = \frac{1}{Re} (A \Delta \omega + B) \\ \omega = -\Delta \psi \\ v_x = \frac{\partial \psi}{\partial y}, v_y = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \end{cases}$$

где $Re = \frac{V^{2-n} D^n}{k/\rho}$,

$$A = \left[2 \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v_y}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right)^2 \right]^{\frac{n-1}{2}},$$

$$B = 2 \frac{\partial A}{\partial x} \frac{\partial \omega}{\partial x} + 2 \frac{\partial A}{\partial y} \frac{\partial \omega}{\partial y} + 2 \frac{\partial^2 A}{\partial x \partial y} \left(\frac{\partial v_y}{\partial y} - \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} \right)$$

$$\overline{\text{Re}} = \frac{U_\infty L}{\eta / \rho} - \text{где } \eta - \text{динамическая вязкость}$$

Если $k = \eta$ то $\text{Re} = \overline{\text{Re}} * d$ где $d = U_\infty^{1-n} L^{n-1}$ – это размерная величина, т.е. $k \neq \eta$.

$$\text{Тогда } \text{Re} = \overline{\text{Re}} * \frac{\eta}{k} U_\infty^{1-n} L^{n-1}$$

$$\left[\frac{\eta}{k} U_\infty^{1-n} L^{n-1} \right] = \frac{\kappa \varepsilon}{M} \frac{M^{1-n}}{c^{2-n}} M^{n-1} \frac{1}{k} = 1$$

$$[k] = \frac{\kappa \varepsilon * c^{2-n}}{M}, \quad d = \frac{\eta}{k} U_\infty^{1-n} L^{n-1}$$

Если $\text{Re} \ll 1$, то рассматриваем только правую часть

$$A \Delta \omega + B = 0$$

Рассмотрим и незначительно отличать от 1. Предполагается, что $n=1+\varepsilon$, где ε много меньше 1.

$$A = 1 - \frac{\varepsilon}{2} + 0.5\varepsilon \left[4 \left(\frac{\partial^2 \psi_n}{\partial x \partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 \psi_n}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 \psi_n}{\partial x^2} \right)^2 \right]$$

где ψ_n – функция тока для ньютоновской жидкости ($n=1$) и равна

$$\psi_n = \psi + C_{01} + C_{02} \tau - \frac{D}{U_\infty (1-\chi)^{\frac{3}{2}}},$$

$$\psi = \sum_{m=1}^{\infty} \left[C_{1m} e^{\alpha_m \tau} + C_{2m} e^{-\alpha_m \tau} + \frac{D(2m+1)m}{2U_\infty \left(2m^2 - \frac{1}{2} \right)^2} \left(\sum_{h=0}^{2m-2} S_{mh} \right) \right] P_m(\chi) \times \left(G_m e^{\left(\frac{m+1}{2} \right) \tau} + H_m e^{-\left(\frac{m+1}{2} \right) \tau} \right),$$

где $h \leq 2m-2$, h – четные, $\alpha_m = \frac{\sqrt{6m^2 + 4m + 1}}{2m-1}$, $\chi = \cos \sigma$, $P_m(\cos \sigma)$ – полиномы Лежандра [1].

Величина α – малый параметр, поэтому можно уравнение линеаризовать. В результате получим уравнение.

$$\Delta \omega = -0.5\varepsilon \left[\left(\frac{\partial^2 \psi_n}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi_n}{\partial x^2} \right) (1 - A_n) + 2 \frac{\partial A_n}{\partial x} \left(\frac{\partial^3 \psi_n}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 \psi_n}{\partial x \partial y^2} \right) + \right. \\ \left. + 2 \frac{\partial A_n}{\partial y} \left(\frac{\partial^3 \psi_n}{\partial y^3} + \frac{\partial^3 \psi_n}{\partial x^2 \partial y} \right) + 4 \frac{\partial^2 A_n}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 \psi_n}{\partial x \partial y} + \left(\frac{\partial^2 \psi_n}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \psi_n}{\partial y^2} \right) \left(\frac{\partial^2 A_n}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 A_n}{\partial y^2} \right) \right]$$

$$\text{где } A_n = 4 \left(\frac{\partial^2 \psi_n}{\partial x \partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 \psi_n}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 \psi_n}{\partial x^2} \right)^2.$$

Таким образом, мы получим уравнение для параметра «функция тока-вихрь» при малом числе Рейнольдса. Решение данного уравнения будет представлять на дальнейшей работе.

Литература

1. Иванов Д.А. Моделирование движения газа в переменных Лагранжа с использованием метода Четверушкина. ВКР, 2023. 66 с.
2. Шульман З.П. Конвективный теплоперенос реологически сложных жидкостей. М.: Энергия, 1975. 352 с.
3. Шульман З.П., Берковский Б.М. Пограничный слой неньютоновских жидкостей. Минск: Наука и техника, 1966. 283 с.
4. Селиванов Н. В., Кузьмин С. И. Численное моделирование вынужденного течения в пограничном слое и теплообмена неньютоновской жидкости с учетом зависимости вязкости от температуры. Теплофизика высоких температур, 2009, том 47, № 6, с. 921–926.
5. Кожанов В.С., Попова Е.В. Моделирование нестационарного пограничного слоя на плоской полубесконечной пластине в начальной стадии ее движения в неньютоновской жидкости. Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. 2019. №2.
6. Уилкинсон У.Л. Неньютоновская жидкость: гидродинамика, перемешивание и теплообмен [Текст] / У.Л. Уилкинсон. – М.:Мир, 1964. 216 с. УДК 519.6:681.3:621.9:004.9.

О ПРОБЛЕМАХ ВНЕДРЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ОБРАЗОВАНИИ

Л.И. Лапушкина

МГТУ «СТАНКИН», Москва, Россия

Искусственный интеллект – это машины которые ведут себя так, словно обладают интеллектом, что позволяет системе искусственного интеллекта имитировать работу человеческого разума, одной из сильнейших сторон которого является приспособляемость к различным условиям среды и смена поведения в зависимости от возникающих обстоятельств.

Благодаря большим данным искусственный интеллект получает сегодня бурное развитие в сфере образования: становится реальным интеллектуальный анализ образовательных данных (Educational Data Mining), а также основанная на нем предсказательная и убедительная аналитика, персонализированное обучение и адаптивная образовательная среда.

На прошедшей конференции по искусственному интеллекту в образовании были отмечены как положительные и отрицательные его стороны.

К положительным моментам отнесли:

- а) удобный сбор обратной связи;
- б) персонализацию;
- в) легкий доступ к полезным данным;
- г) автоматизация рутинных процессов;
- д) генерация контента;
- е) быстро вовлечение учащегося.

В то время как адаптивное обучение и индивидуализированный подход могут помочь студентам находиться на своем индивидуальном пути обучения, ошибка в программировании ИИ может привести к искажению результатов и, в конечном итоге, неверной оценки знаний студентов. Оценки могут стать более объективными при использовании ИИ, однако это может привести к утрате личности и социального взаимодействия в образовательной среде.

Каждый аспект имеет свои преимущества и недостатки, и для достижения наилучшего результата необходимо балансировать между использованием ИИ и традиционными методами обучения.

В таблице проведен сравнительный анализ различных аспектов внедрения в образование ИИ с традиционным подходом.

Проанализировав основные риски и проблемы широкого внедрения ИИ в образование, можно сделать вывод, что, несмотря на множество преимуществ, внедрение ИИ в образование также связано с рисками и проблемами. Такими рисками являются:

- потеря рабочих мест. Одним из главных рисков внедрения ИИ в образование является потеря рабочих мест. Автоматизация процессов приведет к сокращению рабочих мест в секторе образования;
- недостаток прозрачности и ответственности;
- искажения в данных. Это происходит, если данные, на которых работает ИИ, содержат ошибки или они не сбалансированы;
- необходимость обучения новым навыкам преподавателей и студентов;
- защита данных, обусловленное внедрением ИИ в образование вследствие доступности огромного количества данных;
- критическое уменьшение влияния человеческого фактора.

Таблица 1. Аспекты внедрения ИИ в образовательный процесс

Аспекты	Традиционное образование	Образование с использованием ИИ
Индивидуализация	Ограничена возможностью преподавателя учитывать потребности каждого студента	Использование ИИ для адаптивного обучения, учитывающего индивидуальные потребности и уровень знаний каждого студента
Знания на заказ	Нет возможности получить дополнительную помощь вне семинара	Использование ИИ для обнаружения пробелов в знаниях студентов и предоставление индивидуальных материалов
Оценка успеваемости	Оценки могут быть субъективными и неотражающими реальный уровень знаний студента	Использование ИИ может привести к потере личности и индивидуальности в обучении
Потеря личности	Преподаватель должен быть лидером и наставником, но ИИ может заменить его	Использование ИИ может привести к потере личности и индивидуальности в обучении
Недостаток социального взаимодействия	Студенты могут терять возможность взаимодействовать со своими сверстниками	Использование ИИ может привести к отсутствию социального взаимодействия между студентами
Ошибка программирования	Ошибки могут привести к неправильной оценке знаний студентов	Ошибки в программировании ИИ могут привести к неправильной оценке знаний студентов и повлиять на их обучение

Таким образом, можно сделать вывод, что взаимодействие с ИИ – системами не может заменить полноценного общения с преподавателями и другими студентами.

Литература

1. Загорулько Ю.А.: Искусственный интеллект: Издательство Юрайт, 2022.
2. Богдановская И.М. Информационные технологии в педагогике и психологии. Учебник для вузов: Издательство Питер, 2018.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОСТИ МОДУЛЬНОГО ТИПА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ КУЛЬТУРЫ ОПУХОЛЕВЫХ КЛЕТОК IN-VITRO

Н.Т. Левашова^{1,a}, Е.А. Генералов^{1,b}, А.Э. Сидорова^{1,c}, А.Н. Гольцов^{2,d}

¹Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия,

119991, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, с. 2,

Тел. (+7 495) 939-10-33, e-mail: ^alevashovant@my.msu.ru, ^bgeneralovea@my.msu.ru,
^csky314bone@mail.ru,

²Институт искусственного интеллекта, кафедра Биокрибернетических систем и технологий, Российский Технологический Университет (МИРЭА), Москва, Россия,

119454, пр-т Вернадского, д. 78,

Тел. (+7 499) 600-80-80, e-mail: ^dalexey.goltsov@gmail.com

Моделирование роста опухолевого узла представляет собой важную задачу как с точки зрения изучения механизмов опухолевого роста, так и с точки зрения поиска *insilico* моделей для тестирования перспективных противоопухолевых препаратов. В данной работе авторами предложена математическая модель с системой нелинейных уравнений модульного типа для описания роста опухолевого узла *in-vitro*.

В основе модели лежат параболические уравнения с нелинейностями модульного типа, а именно задачи вида

$$\frac{\partial u}{\partial t} - D \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \begin{cases} f^{(-)}(u, x), & u \leq u_{thr}, \\ f^{(+)}(u, x), & u > u_{thr}, \end{cases} \quad f^{(-)}(u_{thr}, x) \neq f^{(+)}(u_{thr}, x),$$

где u – искомая величина, D – коэффициент диффузии, u_{thr} – пороговое значение искомой величины, при котором происходит фазовый переход.

При определённых условиях (А.И. Вольперт, В.А. Вольперт, 2002, Нефёдов и др., 2022) в системах уравнений такого типа возникают решения вида движущихся фронтов. Это свойство было использовано в настоящей работе для создания модели роста культуры опухолевых клеток в чашке Петри.

Модель включает три принципиальные компоненты, обеспечивающие адекватное описание основных особенностей роста опухоли: опухолевые клетки, концентрацию кислорода и уровень pH. Достаточная концентрация кислорода необходима для пролиферации (деления) клеток опухоли, в то же время с увеличением их количества клетки, находящиеся внутри опухоли, испытывают гипоксию, которая в свою очередь инициирует гликолиз (окисление глюкозы, содержащейся в клетке). В результате последнего, pH смещается в кислотную сторону, в конечном счёте вызывая некроз клеток опухоли. В живом организме гликолиз, протекающий в анаэробных условиях, приводит к накоплению лактата и понижению pH.

Для описания указанных процессов предложена следующая система уравнений:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = D_u \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \begin{cases} -u, & [H^+] > H_{thr} \text{ или } [O_2] < [O_2]_{min}, \\ \begin{cases} -u + u_{max}, & u \geq u_{thr}, \\ k_1 u \cdot [O_2], & u < u_{thr} \end{cases} & [O_2] \geq [O_2]_{min}; \end{cases} \quad (1)$$

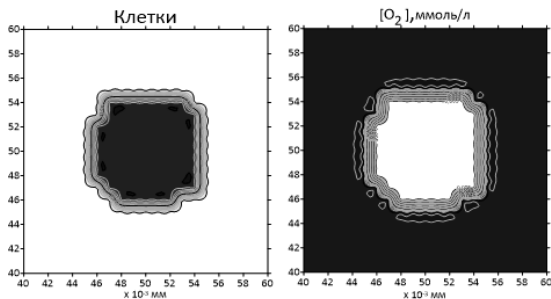
$$\frac{\partial [H^+]}{\partial t} = D_H \frac{\partial^2 [H^+]}{\partial x^2} + \begin{cases} -[H^+] + H_{max}, & [H^+] \geq H_{thr}, \\ \begin{cases} k_2 u(t - \tau), & [O_2] < [O_2]_{hyp}, \\ -[H^+], & [O_2] \geq [O_2]_{hyp} \end{cases} & [H^+] < H_{thr}; \end{cases} \quad (2)$$

$$\frac{\partial [O_2]}{\partial t} = D_{O_2} \frac{\partial^2 [O_2]}{\partial x^2} + \begin{cases} -[O_2] + [O_2]_{min}, & [O_2] \leq [O_2]_{thr1}, \\ -[O_2] + [O_2]_{max} - k_3 u [O_2], & [O_2] > [O_2]_{thr1}. \end{cases} \quad (3)$$

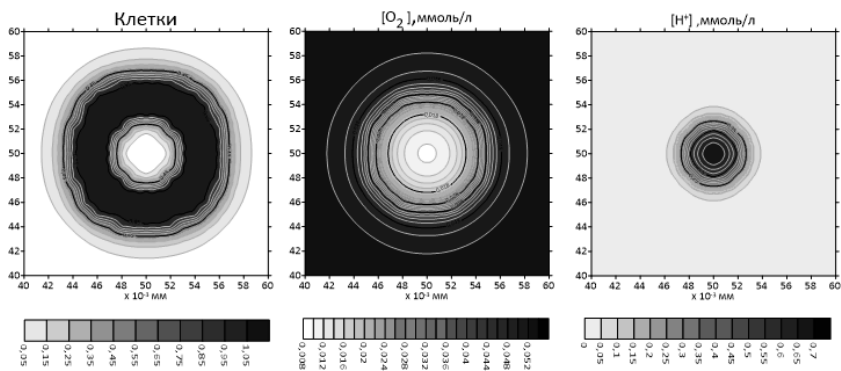
Здесь u – количество опухолевых клеток, нормированное на 1, $[H^+]$ – концентрация катионов, определяющая pH, согласно формуле $pH = -lg[H^+]$, $[O_2]$ – концентрация кислорода. В начальный момент времени в чашку Петри высевают 2×10^3 клеток.

Первое уравнение определяет динамику концентрации (количества?) опухолевых клеток. Сток вида « $-u$ » в первой строчке уравнения моделирует функцию тождественно равную нулю. Условие $[H^+] > H_{thr}$ или $[O_2] < [O_2]_{min}$ означает, что уровень кислорода или pH непригодны для жизни клеток. Такая ситуация характерна для опухолевого некротического ядра. Если уровень кислорода достаточный, а плотность клеток меньше некоторого порогового значения, u_{thr} то происходит их активная пролиферация (Hervas-Raluy, 2023), описываемая слагаемым $k_1 u \cdot [O_2]$, где k_1 – скорость роста клеток. При достижении порогового уровня концентрации, клетки перестают делиться и достигают максимальной концентрации $u_{max} = 1$.

Начальное распределение



Распределение через 100 часов



Второе уравнение описывает динамику pH. В клетках, высеванных в начальный момент времени, не сразу активизируется анаэробный гликолиз, а через небольшой промежуток времени τ , который учтён в уравнении в качестве аргумента с запаздыванием у слагаемого $k_2 u(t - \tau)$, отвечающего за гликолиз. Здесь k_2 – это коэффициент гликолиза. Анаэробный гликолиз протекает в условиях гипоксии (Ward, 2020), то есть если концентрация кислорода меньше пороговой, $[O_2]_{hyp}$. Это

описывается третьей строчкой уравнения (2), которая моделирует нулевое решение. Первая строчка уравнения (2) моделирует достижение максимальной предельной $[H^+]$ в области некроза ($pH \approx 3$).

Третье уравнение описывает динамику концентрации кислорода. Слагаемое $[O_2] + [O_2]_{max} - k_3 u [O_2]$ во второй строчке уравнения описывает потребление кислорода пролиферирующими клетками в случае, когда концентрация кислорода достаточно велика $[O_2] > [O_2]_{thr1}$. Первая строчка уравнения (3) моделирует достижение минимально возможной концентрации $[O_2]_{min}$ в области, где плотность клеток максимальная.

Пороговые уровни в модели были подобраны согласно источникам, содержащим экспериментальные данные. Численная реализация производилась в трёхмерной области, имеющей форму куба на равномерных сетках с использованием метода прямых, схемы Розенброка с коэффициентом $\frac{1}{2}$ и факторизации по пространственным координатам (Калиткин). Использовался компилятор CUDA.

Результаты численного моделирования представлены на рисунке.

Вывод. Полученная модель описывает рост клеточной культуры опухолевых клеток в зависимости от распределения кислорода и pH.

Литература

1. Volpert A.I., Volpert V.A. // *Nonlinear Analysis, Theory, Methods and Applications*, v.49, №1. 2002, С.113–139.
2. Нефедов Н.Н., Никулин Е.И., Орлов А.О. // *Дифференциальные уравнения*. т.58, №6. 2022, С.763–776.
3. Silvia Hervas-Raluyet.al. // *Computers in Biology and Medicine*, v.159. 2023, P.106895.
4. Ward C, Meehan J, Gray ME, Murray AF, Argyle DJ, Kunkler IH, et al.//*Explor Target Antitumor Ther.*, v.1. 2020, P.71–100.
5. Zhang, S., Xiao, X., Yi, Y. *et al.*//*Sig Transduct Target Ther*, v.9 2024, P.149.
6. Калиткин Н.Н., Корякин П.В. Численные Методы.-Москва: «Академия», 2013.

ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ПРОЦЕССА ФРЕЗЕРОВАНИЯ В ЗАДАЧАХ ОПТИМИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

THE MILLING PROCESS IN OPTIMIZATION PROBLEMS BASED ON MACHINE LEARNING

А.А. Лобко, О.Р. Волкова

ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, Россия

127055, Вадковский переулок, 3а

Тел.: +7 (999) 839 3520, e-mail: andreilobkowork@gmail.com,

Тел.: +7 (916) 226-54-77, e-mail: orvsan@gmail.com

Аннотация: В статье представлены современные подходы к оценке состояния процесса фрезерования с использованием методов машинного обучения. На основе разработанной модели, учитывающей динамические и силовые взаимодействия инструмента с заготовкой, предложена система генерации данных, позволяющая создавать массивы информации для задач оптимизации и машинного обучения, с учетом естественной вариативности производственных условий.

Ключевые слова: оценка качества, процесс фрезерования, моделирование, оптимизация машинное обучение.

Современное производство выдвигает высокие требования к качеству изготавливаемых изделий. Это связано с усложнением конструкций, применением новых материалов и ужесточением допусков в аэрокосмической, автомобильной и медицинской промышленности. Особенно это касается деталей с высокой добавленной стоимостью, где цена брака многократно превышает затраты на оптимизацию процесса обработки. Для обеспечения требуемой точности и эффективности самих процессов механической обработки требуется проведение тщательной оптимизации режимов фрезерования, что требует анализа большого количества экспериментальных данных. Однако сбор реальных производственных данных сопряжен со значительными временными и материальными затратами, что создает противоречие между потребностью в обширных наборах данных для настройки систем оптимизации и высокой стоимостью их получения в производственных условиях.

Анализ существующих исследований показывает недостаточную проработанность проблемы моделирования процесса фрезерования, поскольку большинство применяемых подходов базируется на упрощенных математических моделях, не учитывающих комплексное взаимодействие технологических факторов и динамических явлений [1-6]. В тоже время существующие методы генерации синтетических данных не обеспечивают требуемой точности из-за ограниченного учета физических особенностей процесса резания. А отсутствие эффективных методов валидации сгенерированных данных не позволяет гарантировать их достоверность и применимость для задач оптимизации и машинного обучения.

Таким образом, существует необходимость в разработке более точных и комплексных моделей процесса фрезерования, которые могли бы учитывать все аспекты взаимодействия инструмента с заготовкой. В основу такой модели может быть положен подход описания процесса фрезерования, учитывающего не только силовое взаимодействие инструмента с заготовкой, но и динамическое.

Так для описания силового взаимодействия может быть использована усовершенствованная модель, предложенная в работе [2], лежит расчет тангенциальной, радиальной и осевой составляющих сил резания, которые формируются как сумма силы, зависящей от мгновенной толщины срезаемого слоя, и постоянной составляющей:

$$\begin{cases} F_t(\pi) = K_{tc} \cdot h(\pi) \cdot a_p + K_{te} \cdot a_p + K_{tne} \cdot h^2(\pi) \\ F_r(\pi) = K_{rc} \cdot h(\pi) \cdot a_p + K_{re} \cdot a_p + K_{rne} \cdot h^2(\pi) \\ F_a(\pi) = K_{ac} \cdot h(\pi) \cdot a_p + K_{ae} \cdot a_p \end{cases}$$

При этом толщина срезаемого слоя определяется кинематикой процесса и зависит от подачи на зуб и мгновенного угла поворота фрезы:

$$h(\pi) = f_z \cdot \sin(\pi).$$

Геометрическое положение каждого зуба фрезы учитывается при проецировании сил на координатные оси:

$$\begin{aligned} F_x(\pi) &= -F_t(\pi) \cdot \cos(\pi) - F_r(\pi) \cdot \sin(\pi), \\ F_y(\pi) &= -F_t(\pi) \cdot \sin(\pi) - F_r(\pi) \cdot \cos(\pi), \\ F_z(\pi) &= F_a(\pi). \end{aligned}$$

А суммарное силовое воздействие формируется как результат работы всех режущих кромок инструмента.

Динамическая составляющая модели описывает колебательное движение технологической системы под действием рассчитанных сил резания с учетом массовых, демпфирующих и упругих характеристик системы:

$$\begin{aligned} m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + c \cdot \frac{dx}{dt} + k \cdot x &= F_x(t) \\ m \cdot \frac{d^2y}{dt^2} + c \cdot \frac{dy}{dt} + k \cdot y &= F_y(t) \\ m \cdot \frac{d^2z}{dt^2} + c \cdot \frac{dz}{dt} + k \cdot z &= F_z(t) \end{aligned}$$

Особое внимание уделено регенеративному эффекту, который отражает влияние предыдущих проходов зубьев фрезы на формирование текущей толщины срезаемого слоя:

$$h(t, \pi) = f_z \cdot \sin(\pi) + [x(t - T) - x(t)] \cdot \sin(\pi) + [y(t - T) - y(t)] \cos(\pi),$$

что существенно влияет на динамическую устойчивость процесса резания.

В рамках исследования были определены ключевые параметры состояния процесса фрезерования, характеризующие как стружкообразование, так и формирование обработанной поверхности. Процесс стружкообразования описывается через коэффициент усадки:

$$K_a = \frac{h}{h_c} = \frac{V}{V_c} = \frac{\sin(\pi)}{\cos(\pi - \gamma)},$$

где h , h_c – толщина среза и стружки, V , V_c – скорость резания и схода стружки, отражающий степень пластической деформации срезаемого слоя, и угол сдвига:

$$\pi = \arctan \left[\frac{r_a \cdot \cos(\gamma)}{1 - r_a \cdot \sin(\gamma)} \right] + k_{vV},$$

где r_a – коэффициент утолщения стружки, k_{vV} – скоростной коэффициент, определяющий положение плоскости максимальных касательных напряжений. Эти характеристики находятся в прямой зависимости от геометрических параметров режущего инструмента и технологических условий резания.

Качество формируемой поверхности оценивается через параметры шероховатости, где теоретическая составляющая $R_{a_{theo}}$ определяется геометрией инструмента и кинематикой процесса:

$$R_{a_{theo}} = \frac{f^2}{8R} + h_{min},$$

где f – подача, R – радиус при вершине инструмента, h_{min} – минимальная толщина срезаемого слоя. А реальная составляющая $R_{a_{real}}$ дополнительно учитывает влияние вибраций и других динамических явлений:

$$R_{a_{real}} = R_{a_{theo}} + k_1 A_{vib} + k_1 f_{vib} + k_1 V_\varepsilon,$$

где k_1, k_2, k_3 – коэффициенты влияния динамических факторов, A_{vib} и f_{vib} – амплитуда и частота вибраций, V_ε – скорость деформации.

Для комплексной оценки эффективности процесса были введены: коэффициент стабильности $K_s = \frac{F_{nom} - F_{var}}{F_{nom}}$, где F_{nom} – номинальное значение силы резания, F_{var} – величина её вариации, и коэффициент эффективности обработки $K_{eff} = \frac{MRR}{P \cdot R_a}$, где MRR – интенсивность съема материала, P – потребляемая мощность, учитывающие режимы резания, жесткость технологической системы и условия взаимодействия инструмента с обрабатываемым материалом.

Предлагаемая система генерации данных (рис. 1) обеспечивает формирование массивов информации о процессе фрезерования на основе вариации входных параметров в технологически допустимых диапазонах. При этом выходные характеристики процесса вычисляются с учетом случайных отклонений, что позволяет моделировать реальные производственные условия с их естественной вариативностью. В результате функционирования системы генерации формируется матрица данных, охватывающая широкий спектр условий обработки и учитывающая различные сочетания режимов резания, геометрических параметров инструмента и характеристик обрабатываемого материала.

Комплексные фитнес-функции, в свою очередь, обеспечивают многокритериальную оценку процесса фрезерования, принимая во внимание ключевые технологические показатели.

Оценка осуществляется на основе анализа производительности процесса, выраженного через скорость снятия материала (MRR), качества обработанной поверхности, определяемого параметрами шероховатости (R_a), и энергетической эффективности процесса, контролируемой по потребляемой мощности (P). А система валидации данных осуществляет всестороннюю проверку качества информации, генерируемой в процессе фрезерования. Методология валидации основывается на многоуровневом анализе, который включает оценку полноты и достоверности создаваемых данных (табл. 1), сравнительный анализ их статистических характеристик (табл. 2) с результатами реальных экспериментов, а также определение уровня согласованности полученных результатов.

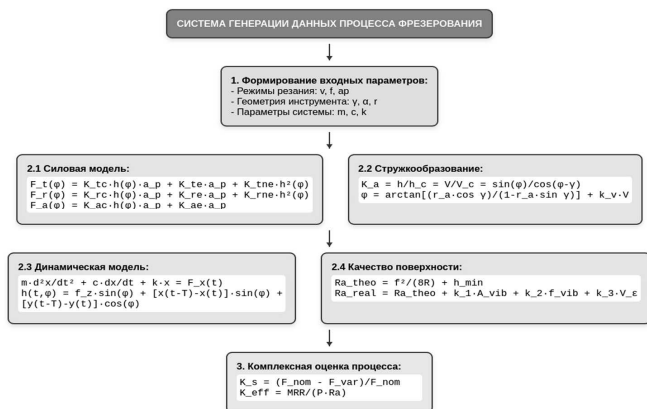


Рис.1. Блок-схема процесса генерации

Таблица 1

Оценка качества генерируемых данных

Параметр	Критерий оценки	Значение (%)
Полнота данных	Completeness	99,8
Точность силовых параметров	Accuracy F	94,3
Точность параметров шероховатости	Accuracy Ra	92,7
Точность геометрических параметров	Accuracy geom	96,5
Согласованность силовых характеристик	Consistency F	91,8
Согласованность параметров качества	Consistency Ra	90,5

Таблица 2

Статистические характеристики основных параметров

Параметр	Среднее значение (μ)	Стандартные отклонения (σ)	Диапазон значений
Скорость резания (м/мин)	180.5	15.3	150-220
Подача (мм/зуб)	0.08	0.012	0.05-0.12
Глубина резания (мм)	2.5	0.3	1.5-4.0
Сила резания F_x (Н)	425.8	45.2	320-580
Сила резания F_y (Н)	385.3	42.8	280-520
Сила резания F_z (Н)	195.6	25.4	140-280
Шероховатость R_a (мкм)	1.25	0.18	0.8-1.8

Разработанная методика верификации математической модели процесса фрезерования охватывает аспекты оценки её соответствия реальным условиям. Верификация проводится на нескольких уровнях: параметрическая проверка оценивает точность модели по отдельным характеристикам процесса, функциональная верификация подтверждает правильность воспроизведения моделью поведения реальной технологической системы. Интегральная оценка обеспечивает определение общей адекватности модели, а анализ её чувствительности к вариациям входных параметров подтверждает надежность и устойчивость получаемых результатов.

Результаты проведенной всесторонней экспериментальной проверки модели, включающая сопоставление с результатами реальных испытаний, анализ точности прогнозирования параметров процесса и оценку эффективности оптимизации режимов резания представлен на рисунке 2.

Параметр	Критерии соответствия			Статистическая значимость	
	RMSE	ϵ_{rel} (%)	R ²	t-критерий	F-критерий
Сила резания Fx	12.5 Н	2.94%	0.952	1.85	1.12
Сила резания Fy	11.8 Н	3.06%	0.945	1.92	1.15
Сила резания Fz	7.2 Н	3.68%	0.938	1.78	1.21
Шероховатость Ra	0.05 мкм	4.12%	0.921	1.95	1.18

Параметрическая верификация Критические значения: - t_крит ($\alpha=0.05$) = 2.01 - F_крит ($\alpha=0.05$) = 1.35 Закключение: Все параметры в пределах допустимых значений	Функциональная верификация Оценка адекватности модели: - R² > 0.9 для всех параметров ϵ_{rel} < 5% для всех параметров Закключение: Модель адекватно описывает процесс
---	---

Интегральная оценка модели - Средняя относительная погрешность: 3.45% - Средний коэффициент детерминации: 0.939 - Все статистические критерии в пределах допустимых значений Общее заключение: Модель верифицирована и пригодна для практического применения
--

Рис.2. Результаты верификации математической модели процесса фрезерования

Как видно из результатов предложенная модель позволяет генерировать качественные наборы данных, которые обеспечивают достаточную точность. Следовательно, предложенный подход генерации данных эффективен для замены реальных экспериментальных данных.

Список литературы

1. Kim, G. M., Kim, B. H. Mechanistic cutting force model considering tool wear in micro end-milling // International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2021, Vol. 165, pp. 103729.
2. Zhang, Z., Li, H. Advanced cutting force modeling in precision machining // Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2023, Vol. 145(3), pp. 031009.
3. Bishop C.M. Pattern Recognition and Machine Learning. Springer, 2023
4. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning. Springer, 2022
5. Петрушин С.И., Грубый С.В. Теория несвободного резания материалов: учебное пособие. – М.: Машиностроение, 2019. – 248 с.
6. Сулов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2020. – 320 с.

ВЛИЯНИЕ ЕСТЕСТВЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПОВЕРХНОСТИ СЛЮДЫ НА БИОСОПРЯЖЕНИЮ И ВТОРИЧНУЮ СТРУКТУРУ ПЕПТИДНОГО КОМПОЗИТА С НАНОЧАСТИЦАМИ ЗОЛОТА

EFFECT OF NATURAL ELECTRIC FIELD ON THE MICA SURFACE ON BIOCONJUGATION AND THE SECONDARY STRUCTURE OF PEPTIDE COMPOSITE WITH GOLD NANOPARTICLES

А.И.Лоскутов

Московский государственный технологический университет СТАНКИН,
Вадковский пер., 1, Москва, 127994 Россия

ailoskutov@yandex.ru tel. +79164919418.

Аннотация. Понимание механизма влияния электрического поля на биосопряжение и кристаллизацию водных растворов пептидных (ПТ) композитов с золотыми наночастицами (НЧ) на твердых поверхностях имеет большое научное и практическое значение. В водных растворах выщелачивание поверхности слюды приводит к образованию адсорбционного слоя ионов K^+ и Si^+ и возникновению внутреннего электрического поля. В результате происходит переориентация заряженных функциональных групп в молекулах ПТ и изменяется характер их сопряжения с НЧ. Если на золотой подложке сопряжение происходит с участием COO^- групп в молекуле ПТ и НЧ остаются нейтральными $COO^- - Au(0)$, то на слюде они замещаются на NH_3^+ с переносом отрицательного заряда на атомы золота ($H_3N^+ - Au^-$). Электрическое поле также изменяет вторичную структуру ПТ молекул и механизм кристаллизации нанокомпозитов. Помимо выщелачивания поверхности слюды происходит дезаминирование аминокислоты лизина с образованием CH_3 . В отличие от золота, воздействие электрического поля в растворе на химические реакции приводит к образованию на слюде новых соединений: KOH и Si_3N_4 . Рассмотрены вопросы практического использования результатов и в том числе создание нейроморфных интерфейсов.

Ключевые слова: биосопряжение, кристаллизация, пептиды, электрическое поле, наночастицы золота, выщелачивание

ВВЕДЕНИЕ

Практическое использование процессов кристаллизации происходило и происходит на протяжении многих столетий, однако классическая теория, которая предполагает, что образование твердых слоев происходит путем присоединения отдельных атомов или молекул к растущим кристаллам возникла лишь в конце XIX — начале XX вв. В связи с бурным развитием методов нанотехнологий и созданием новых композиционных материалов с НЧ возникает необходимость в разработке новых теорий, которые бы описывали все стадии этих весьма сложных и многофакторных процессов, начиная с синтеза НЧ, образования коллоидных растворов и заканчивая их кристаллизацией. Биомолекулярные материалы имеют большие преимущества перед химическим синтезом, так как имеют собственную структуру, обладают высокой экологичностью и биоразлагаемостью. Ряд биомолекулярных материалов, в том числе ДНК и ПТ, также обладают мемристорными свойствами [1]. Кристаллизация

коллоидных растворов с неорганическими НЧ относится к неклассической кристаллизации, которая предполагает образование временно стабилизированных «строительных» блоков, состоящих из неорганических частиц, окруженных лигандом или стабилизирующей органической оболочкой (коронай). В жидкой фазе начинаются процессы самосборки и самоорганизации отдельных частиц, в которых решающую роль играют взаимодействия между коронами этих частиц. Корона обеспечивает их электростатическую или стерическую стабилизацию в коллоидном растворе. Если в коллоидном растворе одновременно действуют силы отталкивания и притяжения, то его устойчивость определяется весьма тонким балансом этих сил. Нарушение этого баланса приводит к дестабилизации коллоидного раствора, то есть агрегации или агломерации или осаждению коллоидных частиц. Наличие заряженных функциональных групп в органических в короне позволяет использовать внешние электрические поля для управления процессами их сопряжения с поверхностями неорганических НЧ.

Мы длительное время занимались синтезом и исследованием различных нанокompозитных материалов на основе искусственно синтезированных ПТ медицинского назначения. Нас также интересовали возможности практического применения таких материалов помимо медицины и фармакологии в других областях, например, в качестве материалов для органической электроники. Ранее были обнаружены существенные различия как в морфологии поверхности слоев нанокompозитов, так и в механизме их роста на поверхностях золота, монокристалла графита, кремния, стекла с одной стороны и слюды с другой [2,3]. Результаты МД-моделирования не дали ответа на причины появления таких различий.

Поэтому было решено еще раз вернуться к этому вопросу и более подробно рассмотреть процессы биосопряжения ПТ с Au НЧ в водном растворе ПТ, сформированных на различных подложках. Мы надеемся, что полученные результаты будут иметь не только важное научное значение, но и практическое применение не только в медицине и фармакологии, но и в твердотельной микроэлектронике, так как в фармацевтической промышленности процесс производства большинства активных фармацевтических ингредиентов включает как минимум одну стадию кристаллизации. Кроме этого, выяснение механизма биосопряжения может установить как механизм формирования нейронинтерфейсов, так и способы управления его свойствами.

Эксперимент

Использовали дипептид гексаметилендиаминбис (N-моносукцинилглютамин). Он относится к классу коротких ПТ, обладающих нейротропным действием, и является миметиком фактора роста нервных клеток. Его химическая формула: $\{HOOC-(CH_2)_2-CO-LGlu-L-Lys-NH-(CH_2)_3\}_2$, молекулярная масса $M_w = 830,9$ Да [4]. Структуру и свойства сформированных нанокompозитных слоев исследовали с помощью РФЭС, СТМ-АСМ, а также ИК и Раман спектроскопии.

Результаты и их обсуждение

На рис.1 представлены АСМ- изображения слоев ПТ+НЧ на поверхности слюды (а) и золота (б). Видно, что на поверхности стекла наблюдается самосборка НЧ золота, а на слюде она отсутствует. При этом на золоте при увеличении толщины слоев образуется сплошной слой. Однако, на слюде в аналогичных условиях он не наблюдается.

При измерении РФЭ спектров было обнаружено, что энергии связи (ЭС) пиков Au $4f_{7/2}$ и Au $4f_{5/2}$ составляют 84,0 и 87,7 эВ на золоте и 82,8 и 86,5 эВ на слюде соответственно. Это означает, что на золоте поверхность НЧ остается нейтральной, а на слюде она имеет отрицательный заряд. Также было обнаружено образование нового

соединения Si_3N_4 . Математическая обработка оптических спектров, результаты которой представлены в таблице, позволила определить вторичную структуру молекул ПТ в композитных слоях на поверхности разных подложек. Анализ спектральных данных показал, что характерные полосы и линии соответствуют следующим элементам вторичной структуры молекул ПТ: β -листы, случайные клубки, α -спирали и β -повороты. Сравнение этих данных со спектрами пропускания, на золоте и слюде свидетельствует о том, что в процессе кристаллизации ПТ+НЧ на этих подложках произошли существенные изменения во вторичной структуре слоя, поскольку на слюде и золоте идентичные полосы отсутствуют или смещаются. Кроме этого, на слюде обнаружено образование новых соединений CONH и CH_3 , которых нет ни в самом ПТ, ни в его композите на золоте. Характерно, что интенсивность комбинационного рассеяния света в композитных слоях ПТ+НЧ на золоте в области амид 111, 11 и 1 существенно выше, чем на слюде.

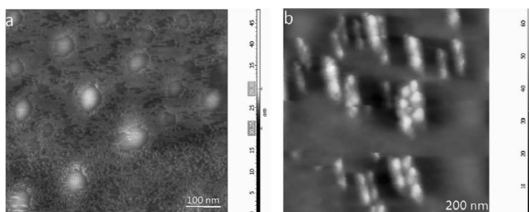


Рис.1. Наночастицы золота на поверхности слюды (а) и стекла (б)

Таблица. Распределение относительных долей каждого элемента вторичной структуры в спектрах (%)

	α -спираль	β -лист	Разупорядоченные структуры	β -повороты	Случайные клубки
пропускание	13,3%	46,5%	22,7%	12,4%	5,1%
золото	25,6%	23,7%	20,2%	15,9%	14,6%
слюда	32,9%	25,4%	30,1%	0%	11,6%

По ориентации ПТ цепей можно разделить все структуры β -листов на параллельные и антипараллельные. В первом случае их можно наблюдать на золоте. В этой спектральной области на слюде наличие полос при 1686 и 1696 cm^{-1} , а также полосы при 1638 cm^{-1} свидетельствует об образовании антипараллельных структур β -листов. Из результатов спектральных измерений видно, что в спектре пропускания основным типом вторичной структуры является β -листы и α -спирали. Причем количество последних существенно меньше. Взаимодействие композита с подложками приводит к уменьшению относительных долей структур β -листов и, соответственно, увеличению доли α -спиралей. При этом наибольшее количество α -спиралей, а также неупорядоченных структур находится на слюде. Самое интересное, что на слюде β -повороты полностью исчезают. Такие структуры обычно возникают, когда белковые цепи вынуждены менять свое направление для соединения двух элементов в ней, например, при образовании водородных связей в молекуле между C=O и N-H остатками. Образование случайных клубков также связано с образованием водородных связей в молекуле, однако эти области молекулы ПТ не образуют регулярной вторичной структуры и регулярного рисунка водородных связей.

Молекула данного ПТ относится к классу цвиттер-ионных соединений, в которых возможно образование не ковалентных шнурков. Это обуславливает формирование различных паттернов на поверхности твердых слоев. Основной вывод

результатов зондовых измерений заключается в том, что на золоте рост слоев подчиняется механизму послойного роста с образованием сплошного слоя, то на слюде возникают цепочечные структуры. После этого начинается рост отдельных 3-мерных агрегатов микронных размеров. Аналогичные закономерности наблюдались ранее и при кристаллизации коллоидных растворов более сложной структуры ПТ с НЧ золота на слюде и золоте [5]. Вероятно, самым неожиданным является отрицательная валентность атомов золота на поверхности НЧ в композитных слоях ПТ+НЧ на слюде.

Хорошо известно, что золото может иметь переменную валентность от +3 до -1. В то же время отрицательная валентность наблюдается довольно редко. В нашем случае на золоте, как и на других подложках (монографит, стекло), поверхность Au НЧ в композите остается нейтральной. Это также означает, что состав стабилизирующей оболочки (короны) вокруг золотых НЧ в растворе и в твердых слоях не меняется.

Однако, при нанесении коллоидного раствора на поверхность слюды принципиально меняется характер биосопряжения молекул ПТ с НЧ. Золото – благородный металл, который широко используется в различных областях промышленности, особенно в микроэлектронике. Уникальные свойства золотых наночастиц, которые зависят от их размера и формы и проявляются только в наноразмерных объектах, облегчают их использование в биологии, медицине и фармакологии. Поэтому результаты этих работ открывают путь к новым возможностям их практического использования в таких областях, как терапевтические векторы доставки и внутриклеточные визуализирующие агенты. Процессы сопряжения органических молекул с неорганическими поверхностями могут происходить посредством образования ковалентных или не ковалентных связей за счет электростатических/гидрофобных взаимодействий. По сравнению с золотом слюда является слоистым минералом, содержащим как положительные, так и отрицательные заряды. Между ними существует очень тонкая балансировка зарядов. Учитывая слоистую структуру слюды, заряды разных знаков могут располагаться непосредственно на поверхности скола. Эти заряды создают электрическое поле, которое зависит от расстояния между ними и интерфейсом. Преимуществом слюды как подложки для изучения различных биологических объектов, например, ДНК, белков, ПТ, является достаточно быстрый и простой способ приготовления чистой и атомарно-гладкой поверхности с помощью скалывания. Это объясняет широкое применение слюды в микронзондовых измерениях. По умолчанию часто предполагается, что поверхность слюды достаточно стабильна и инертна. Однако в водных растворах это условие не реализуется, так как ионы калия и кремния в результате реакции выщелачивания переходят в раствор. Образующийся отрицательный заряд частично нейтрализуется с образованием двойного электрического слоя вблизи поверхности слюды, однако при этом полной компенсации поверхностного заряда слюды не происходит (рис.2).

На рис.3 представлена схема распределения образовавшихся новых соединений КОН и Si_3N_4 по толщине нанокompозитного слоя, сформированного на поверхности слюды.

Таким образом все процессы кристаллизации коллоидного раствора, начиная от синтеза НЧ, зародышеобразования и заканчивая ростом твердых слоев на слюде, будут происходить в электрическом поле поверхностных зарядов на поверхности слюды. Для получения отрицательного заряда атомов золота на поверхности НЧ адсорбционный слой в короне, непосредственно прилегающий к поверхности НЧ (слой Гельмгольца), должен состоять из положительно заряженных функциональных групп молекулы ПТ. Это наблюдается только на поверхности слюды. В остальных случаях (спектры пропускания, золото, монографит, стекло) сопряжение происходит с участием COO^-

групп. Это изменяет все последующие стадии кристаллизации. Повороты обычно возникают, когда белковой цепи необходимо изменить направление, чтобы соединить два других элемента вторичной структуры. Это свидетельствует о том, что в электрическом поле уменьшается число разрешенных конформаций молекул пептидов. Таким образом в электрическом поле происходит своеобразное «выпрямление» ПТ цепочек, которое обусловлено изменением структуры водородных связей в молекуле ПТ.

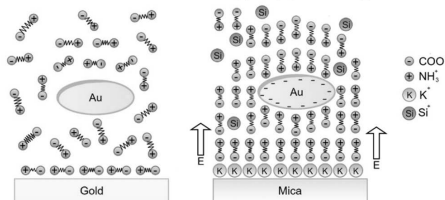


Рис.2. Схема пептидных слоев на поверхности золота и слюды, а также корона вокруг наночастиц золота в присутствии электрического поля поверхности слюды

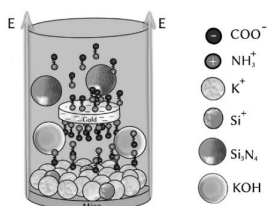


Рис.3. Схема распределения по толщине композитного слоя KOH и Si_3N_4 соединений в электрическом поле поверхности слюды

Таким образом электрическое поле, которое возникает в водном растворе на поверхности слюды нельзя по желанию просто «включить» или «выключить» в отличие от обычной электрохимии и его надо обязательно учитывать. Вторым выводом; процессами биосопряжения можно управлять с помощью внешних электрических полей, придавая тем самым новые свойства сформированным твердым слоям. Совместное действие химических реакций и электрического поля в растворе приводит к образованию на слюде новых соединений, например CH_3 и Si_3N_4 . Известно, что синтез Si_3N_4 требует высоких температур, но в электрическом поле он происходит при комнатной температуре. С практической точки зрения полученные результаты можно использовать в органической электронике, фармакологии и медицине, поскольку эффективность фармакологических препаратов зависит от состава стабилизирующей оболочки вокруг НЧ.

Литература

1. Loskutov, A. I. EPJ Web of Conferences., V. 224, № 03003, 2019. P.1-5
2. Loskutov, A. I., Guskova, O. A. et al. J. Nanopart. Res., V. 18. 2016. P. 238–255.
3. Loskutov, A. I., Lokshin, B. V. et al. CrystEngComm, V. 20, 2018. P. 7688–7699
4. Seredenin S. B., Gudasheva T. A., US Pat., 9683014B29, 2017; European Patent EPVER No. 2397488, 2019
5. Loskutov, A. I., Oshurko, V. B., Loskutov, S. A. Polymer Science, Series A., V. 65, 2023. P.765–777.

МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕЛКОВЫХ СУПЕРСПИРАЛЕЙ ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ХИРАЛЬНОСТИ

А.О. Луценко^а, А.Э. Сидорова^б

Физический факультет, Москва МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия,
119991, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, с. 2,

Тел. +7 (495) 939-11-95, e-mail: ^аaleksluchrus@yandex.ru, ^бsky314bone@mail.ru

Одним из ключевых вопросов молекулярной биофизики является определение механизмов образования и функционирования белков, в частности, определение свойств и особенностей отдельных характерных белковых элементов и выявление закономерностей в иерархиях белковых структур. Одной из важнейших геометрических структурных характеристик элементов белков является хиральность [1]. Белки имеют гомохиральную природу на различных уровнях организации. Так, известно, что в образовании белков участвуют исключительно левые аминокислотные остатки. Из них состоят полипептидные цепи, которые укладываются в пространстве, образуя различные вторичные, надвторичные, третичные и четвертичные структуры. Многие из них также являются гомохиральными: такие элементы вторичной структуры, как α -спирали и спирали 3_{10} , являются практически всегда правозакрученными, полипролиновые спирали — левозакрученными [2]. Многие элементы надвторичной структуры белков также имеют характерный знак хиральности. Так, состоящие из α -спиралей суперспирали типа «coiled-coil», как правило, закручены в левую сторону, а коллагеновые суперспирали, собранные из полипролиновых спиралей — в правую.

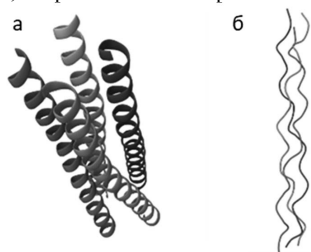


Рис. 1. Изображение суперспиралей: а — пример суперспирали «coiled-coil»,
б — пример коллагеновой суперспирали

В предлагаемой модели предлагается оценивать хиральность суперспирали как величину, показывающую, насколько интенсивно каждая отдельная спираль закручена относительно оси суперспирали, характеризующей строение всей структуры целиком, на более высоком иерархическом уровне [3]. При этом знак этого числа будет показывать направление хиральности (правая или левая закрутка), а значение — собственно величину хиральности.

Поскольку оценивается хиральность всей надвторичной структуры, которая определяется взаимным расположением цепей, нет необходимости использовать информацию обо всех атомах аминокислотных остатков. В нашей модели расположение каждого аминокислотного остатка в пространстве принимается как расположение α -углерода этого остатка, и от белковой цепи остается углеродный остов. По координатам

альфа-углеродов строятся опорные точки (рис. 2 б). В модели мы аппроксимируем ось суперспирали прямой линией, для чего следует построить с помощью координат из PDB центр концевых альфа-углеродов всех спиралей, составляющих суперспираль, с одного конца (центр точек C_1^1, C_1^2, C_1^3 — точка A_1), а затем с другого (центр точек C_n^1, C_n^2, C_n^3 — точка A_2). Через эти две точки проводится прямая, которая является, согласно нашему методу, осью суперспирали (рис. 2 в).

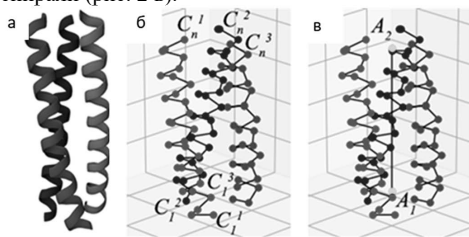


Рис. 2. а — изображение из PDB; б — суперспираль, представленная в виде цепей из альфа-углеродов, точки $C_1^1, C_1^2, C_1^3, C_n^1, C_n^2, C_n^3$ — концевые опорные точки для трёх спиралей; в — суперспираль с проведенной осью через точки A_1 и A_2

Далее строятся центры первого и последнего витков спиралей, составляющих суперспираль. Поскольку в альфа-спирали из «coiled-coil» на каждый виток приходится примерно 3,5 аминокислотных остатков, в качестве центра первого и последнего витка берется центр четырех первых (C_1, C_2, C_3, C_4) и последних ($C_{n-3}, C_{n-2}, C_{n-1}, C_n$) последовательных опорных точек спирали (рис. 3 а-в). После этого из центров этих витков на ось суперспирали опускается перпендикуляр, и из точки пересечения перпендикуляра с осью строится вектор к центру витка (рис. 3 г). Угол между v_1 и v_2 характеризует закрученность спирали вокруг оси суперспирали.

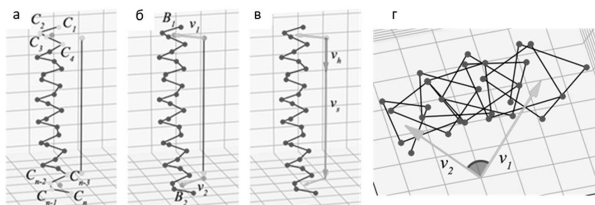


Рис. 3. Построение векторов для отдельной спирали: а — центр первого витка строится как центр первых четырех точек спирали, центр последнего витка строится как центр последнего четырех точек спирали; б — от оси к центрам витков строятся перпендикулярные оси вектора v_1 и v_2 ; в — построение векторного произведения v_h векторов v_1 и v_2 , v_s — вектор, построенный вдоль оси суперспирали; г — угол между векторами v_h и v_s характеризует хиральность суперспирали

Существуют и суперспирали, у которых отдельные спирали закручены вокруг оси суперспирали на один или несколько полных оборотов, и результат вычислений должен отражать этот факт. Поэтому угол между векторами нужно оценивать с учетом того, как устроена спираль в промежутке между векторами v_1 и v_2 . Поэтому предлагаем последовательно считать соответствующие углы между векторами, проведенными к каждому двум соседним опорным точкам, и суммировать все эти углы с учетом

направления закрутки (рис. 4). Поскольку каждый такой угол будет существенно меньше 180° , для них результат произведения будет рассчитываться верно. Суммарный угол будет характеризовать закрученность спирали вокруг оси. В результате последующего арифметического усреднения полученных углов для всех спиралей получается некоторый эффективный угол для всей суперспирали. Знак этого числа указывает направление закрутки суперспирали: отрицательные числа обозначают правую суперспираль, положительные – левую. Таким образом, полученный эффективный угол с учетом знака служит окончательной оценкой степени хиральности суперспирали.

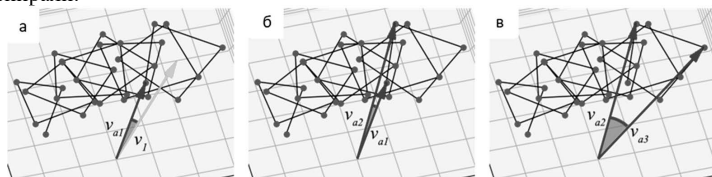


Рис. 4. Расчет хиральности. v_{a1} – вектор от оси суперспирали к первой опорной точке, v_{a2} – ко второй опорной точке, v_{a3} – к третьей опорной точке

Разработанная модель позволяет с помощью представленного выше метода корректно определить знак хиральности суперспиралей, а также оценить величину хиральности структуры. Метод был применен для расчета хиральности 114 суперспиралей типа «coiled-coil» и 12 коллагеновых суперспиралей. Все «coiled-coil» оказались левыми, коллагеновые суперспирали – правыми. Этот результат служит формальным подтверждением гипотезы, что знак хиральности в белковых структурах меняется при переходах между иерархическими уровнями белков. Математическая интерпретация метода не предполагает никакого специфического формата записи исходных данных, однако в нашей технической реализации мы брали данные о реальных структурах из банка данных PDB [4], а информацию о том, какие именно аминокислотные остатки входят в суперспираль – из CC+ Database [5].

Литература

1. Tverdislov V.A. // Biofizika, v. 58, № 1. 2013, p. 128. doi: 10.1134/S0006350913010156
2. Финкельштейн А.В., Птицын О.Б. Физика белка: курс лекций с цветными и стереоскопическими иллюстрациями и задачами. - Москва: КДУ, 2012.
3. Lutsenko A. et al. // Symmetry, v. 15, №. 11. 2023, p. 2051. doi: 10.3390/sym15112051
4. RCSB PDB. URL: <https://www.rcsb.org/>. Дата обращения: 5 мая 2023.
5. The CC+ Database. URL: <http://coiledcoils.chm.bris.ac.uk/ccplus/search/>. Дата обращения: 5 мая 2023.

ПРИМЕНЕНИЕ СИНГУЛЯРНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ В ОПТИМИЗАЦИИ НЕЙРОННОГО МАШИННОГО ПЕРЕВОДА

А.И. Макарс, Н.В. Елисеева

ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН", Москва, Российская Федерация,

127055, Москва, Вадковский пер., д.3а,

E-mail: arturmakars@mail.ru

В эпоху глобализации и цифровой трансформации потребность в точном и быстром переводе текстов возрастает экспоненциально. Традиционные методы машинного перевода, такие как статистический машинный перевод (СМП) и машинный перевод на основе правил (МПР), сталкиваются с ограничениями в передаче сложных семантических и различных нюансов языка [1, 2]. Нейронный машинный перевод (НМП), основанный на искусственных нейронных сетях, предлагает качественно новый подход к решению этих задач. В основе НМП лежит идея обучения модели преобразовывать последовательности слов исходного языка в последовательности слов целевого языка, учитывая сложные нелинейные зависимости и контекстуальные связи между ними [3].

Постановка задачи и математическая модель

Задача машинного перевода формулируется как задача условного моделирования вероятностей последовательностей. Для заданного входного предложения на исходном языке $X = (x_1, x_2, \dots, x_{T_x})$ требуется сгенерировать выходное предложение на целевом языке $Y = (y_1, y_2, \dots, y_{T_y})$, максимизируя условную вероятность $P(Y | X)$ [4, 5]:

$$Y^* = \operatorname{argmax}_Y P(Y | X; \theta), \quad (1)$$

где θ — параметры модели.

Основная цель — оптимизация параметров θ с использованием метода максимального правдоподобия на обучающем корпусе:

$$\theta^* = \operatorname{argmax}_{\theta} \sum_{(X,Y)} \log P(Y | X; \theta). \quad (2)$$

Архитектура модели и механизм внимания

Классическая архитектура НМП включает энкодер и декодер, оба из которых обычно реализуются с использованием рекуррентных нейронных сетей (РНС), сверточных нейронных сетей или трансформеров [6]. Энкодер преобразует входную последовательность X в набор скрытых состояний $H = (h_1, h_2, \dots, h_{T_x})$. Декодер генерирует выходную последовательность, используя информацию из H и ранее сгенерированных слов [7].

Механизм внимания (Attention Mechanism) позволяет декодеру динамически фокусироваться на различных частях входной последовательности при генерации каждого слова [8, 9]. Контекстный вектор C_t на шаге t вычисляется как взвешенная сумма скрытых состояний энкодера:

$$c_t = \sum_{i=1}^{T_x} \alpha_{t,i} h_i, \quad (3)$$

где коэффициенты внимания $\alpha_{t,i}$ определяются как:

$$\alpha_{t,i} = \frac{\exp(e_{t,i})}{\sum_{k=1}^{T_x} \exp(e_{t,k})}, \quad (4)$$

а функция оценки внимания $e_{t,i}$ обычно задается как:

$$e_{t,i} = \text{score}(s_{t-1}, h_i). \quad (5)$$

Предлагаемый метод улучшения механизма внимания

Рассмотрим подход к функции оценки внимания $\text{score}(s_{t-1}, h_i)$, основанный на интеграции семантической информации через внешние эмбединги и снижение вычислительной сложности путем оптимизации матричных операций.

Стандартные функции оценки, такие как аддитивная или скалярное произведение, могут быть улучшены путем введения семантических весов:

$$e_{t,i} = \text{score}(s_{t-1}, h_i) + \beta \text{sim}(h_i, h_j), \quad (6)$$

где $\text{sim}(h_i, h_j)$ — мера семантической схожести между состояниями h_i и h_j , а β — гиперпараметр.

Для уменьшения вычислительной сложности введем разложение матриц весов с использованием сингулярного разложения (SVD):

$$W = U \sum V^T, \quad (7)$$

что позволяет аппроксимировать большие матрицы меньшими ранга r , снижая тем самым количество вычислений с $O(n^2)$ до $O(nr)$.

Алгоритм обучения

Обучение модели производится путем минимизации функции потерь на основе кросс-энтропии:

$$L(\theta) = -\sum_{t=1}^{T_y} \log P(y_t | y_{<t}, X; \theta). \quad (8)$$

Оптимизация параметров осуществляется с использованием стохастического градиентного спуска и его адаптивных вариантов, таких как Adam или RMSprop. Для обеспечения сходимости и предотвращения переобучения используются методы регуляризации:

- Dropout: случайное отключение нейронов с вероятностью p ;
- L2-регуляризация: добавление штрафа за большие значения весов в функцию потерь [5, 10].

Экспериментальная оценка

Для оценки эффективности предлагаемого метода были проведены эксперименты на корпусе WMT 2014 English-German. Модель была реализована с

использованием фреймворка PyTorch и обучалась на ядре GPU NVIDIA Tesla T4 с 16ГБ видеопамати.

Параметры эксперимента:

- Размер словаря: 16 000 токенов, полученных с помощью BPE;
- Размерность эмбедингов и скрытых состояний: 256;
- Количество слоев энкодера и декодера: 4;
- Ранг аппроксимации r для SVD: 64.

Метрики оценки:

- BLEU: стандартная метрика качества перевода;
- ROUGE: измерение совпадения фраз и структур между переводом и эталоном;
- Время обучения: общее время, затраченное на обучение модели.

Таблица 1. Результаты эксперимента

Модель	BLEU	ROUGE	Время обучения (ч)
Базовый трансформер	22.8	13.3	36
Трансформер с предложенным методом	24.1	14.2	28

Анализ результатов

Результаты показывают, что использование предложенного метода приводит к улучшению качества перевода на 1.3 пункта BLEU и 0.9 пункта ROUGE по сравнению с базовой моделью. Сокращение времени обучения более чем на 20% свидетельствует об эффективности оптимизации вычислительной сложности.

Заключение

В работе предложен метод улучшения механизма внимания в нейронных машинных переводчиках, основанный на интеграции семантической информации и оптимизации матричных операций. Экспериментальные результаты демонстрируют повышение качества перевода и снижение вычислительной сложности, что делает модель более эффективной для практического применения.

Список литературы

1. Перевод и искусственный интеллект: проблемы и пути развития / С.А. Лосева. 2022.
2. Тагушева Н.Ю. (2015). Машинный перевод [Tagusheva N.Y. A Machine translation] // Материалы научно-практической конференции «Ломоносов 2015». Москва: МГУ.
3. Wang, X., Tu, Z., & Zhang, M. (2018). Incorporating statistical machine translation word knowledge into neural machine translation. IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 26 (12), 2255–2266.
4. Kingma, D. P., and Ba, J. "Adam: A method for stochastic optimization." arXiv preprint arXiv:1412.6980 (2014).
5. Kudo, T., and Richardson, J. "SentencePiece: A simple and language-independent subword tokenizer and detokenizer for neural text processing." EMNLP (2018): 66-71.
6. Zhang, Z., Liu, S., Li, M., Zhou, M., & Chen, E. (2018). Bidirectional generative adversarial networks for neural machine translation. In Proceedings of the 22nd Conference on

- Computational Natural Language Learning, pp. 190–199, Brussels, Belgium. Association for Computational Linguistics.
7. Stern, M., Chan, W., Kiros, J. R., & Uszkoreit, J. (2019). Insertion Transformer: Flexible sequence generation via insertion operations. arXiv preprint arXiv:1902.03249.
 8. Stahlberg, F., Saunders, D., de Gispert, A., & Byrne, B. (2019). In Proceedings of the Fourth Conference on Machine Translation: Shared Task Papers. Association for Computational Linguistics.
 9. Medina, J. R., & Kalita, J. (2018). Parallel attention mechanisms in neural machine translation. In 2018 17th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA), pp. 547–552.
 10. McCandlish, S., Kaplan, J., Amodei, D., & Team, O. D. (2018). An empirical model of large-batch training. arXiv preprint arXiv:1812.06162.

КВАНТОВАЯ ТОЧКА КАК МОДЕЛЬ ВНУТРЕННЕГО ПРОСТРАНСТВА ЧАСТИЦЫ И ВИРТУАЛЬНЫЙ УРОВЕНЬ КАК РЕЛЯТИВИСТСКИЙ АРТЕФАКТ В УРАВНЕНИИ ШРЕДИНГЕРА

А.М. Мандель, В.Б. Ошурко, С.Г. Веселко, Е.Е. Карпова, А.А. Шарп

МГТУ «СТАНКИН», Москва, Россия, Вадковский пер., 3А.

Тел. (+7 968)4205851, e-mail arkadimandel@mail.ru

Показано, что в интегральном представлении (по времени) функции Грина уравнения Шредингера для связанной частицы в стационарном электромагнитном поле квазиклассическую картину формируют два ключевых момента времени. Первый момент принципиально связан с внешним полем и исчезает как существенно особая точка при его выключении. Второй момент определяется энергией свободной частицы на виртуальном уровне и размером источника. Именно он формирует дисперсионное соотношение для частицы и ее наблюдаемые волновые свойства, причем как вне, так и внутри источника. Общая картина для пары виртуальный + реальный (связанный) уровень во многом аналогична паре частица + античастица для *релятивистского уравнения Дирака*. Увидеть эту физическую картину можно только при конечном размере источника, т. е. рассматривая не только внешнее, но и внутреннее пространство частицы. Эффекты, связанные с внешними полями, также значительно трансформируются при учете размеров источника.

Ключевые слова: функция Грина для уравнения Шредингера, связанное состояние, сильные внешние поля, квазиклассическая картина, виртуальный уровень.

Физический смысл функций Грина основных уравнений как квантовой теории поля (Клейна-Гордона и Дирака), так и ее нерелятивистского предела – квантовой механики (Паули и Шредингера), казалось бы, хорошо известен и в дополнительном исследовании не нуждается [1, 2]. Наличие сильных внешних полей, не описываемых адекватно в рамках стандартной теории возмущений, кардинально меняет ситуацию (например, [3-7]). Общерелятивистские выражения для функций Грина во внешних полях столь сложны, что их физический анализ чрезвычайно труден, а часто и невозможен. Даже в нерелятивистском пределе, где ситуация гораздо яснее, такой анализ часто приводит к неверным выводам. В частности, о подобной ситуации с лазерным полем шла речь в монографии [7], а с постоянным магнитным полем - в работах [8, 9].

По определению, функция Грина – решение соответствующего уравнения с - функцией в правой части. Физически это означает, что пространство внутри частицы из рассмотрения исключается. Именно сведение этого пространства к точке (другими словами, представление о локальности взаимодействия [1]) и порождает «главный бич» квантовой теории поля – ультрафиолетовые расходимости. Во внешних полях ситуация значительно ухудшается, т.к. процедуры перенормировок, вполне обоснованные в однородном пространстве-времени, становятся теперь не совсем законными [7]. В такой ситуации приобретают особенную ценность простые модели, допускающие аналитические решения и позволяющие разобраться в качественной картине явления.

Такую простую модель предоставляет понятие *идеальной квантовой точки*, введенное в обзоре [8]. Это 0-мерные полупроводниковые гетероструктуры ковариантного типа (т.е. создающие потенциальный барьер для дырок), позволяющие локализовать только один электрон. В интересующем нас аспекте пространство внутри

идеальной точки может служить моделью внутреннего пространства элементарной частицы. Моделью, разумеется, чрезвычайно примитивной; в реальности внутреннее пространство частицы имеет, как минимум, $6+1$ измерение (возможно, намного больше) и представляет собой одно из допустимых многообразий Калаби - Яу [11]. Тем не менее, как будет показано ниже, даже простая потенциальная яма позволяет формально ввести в рассмотрение внутреннее пространство частицы и получить новые результаты, обусловленные *только его наличием*.

Удерживающий потенциал квантовой точки мы берем в виде прямоугольной потенциальной ямы радиусом R и глубиной U_0 . В качестве решения вне ямы $r > R$ можно использовать функцию Грина в электрическом поле [3, 12, 13], описывающую локализованный в яме s -состояние

$$G^{ex}(r, 0) \sim \int_{-\infty}^0 dt \cdot t^{-\frac{3}{2}} \cdot \exp(\varphi),$$

$$\varphi = \frac{i}{\hbar} \left(\frac{mr^2}{2t} - \frac{1}{2} eEzt + Wt - \frac{(eE)^2 t^3}{24m} \right),$$

где t – время, r – радиус – вектор (центр источника в начале координат), m – обычная масса электрона во внешнем пространстве (не исключено, что во внутреннем она другая), E – напряженность электрического поля, направленная по оси z , W – комплексная энергия электрона с $Re(W) < 0$ для связанного состояния. Слагаемое $eEzt/2$ в экспоненте, нарушающее сферическую симметрию задачи, в дальнейшем можно опустить [13, 14].

Видим, что волновую функцию частицы (точнее, амплитуду перехода частицы из точки $r = 0$ в точку наблюдения r) формируют все моменты времени, предшествующие данному. Однако основной вклад (квазиклассическую картину), согласно [3], дают моменты, связанные с точками стационарной фазы $d\varphi/dt = 0$. Их, как легко убедиться, две:

$$t_0^{(1,2)} = -\frac{\sqrt{2}i\hbar}{(-2W)\beta} \left[1 \mp (1 - \alpha^2)^{1/2} \right]^{1/2}, \alpha = \frac{eEr}{-2W}, \beta = \frac{eE\hbar}{\sqrt{-2mW}(-2W)},$$

причем выбор знака корней здесь диктуется исключительно принципом причинности: стационарные точки должны лежать в нижней комплексной полуплоскости [15].

Ясно, что сшивать волновую функцию придется на границе ямы $r = R$. Квазиклассическое приближение определяется двумя безразмерными параметрами α и β . Их физический смысл совершенно ясен – это отношение работы поля на длине потенциальной ямы (α) или на "дебройлевской длине" (β) к удвоенной энергии связи уровня. Реальный импульс частицы внутри ямы, разумеется, равен $\sqrt{2m(U_0 + W)}$.

Входящий в β импульс $\sqrt{-2mW}$ – это импульс свободной частицы на так называемом виртуальном уровне [16], т.е. на свободном уровне, энергия которого совпадает по модулю с энергией связи частицы. Именно о его дебройлевской волне шла речь выше. Это очень важный и явно недооцененный результат, который ранее обсуждался только в теории α -распада ядра. Отметим, что в пределе ямы нулевого радиуса параметр α вообще не возникает. При небольшом радиусе ямы R и небольшой, по сравнению с глубиной ямы, энергии связи частица большую часть времени проводит вне ямы.

Чтобы понять физический смысл точек стационарной фазы (3), создающих квазиклассическую картину, рассмотрим отдельно случай слабого $\alpha \ll 1$ и сильного $\alpha \gg 1$ электрического поля. В слабом поле первая точка

$$t_0^{(1)} \approx R\sqrt{-m/2W} + O(E^2) \approx R/v + O(E^2),$$

где v – классическая скорость частицы именно на виртуальном уровне. Это классическое время пролета *виртуальной* частицы из центра ямы к краю, к которому внешнее поле дает малые поправки. Таким образом, поведение частицы вне источника формирует *пара уровней* с энергиями $|W|$ и $-|W|$, симметричными относительно вакуума. Напомним, что речь здесь идет не о *релятивистском* уравнении Дирака, а о следующем из него [1] *нерелятивистском* уравнении Шредингера. Видимо, здесь мы имеем дело с неким *релятивистским артефактом*, проявляющимся только при конечных размерах источника.

Вторая точка стационарной фазы в том же приближении

$$t_0^{(2)} \approx 2\sqrt{-2mW}/eE + O(R^2).$$

Легко видеть, что это момент времени, когда импульс кулоновской силы eE вдвое превысит начальный импульс частицы, опять-таки, на виртуальном уровне. Классическая аналогия – частица вылетает из ямы против поля и отражается от потенциального барьера, созданного полем. Здесь, напротив, размер ямы дает малые поправки, так что этот вклад выживает и в пределе δ -потенциала и определяет мнимую часть энергии (ее можно связать с вероятностью распада частицы).

Для полноты картины кратко рассмотрим и случай очень сильного электрического поля $\alpha \gg 1$. Два корня в этом приближении практически сливаются

$$t_0^{(3)} \approx \exp\left(-\frac{i\pi}{4}\right)\sqrt{\frac{2m^*R}{eE}}\left(1 \pm \frac{i}{2\alpha}\right),$$

различаясь лишь малыми поправками $\sim 1/\alpha \sim W$. И здесь классический смысл легко просматривается – это время равноускоренного движения частицы (с ускорением eE/m^*) от центра к краю ямы. Ясно, что начальный запас энергии частицы $-W$ дает лишь малые поправки к главному члену.

К сожалению, объем данной заметки не дает возможность подробно рассмотреть физический смысл полного выражения для функции Грина во внешнем пространстве, оно довольно громоздко [13, 14]. Отметим лишь, что в слабых полях, где “геометрический” и “полевой” вклады практически не перемешиваются, этот смысл вполне ясен и полностью согласуется с ранее описанным смыслом ключевых моментов времени. В сильном поле они практически сливаются, и структура функции Грина столь существенно меняется, что частица теряет многие из привычных свойств. Причина вполне понятна: все наши привычные представления о поведении частиц базируются на *свободных состояниях*. В слабых полях решения к ним близки, что и облегчает физическую интерпретацию решений.

Внутри источника функция Грина имеет принципиально иной вид

$$G^{in}(r, 0) \sim \int_0^\infty dt \cdot t^{-\frac{3}{2}} \cdot [\exp(i\varphi') - i \exp(-i\varphi')] \\ \varphi' = \frac{i}{\hbar} \left(\frac{m^* r^2}{2t} + (U_0 + W)t - \frac{(eE)^2 t^3}{24m^*} \right).$$

Здесь, как видим, два слагаемых, в отличие от внешнего пространства. Это объясняется наличием падающей на границу и отраженной от нее волн де-Бройля. В целом точки стационарной фазы в интеграле по времени имеют ту же природу и структуру, что и во внешнем пространстве. Однако значительно меняет дело тот факт, что кинетическая энергия частицы теперь $U_0 + W$. Соответственно, возникают две различные ситуации в зависимости от соотношения W и U_0 : уровень может быть мелкий $-W \ll U_0$ (тогда частицу называют слабосвязанной [16]) и глубокий $-W \sim U_0$. Естественно, физическая интерпретация в первом случае гораздо проще, поскольку ситуация ближе к свободной частице. С описанием глубоких уровней все значительно сложнее.

Для слабосвязанной частицы хорошо известны и давно изучаются два эффекта, связанных с электрическим полем – штарковский сдвиг и ионизация (уширение) уровня [12, 2, 5, 6]. Первый считается пертурбативным эффектом, ведущим себя с ростом поля $\sim E^2$ в первом порядке теории возмущений. Второй (вероятность ионизации или распада связанного уровня) $\sim \beta \cdot \exp(-2/3\beta)$ – растет экспоненциально и исчезает при выключении поля как существенно особая точка. Все это относится к приближению – потенциала, когда точки стационарной фазы типа $t_0^{(1)}$ и связанного с ней вклада нет. В пространстве внутри источника аналогичный момент времени

$$t_0^{(4)} \approx R\sqrt{m/2(U_0 + W)} + O(E^2) \approx R/v' + O(E^2),$$

v' – классическая скорость пролета частицы внутри источника от центра к краю ямы на реальном уровне. А вот вклад другой точки в функцию Грина

$$t_0^{(5)} \approx 2\sqrt{2m(U_0 + W)}/eE + O(R^2)$$

– дает никем ранее не описанный эффект *осцилляций* штарковского сдвига и вероятности распада уровня [13]. Эти осцилляции тем *быстрее и меньше по амплитуде*, чем меньше напряженность поля. Практически важно, что эти осцилляции могут существенно повысить вероятность распада уровня, в слабом поле экспоненциально малую. Именно так и должен “уходить” вклад существенно особой точки при выключении поля.

Еще один новый эффект, проявляющийся при учете конечных размеров источника – *правило отбора* для параметров источника и массы частицы. Простейшее условие сшивки логарифмической производной на границе источника

$$\sqrt{(U_0 + W)} \cdot \text{ctg} \left(R\sqrt{2m(U_0 + W)}/\hbar \right) = -\sqrt{-W}.$$

Для слабосвязанного уровня $-W \ll U_0$ это приводит к условию на размер источника, фактически задающему новое правило квантования

$$R\sqrt{2mU_0} \approx \pi(n + 1/2)\hbar.$$

Только при выполнении этого условия глубокая потенциальная яма может локализовать слабосвязанную (т.е. почти свободную) частицу.

Сформулируем краткие выводы. Отход от приближения -ямы как образа пространства *внутри* частицы во внешнем поле позволяет получить целый ряд новых результатов. Один из самых интересных такого рода результатов – аналогия пары реальный (связанный) + виртуальный уровень нерелятивистского уравнения Шредингера паре античастица + частица релятивистского уравнения Дирака. Другими

словами, и в классическом пределе сохраняются некоторые *релятивистские артефакты* фундаментальной квантовополевой картины. Важно, что конкретное правильное представление о свойствах пространства внутри частицы (по-сути, главная задача физики суперструн, пока весьма далекая от решения) не так сильно влияет на наблюдаемые свойства частицы, как само наличие этого внутреннего пространства. Образно выражаясь, как и Черная Дыра, микрочастица “не имеет волос” (известная теорема Израэля – Бекенштейна – Хоукинга).

Литература

1. Н.Н. Боголюбов, Д.В. Ширков. Введение в теорию квантованных полей. М.: Наука, 1984.
2. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Квантовая механика. Нерелятивистская теория. М.: Наука, 1974.
3. Р. Фейнман, А. Хибс. Квантовая механика и интегралы по траекториям. М.: Мир, 1968.
4. В.И. Ритус. Квантовые эффекты взаимодействия элементарных частиц с интенсивным электромагнитным полем. Труды ФИАН, Т. 111. М.: Наука, 1979.
5. А.И. Никишов, В.И. Ритус. Влияние лазерного поля на β -распады и ядер и другие процессы, идущие в отсутствие поля. Труды ФИАН, Т. 168. М.: Наука, 1986.
6. И.М. Тернов, В.Р. Халилов, В.Н. Родионов. Взаимодействие заряженных частиц с сильным электромагнитным полем. М.: Издательство МГУ, 1982.
7. А.Е. Шабад. Поляризация вакуума и квантового релятивистского газа во внешнем поле. Труды ФИАН, Т.192. М.: Наука, 1988.
8. V.N. Rodionov, G.A. Kravtsova and A.M. Mandel'. //Doklady Physics, 2002, **47** (10), pp. 725-727.
9. Родионов В.Н., Кравцова Г.А., Мандель А.М. //Письма в ЖЭТФ. 2002. т.75. вып.8. С.435-439.
10. Леденцов В.М., Устинов В.М., Щукин В.А., Копьев П.С., Алферов Ж.И., Бимберг Д. //ФТП, 1998, т.32, №4, с.385-410.
11. М. Каку. Введение в теорию суперструн. М.: Мир, 1999.
12. Ю.Н. Демков, Г.Ф. Друкарев. Распад и поляризуемость отрицательного иона в электрическом поле. //ЖЭТФ. 1964. Т.47. № 3(9). С.918-924.
13. А.М. Мандель, В.Б. Ошурко. //Квантовая электроника. 2018. Т.48. №1. С.49-56.
14. А.М. Мандель, В.Б. Ошурко, С.М. Першин, Е.Е. Карпова. //ДАН. 2022, Т.505, С.25-28.
15. Н.М. Nussenzveig. Causality and Dispersion Relations. Academic Press, New York and London 1972.
16. А.И. Базь, Я.Б. Зельдович, А.М. Переломов. Рассеяние, реакции и распады в нерелятивистской квантовой механике. М.: Наука, 1971.

ОБ ОПТИМАЛЬНОМ ОБЪЕМЕ ВЫБОРКИ ПРИ ОЦЕНКЕ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ РАНДОМИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ИТЕРИРОВАННЫХ ФУНКЦИЙ

П. В. Москалев¹, А. Г. Буховец²

¹ Московский государственный технологический университет “СТАНКИН”,
Россия, Москва, 127055, Вадковский пер., 1

² Воронежский государственный аграрный университет имени Императора Петра I,
Россия, Воронеж, 394087, ул. Мичурина, 1

E-mail: moskaleff@mail.ru; abuhovets@mail.ru

Поиск общих подходов к описанию физических процессов и эффективных характеристик в таких гетерогенных системах как аэрозоли, пены, эмульсии, золи и пористые тела привели к выделению теории дисперсных систем в особый раздел, сначала в физической химии, а затем и в математическом моделировании. В качестве одного из эффективных средств моделирования пространственной структуры таких систем, начиная с последних десятилетий XX века могут рассматриваться рандомизированные системы итерированных функций (RIFS), описанные М. Барнсли в 1988 году [1].

Как показано в [2] для построения реализации RIFS применимы два алгоритма, которые условно можно обозначить как последовательный и параллельный. Последовательный алгоритм основан на формуле деления отрезка в заданном отношении и записывается в виде итерационной схемы вида:

$$x_{i+1} = \frac{x_i + \mu z_{ij}}{1 + \mu} \quad \text{для } i = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

где $x_i \in X \subset \mathbf{R}^n$ – простая бесповторная выборка N точек множества X , которое считается реализацией РСИФ; $z_{ij} \in Z \subset \mathbf{R}^n$ – выборка с повторениями N точек множества Z , соответствующая закону распределения $P = \{p_j | z_j\}$ при том, что $p_1 + p_2 + \dots + p_{km} = 1$; $\mu \in \mathbf{R}^+$ – положительный параметр RIFS, соответствующий коэффициенту разбиения итерационного отрезка.

На рис. 1 показаны примеры выборочных реализаций X_{km} , порождаемых равномерно распределенными ($p_1 = p_2 = \dots = p_k = 1/km$) квадратными множествами Z_{km} , с различным числом точек $km = 4, 8, 12$ при различных значениях параметра $\mu = 1, 2, 3$.

Все показанные на рис. 1 реализации X_{km} построены с помощью функции «preRIFS()» из пакета «RIFS», выпущенного авторами для системы R на условиях свободной лицензии GNU GPL-3 [3]. Указанные реализации X_{km} соответствуют выборочным множествам из $N = 5 \cdot 10^4$ точек, равномерно заполняющих квадраты Серпинского первого, второго и третьего порядков, размерности подобия которых d_s для реализаций X_{km} определяются как [4]:

$$d_s = -\frac{\ln km}{\ln \xi} = \frac{\ln k + \ln m}{\ln(1 + \mu)}, \quad (2)$$

где km – число точек порождающего множества Z ; ξ – коэффициент подобия, связанный с параметром RIFS соотношением $\xi = 1/(1 + \mu)$.

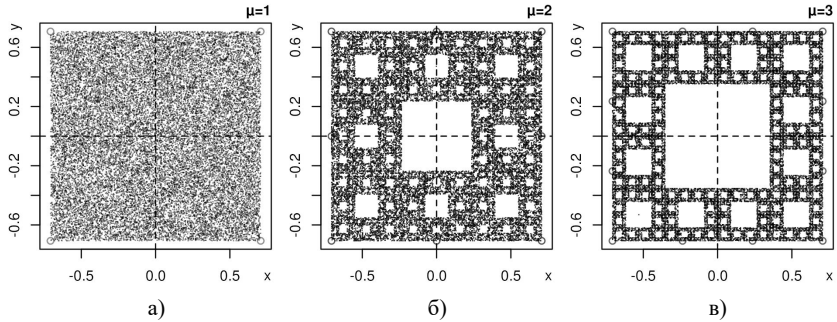


Рис. 1. Выборочные реализации X объемом $N = 5 \cdot 10^4$ точек для различных множеств Z и значений параметра μ : а) $X_{41}(Z_{41} | \mu = 1)$; б) $X_{42}(Z_{42} | \mu = 2)$; в) $X_{43}(Z_{43} | \mu = 3)$

Нетрудно видеть, что определение (2) дает априорную оценку фрактальной размерности множеств, аппроксимируемых выборочными реализациями X_{km} , которые могут иметь различный объем N . В связи с этим возникает вопрос об оценке объема выборки N , оптимального для достижения заданной точности аппроксимации фрактального множества. В качестве метрики качества воспользуемся апостериорными оценками фрактальной размерности множеств X_{km} по методу клеточной размерности d_B [5].

Все анализируемые реализации множеств X_{km} сохранились в виде графических файлов формата PNG в цветовом пространстве оттенков серого с разрешением 8 бит на пиксель и пространственным разрешением 1024×1024 пикселей. Для получения оценок d_B использовалось программное обеспечение ImageJ, распространяемое на условиях свободной лицензии GNU GPL-3 [6].

Корреляционные поля оценок клеточной размерности $d_B(N|X_{km})$ в зависимости от объема выборки $N = \{1, 2, 3, 5, 8, 13, 22, 36, 60, 100\} \times 10^4$ точек для различных реализаций РСИФ показаны на рис. 2 следующими символами: X_{31} – «красный круг»; X_{32} – «желтый квадрат»; X_{41} – «зеленый ромб»; X_{42} – «синий треугольник вверх»; X_{43} – «фиолетовый треугольник вниз». Тонкими сплошными горизонтальными линиями соответствующих цветов показаны априорные оценки размерности подобия $d_S(X_{km})$, сделанные в соответствии с (2). Штриховыми горизонтальными линиями соответствующих цветов показаны уровни $0,975 \cdot d_S(X_{km})$, используемые для оценки нижних значений объемов выборок, оптимальных для получения апостериорных оценок $d_B(N|X_{km})$.

Все показанные реализации с ростом числа точек N демонстрируют сходимость апостериорных оценок $d_B(N|X_{km})$ к априорным $d_S(X_{km})$, что позволяет сформулировать первую эмпирическую гипотезу:

$$\lim_{N \rightarrow +\infty} d_B(N) = d_S. \quad (3)$$

Предельное соотношение (3), с учетом проведенных вычислительных экспериментов, также позволяет сформулировать вторую эмпирическую гипотезу о применимости показательно-степенной аппроксимации оценок $d_B(N|X_{km})$ в виде:

$$d_{Bij} = d_{sj} \left[1 - \exp \left(-\frac{N_i^{b_2}}{b_1} \right) \right] + e_i, \quad (4)$$

где $b = (b_1, b_2)$ – вектор масштабных коэффициентов; e_i – вектор аддитивных ошибок показательно-степенной модели (4), минимизируемый нелинейным методом наименьших квадратов. Нетрудно проверить, что лежащая в основе модели (4) функция проходит через начало координат, монотонно возрастает при $N > 0$ и ограничена сверху горизонтальной асимптотой $d_B \rightarrow d_S$ при $N \rightarrow +\infty$.

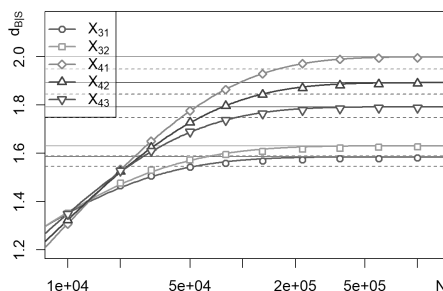


Рис. 2. Сходимость апостериорных оценок $d_B(N|X_{km})$ к априорным $d_S(X_{km})$ в зависимости от объема выборки N для реализаций RIFS: X_{31} , X_{32} , X_{41} , X_{42} , X_{43}

Аппроксимации вида (4) для различных реализаций RIFS X_{km} показаны на рис. 2 утолщенными сплошными линиями соответствующих цветов. Для оценки параметров регрессионной модели использовалась функция «`gsl_nls()`» из пакета «`gslnls`», выпущенного под лицензией GNU GPL-3 для системы R [7]. Пример результата, полученного при построении аппроксимации вида (4) для оценок клеточной размерности d_{B1} показанной на рис. 16 реализации квадратного множества Серпинского X_{42} при различных объемах выборки N_i , приведены в следующем листинге.

Formula: $db42 \sim ds42 * (1 - \exp(-N^{b2}/b1))$

Parameters:

Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)

b1 46.557341 1.994288 23.34 1.20e-08 ***

b2 0.437154 0.004275 102.27 9.34e-14 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.003599 on 8 degrees of freedom

Number of iterations to convergence: 23

Achieved convergence tolerance: 1.368e-16

В целом, качество построенной аппроксимации можно охарактеризовать как хорошее. Если использовать в качестве метрики качества остаточное стандартное отклонение (RSE), то можно показать, что радиусы доверительных интервалов для прогнозируемых значений $d_B(N = 5 \cdot 10^4 | \{X_{41}, X_{42}, X_{43}\})$ не будут превышать 1,5%.

Анализируя представленные результаты, можно увидеть, что для получения апостериорных оценок клеточной фрактальной размерности $d_B(N|X_{km})$ для квадратных множеств Серпинского X_{41} , X_{42} , X_{43} с погрешностью, не превышающей 2,5%, необходимо использовать объем выборки $N \geq 2 \cdot 10^5$ точек. В то же время для получения апостериорных оценок клеточной фрактальной размерности $d_B(N|X_{km})$ для треугольных множеств Серпинского X_{31} , X_{32} с погрешностью, не превышающей 2,5%, вполне можно ограничиться вдвое меньшим объемом выборки $N \geq 1 \cdot 10^5$ точек.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № FSFS-2024-0007).

Литература

1. Barnsley M. *Fractals Everywhere*. – New York: Academic Press, 1993. – 534 p. – DOI: [10.1016/C2013-0-10335-2](https://doi.org/10.1016/C2013-0-10335-2).
2. Bukhovets A. G., Bukhovets E. A. Modeling of fractal data structures // *Automation and Remote Control*. – 2012. – V. 73. – P. 381-385. – DOI: [10.1134/S0005117912020154](https://doi.org/10.1134/S0005117912020154).
3. Moskalev P. V., Bukhovets A. G., Biruchinskay T. Ya. RIFS: Random Iterated Function System. – CRAN: Contributed Packages, 2022. – DOI: [10.32614/CRAN.package.RIFS](https://doi.org/10.32614/CRAN.package.RIFS).
4. Москалев П. В., Буховец А. Г. О размерности подобия рандомизированной системы итеративных функций // *Компьютерные исследования и моделирование*. – 2012. – Т. 4, № 4. – С. 681-691. – DOI: [10.20537/2076-7633-2012-4-4-681-691](https://doi.org/10.20537/2076-7633-2012-4-4-681-691).
5. Москалев П. В. Перколяционное моделирование пористых структур. – М.: URSS, 2018. – 240 с. – EDN: [ZRJ5WD](https://www.edn.ru/ZRJ5WD).
6. ImageJ: Image Processing and Analysis in Java. – URL: <https://imagej.net/ij/> (online: 29.11.2024).
7. Chau J. gslnls: GSL Multi-Start Nonlinear Least-Squares Fitting. – CRAN: Contributed Packages, 2024. – DOI: [10.32614/CRAN.package.gslnls](https://doi.org/10.32614/CRAN.package.gslnls).

ОБ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОЕКТНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АНАЛИЗА ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

Т.Ю. Махина, Т.В. Рыжкова

РЭУ им. Г.В. Плеханова, Москва, Россия
117997 Российская Федерация, г. Москва, Стремянный пер., 36,
Тел.: +7 (499) 236-7373. E-mail: tmakhina@mail.ru

Актуальным инновационным трендом развития высшего образования сегодня становится индивидуализация обучения. Инновационные подходы к процессу образования требуют сочетания академических методов преподавания с индивидуально-проектным методом организации самостоятельной работы. Как следствие, возникает необходимость формирования индивидуальной образовательной траектории (ИОТ), предусматривающей активное участие студентов [1,2] в образовательном процессе. Индивидуализация обучения как одно из стратегических направлений развития отечественного образования обозначена в нормативно-правовых документах Российской Федерации. Приоритетным проектом «Вузы как центры пространства создания инноваций» предусмотрено, что к 1 декабря 2025 года все образовательные программы инженерного, социально-экономического и отдельные программы естественно-научного и гуманитарного профилей должны содержать практико-ориентированные компоненты, предполагающие командное выполнение проектов полного цикла. В этой связи авторы обращают внимание коллег на тематику учебных дисциплин естественно-научного направления, связанных с анализом временных рядов и предлагают к рассмотрению обзор студенческих проектных работ.

В прикладных исследованиях в технических, экономических областях часто приходится иметь дело или со стохастическими стационарными рядами наблюдений, или с отличающимися от стационарных наличием легко выделяемых компонент: трендов, сезонных, периодических составляющих. Поэтому выделяют два подхода в анализе временных рядов: первый связан со временем, и его называют анализом временных рядов во временной области; второй – с использованием частотных характеристик рядов. Учитывая изложенную выше сложность изучения теоретических основ статистических методов, студентам технических и экономических специальностей университета необходимо знать математику в достаточно серьезном объеме. Тематику по анализу временных рядов часто относят к дополнительным главам дисциплины математическая статистика, поэтому она не представлена в блоке дисциплин базового математического цикла. В виду большой практической востребованности в анализе временных рядов целесообразно было бы включать эту тематику в программы дисциплин профессиональной ориентации, представляемых в вариативной части математического цикла, как курсы по выбору.

Литература

1. Положение об организации проектного обучения в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова». – Москва
URL: <https://www.rea.ru/ru/org/managements/uchmetupr/Documents>.
2. ТГУ: передовые технологии для смешанного обучения // Ректор вуза. – 2021. – № 03. – С. 34–47.
3. Лукашин Ю.П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов. – М.: Экономика и финансы, 2003. – 416 с.

ДВИЖЕНИЕ ФРОНТА В ЗАДАЧЕ РЕАКЦИЯ-ДИФФУЗИЯ В СЛУЧАЕ БАЛАНСА РЕАКЦИИ И ДИФФУЗИИ

Махмудов А. Р.¹, Орлов А. О.²

1) МГУ, физический факультет, кафедра математики, Москва, Россия
Tel.: (+7 988) 078 75 38, email: makhmudov.ar21@physics.msu.ru

2) МГУ, физический факультет, кафедра математики, Москва, Россия
Tel.: (+7 919) 765 13 96, email: orlov.andrey@physics.msu.ru

В работе рассматривается проблема существования решения вида движущегося фронта в сингулярно возмущенной задаче реакция-диффузия:

$$\begin{cases} \varepsilon^2 \frac{\partial}{\partial x} \left(D(u, x, \varepsilon) \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \varepsilon^2 \frac{\partial u}{\partial t} - f(u, x, \varepsilon) = 0, & x \in (-1, 1), t \in (0, T], \\ \frac{\partial u}{\partial x}(-1, t, \varepsilon) = 0, \frac{\partial u}{\partial x}(1, t, \varepsilon) = 0, & t \in [0, T] \\ u(x, 0, \varepsilon) = u_{init}(x, \varepsilon), & x \in [-1, 1]. \end{cases}$$

Постановки начально-краевых задач для уравнения реакция-диффузия в случае нелинейной диффузии, допускающие решения с внутренними переходными слоями, могут быть успешно использованы для математического моделирования процессов популяционной динамики, а также в задачах нелинейной теории теплопроводности. При этом особый интерес представляет случай баланса между реакцией и нелинейной диффузией:

$$\int_{\varphi^{(-)}(x)}^{\varphi^{(+)}(x)} f(u, x, 0) D(u, x, 0) du = 0, x \in [-1, 1],$$

$\varphi^{(\pm)}(x)$ – устойчивые корни нелинейности кубического типа.

Для рассматриваемой задачи в работе построена асимптотика решения с внутренним переходным слоем, приведен алгоритм нахождения членов ряда асимптотического приближения для скорости движения фронта. Показано, что скорость дрейфа контрастной структуры нулевого порядка определяется путем анализа асимптотического приближения 1 порядка. Для доказательства теоремы существования и единственности использован асимптотический метод дифференциальных неравенств Нефедова Н. Н.

Доказано, что если, кроме условия баланса, выполнены следующие условия:

1. Функции $D(u, x, \varepsilon) \geq D_0 > 0$, $f(u, x, \varepsilon)$ являются достаточно гладкими в своих областях определения;
2. Вырожденное уравнение $f(u, x, 0) = 0$ имеет ровно три решения $u = \varphi^{(\pm, 0)}(x)$;
3. Начальная функция $u_{init}(x, \varepsilon)$ представляет контрастную структуру типа ступеньки, которая заключена между верхним и нижним решениями задачи. Начальное положение фронта известно и задаётся координатой $x^0 \in (-1, 1)$;
4. Задача Коши для нулевого приближения положения фронта

$$\begin{cases} \frac{dx_0}{dt} = K(x_0), & t > 0, \\ x_0(0) = x^0, \end{cases}$$

где K – функция, возникающая в процессе построения асимптотики и определяемая неоднородностью задачи, причём требуем $K(x) \neq 0$ при $x \in [-1, 1]$, имеет решение $x^0(t) \in [-1, 1]$ при $t \in [0, T]$, то задача имеет единственное решение, и формально

построенная по методу Васильевой асимптотика является равномерным приближением для него при достаточно малых ϵ .

Полученные результаты могут быть использованы при изучении формирования резких переходных слоев в таких задачах, а также при разработке эффективных численных методов решения сингулярно возмущенных задач с внутренними слоями.

Работа поддержана грантом РФФ 23-11-00069.

Литература

1. Нефедов Н.Н., Никулин Е.И., Орлов А.О. Движение фронта в задаче со слабой адвекцией в случае непрерывного источника и источника модульного типа // Дифференц. ур-ния (2022) **58**, №6, с. 763–776.
2. Нефедов Н.Н. Развитие методов асимптотического анализа переходных слоев в уравнениях реакции-диффузии-адвекции: теория и применение // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. (2021) **61**, №12, с. 2068–2087.

О СВЯЗИ ПЕРЕХОДНЫХ ФУНКЦИЙ С ОЦЕНКАМИ МОЩНОСТИ СТЫГИВАЮЩИХ КЛАСТЕРОВ НА БЕТА-ВЗВЕШЕННЫХ КВАДРАТНЫХ РЕШЕТКАХ С (1, 0)-ОКРЕСТНОСТЬЮ

П. В. Москалев^{1,2}, А. С. Мягков¹

¹ Московский государственный технологический университет “СТАНКИН”,
Россия, Москва, 127055, Вадковский пер., 1

² Воронежский государственный технический университет,
Россия, Воронеж, 394006, ул. 20-летия Октября, 84

E-mail: moskaleff@mail.ru; almyagkov99@yandex.ru

Основные результаты исследований в математической теории протекания (перколяции) за последние полвека были получены для так называемого термодинамического предельного перехода (для $x \rightarrow \infty$). В то же время применение моделей решеточной перколяции в прикладных исследованиях в основном базируется на решетках ограниченного размера (для $x < \infty$). Построение аппроксимаций статистически устойчивых характеристик перколяционных кластеров на таких решетках обычно основано на различных сигмоидных функциях [1, 2]. Так при аппроксимации относительных частот стягивающих кластеров по выборке $\{w_i(p_i)\}$ на решетках конечного размера хорошие результаты дает применение симметричных сигмоидных функций:

$$w_i = \frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{p_i - b_0}{b_1}\right)} + e_i \quad \text{для } i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

где p_i – статистическая оценка достижимости (относительная доля) узлов перколяционной решетки; b_0, b_1 – сдвиговой и масштабный параметры, первый из которых связан с порогом перколяции, а второй – с размером решетки. Нетрудно проверить, что функция (1) ограничена интервалом оси ординат от 0 до 1, возрастает на всей числовой оси, симметрична относительно точки перегиба с координатами $(b_0; 0,5)$ и имеет две горизонтальные асимптоты:

$$\lim_{p \rightarrow -\infty} w(p) = 0 \quad \text{и} \quad \lim_{p \rightarrow +\infty} w(p) = 1. \quad (2)$$

Основные трудности при статистической оценке параметров функций вида (1) состоят в том, что в силу предельных свойств (2) для выборок ограниченного объема информационной значимостью обладает лишь некоторая симметричная ограниченная окрестность точки перегиба $I_{0,95}(p_c) = (b_0 \pm \varepsilon(b_1))$, центр которой определяется сдвиговым параметром b_0 модели (1), а ее радиус $\varepsilon(b_1)$ коррелирует с масштабным параметром b_1 модели (1).

Как было показано в работе [3], мощность перколяционных кластеров $P_x(p)$ в термодинамическом пределе (при $x \rightarrow \infty$) для сверхкритических долей достижимых узлов (при $p \geq p_c$) определяется как:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} P_x(p) = \begin{cases} 0, & p < p_c; \\ F_0(p), & p \geq p_c, \end{cases} \quad p_c = F_0^{-1}(p_0), \quad (3)$$

где p_c – порог перколяции, априорно определяемый для данной решетки p_0 -квантилем интегральной функции распределения $F_0(p)$ случайной величины S , взвешивающей узлы перколяционной решетки; $p_0 = 0,592746$ – уровень квантиля для квадратной решетки с $(1, 0)$ -окрестностью.

Тогда для аппроксимации оценок мощности перколяционных кластеров на ограниченных решетках $\{P_{xi}(p_i)\}$ можно воспользоваться произведением интегральной функцией распределения $F_0(p)$ взвешивающей перколяционную решетку случайной величины S и некоторой переходной функции $F(p) = F_1(p)F_2(p)$, то есть:

$$P_{xi} = F_0(p_i) F_1(p_i) F_2(p_i) + e_i, \quad (4)$$

где $F(p)$ – в общем случае асимметричная сигмоидная функция, представление которой, обсуждавшееся в наших работах [4, 5], будет существенно влиять на качество аппроксимации модели вида (4). Ранее в работе [4] было показано, что для квадратных перколяционных решеток малого размера (при $x < 65$ узлов с $(1, 0)$ -окрестностью) удовлетворительное качество аппроксимации может быть достигнуто с помощью простой логистической аппроксимации:

$$F_1(p) = \frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{p-b_0}{b_1}\right)}, \quad F_2(p) = 1, \quad (5)$$

но с увеличением размера перколяционной решетки x качество аппроксимации для моделей (4) и (5) быстро падает из-за роста асимметрии переходной функции $F(p)$. В работе [5] для решения этой проблемы предлагается построение билогистической асимметричной сигмоидной функции вида:

$$F_1(p) = \frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{p-b_0}{b_1}\right)}, \quad F_2(p) = \frac{2}{1 + \exp\left(-\frac{p-b_2}{b_3}\right)} - 1, \quad (6)$$

которая в силу различия масштабных параметров b_1 и b_3 позволяет легко моделировать существенную асимметрию $F(p)$, что повышает общее качество аппроксимации моделей (4) и (6) как для квадратных, так и для кубических решеток. Вместе с тем вполне ясно, что это не единственный вариант для построения асимметричных сигмоидных функций $F(p)$. Например, анализ формулы (6) показывает, что $F_2(p)$ допускает упрощение путем замены логистической функции на аналог интегральной функции показательного распределения, после чего асимметричную (в общем случае) переходную функцию $F(p)$ можно записать в более простой форме:

$$F(p) = \frac{1 - \exp\left(-\frac{p-b_2}{b_3}\right)}{1 + \exp\left(-\frac{p-b_0}{b_1}\right)}. \quad (7)$$

Статистические данные для оценок мощности перколяционных (стягивающих) кластеров $\{P_{xi}(p_i)\}$ будем формировать по выборке объемом $N = 500$ реализаций. Статистика представляет собой усредненные вдоль верхней границы квадратной решетки относительные частоты узлов в кластерах со стартовым подмножеством вдоль нижней границы этой решетки. Стягивающие кластеры строятся на бета-взвешенных квадратных решетках размером $x = 65$ узлов с $(1, 0)$ -окрестностью для показательного распределенных значений долей достижимых узлов $p_i = p_c \pm \Delta p_i$, где $\Delta p_i = 0, 3-4,8, 3-4,5, \dots, 3-1,5$.

На рис. 1 показаны корреляционные поля выборок оценок мощностей $\{P_{xi}(p_i)\}$ и переходных функций $\{F_i(p_i)\}$ для стягивающих кластеров на квадратных решетках, взвешенных бета-распределенными случайными величинами: $S_1 \sim B(1, 2)$; $S_2 \sim B(1, 1)$; $S_3 \sim B(2, 1)$, интегральные функции распределения которых показаны на рис. 1а выпуклыми вверх, вниз и прямыми штриховыми линиями, соединяющими точки с координатами (0, 0) и (1, 1). Горизонтальными штриховыми линиями показаны характерные значения мощностей стягивающих кластеров: $P_x = 0; 0,592746; 1$, вертикальными штриховыми линиями – характерные значения долей достижимых узлов: $p = 0; 0,361835; 0,592746; 0,769900; 1$. При этом нетривиальные значения долей достижимых узлов соответствуют априорным оценкам (3) для порогов перколяции $pc_{1|2|3}$ для квадратных решеток с (1, 0)-окрестностью, взвешенных случайными величинами $S_{1|2|3}$.

Применение вертикальных и горизонтальных линий на рис. 1б в целом аналогично их применению на рис. 1а. Нетрудно видеть, что величины масштабных параметров b_1 и b_3 для функций $F_1(p)$ и $F_3(p)$ различаются почти на порядок, что позволяет модели (7) адекватно учитывать существенную асимметрию переходной функции $F(p)$.

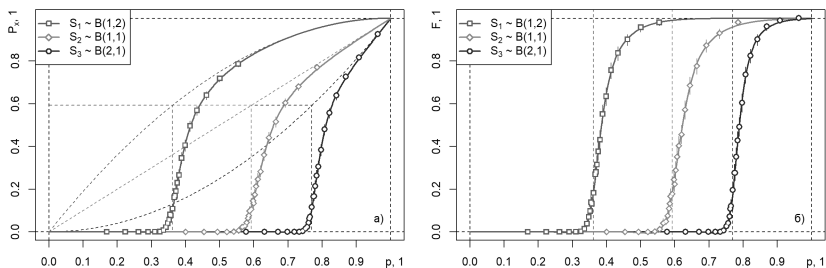


Рис. 1. Аппроксимации вида (4), (7) для мощностей стягивающих кластеров $\{P_{xi}(p_i)\}$ и переходных функций $\{F_i(p_i)\}$ на бета-взвешенных квадратных решетках для различных $S_{1|2|3}$ по сетке долей достижимых узлов $p_i = p_c \pm \Delta p_i$, где $\Delta p_i = 0, 3^{-4,8}, 3^{-4,5}, \dots, 3^{-1,5}$

Все результаты на рис. 1 были получены с использованием функции «ssi20()» из пакета “SPSL”, выпущенного автором для системы R под лицензией GNU GPL-3 [6]. Для оценки параметров регрессионной модели использовалась функция “gsl_nls()” из пакета “gslnls”, выпущенного под лицензией GNU GPL-3 для системы R [7]. Примеры результатов, полученных при построении аппроксимаций вида (4), (5) и (4), (7) для мощностей стягивающих кластеров по долям достижимых узлов для квадратных решеток с (1, 0)-окрестностью, взвешенных случайной величиной $S_2 \sim B(1, 1)$, приведены в следующем листинге.

Formula: $P_{xb} \sim pbeta(p, 1, 1) * F1(p, b0, b1)$

Parameters:

Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)

b0 0.624557 0.001329 470.10 < 2e-16 ***

b1 0.022861 0.001213 18.85 1.75e-15 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.02201 on 23 degrees of freedom

Number of iterations to convergence: 14

Achieved convergence tolerance: 2.082e-17

Formula: $P_{xb} \sim p_{\text{beta}}(p, 1, 1) * F1(p, b0, b1) * F2(p, b2, b3)$

Parameters:

Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)

b0 0.6033508 0.0014372 419.80 < 2e-16 ***

b1 0.0172637 0.0004244 40.68 < 2e-16 ***

b2 0.5375818 0.0067632 79.49 < 2e-16 ***

b3 0.0727979 0.0034454 21.13 1.25e-15 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.004179 on 21 degrees of freedom

Number of iterations to convergence: 13

Achieved convergence tolerance: 3.003e-15

В целом, качество построенной аппроксимации можно охарактеризовать как хорошее. Если использовать в качестве метрики качества остаточное стандартное отклонение (RSE), то для переходной функции $F(p)$ изменение модели с (5) на (7) приводит более чем к пятикратному росту качества аппроксимации для функции $P_x(p)$ мощности стягивающих кластеров: $\sigma_{e5}/\sigma_{e7} = 0,0220/0,0042 \approx 5,24$. Нетрудно заметить, что для сдвиговых параметров модели (7) выполняются неравенства вида $b_2 < p_{c2} < b_0$.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект № 23-21-00376).

Литература

1. Ziff R. M., Newman M. E. J. Convergence of threshold estimates for two-dimensional percolation // *Physical Review E*. – 2002. – V. 86, No. 1. – P. 016129. – DOI: [10.1103/PhysRevE.66.016129](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.66.016129).
2. Москалев П. В. Перколяционное моделирование пористых структур. – М.: URSS, 2018. – 240 с. – EDN: [ZRJSWD](https://www.edn.ru/ZRJSWD).
3. Moskalev P. V. Convergence of percolation probability functions to cumulative distribution functions on square lattices with $(1, 0)$ -neighborhood // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. – 2020. – V. 553. – P. 124657. – DOI: [10.1016/j.physa.2020.124657](https://doi.org/10.1016/j.physa.2020.124657).
4. Москалев П. В., Онищенко Л. С. Об аппроксимации функций мощности перколяционных кластеров на равномерно взвешенных квадратных решетках с $(1, 0)$ -окрестностью // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: сборник трудов Международной научной конференции. – Воронеж: Научно-исследовательские публикации, 2024. – С. 564–568. – EDN: [HVSMWR](https://www.edn.ru/HVSMWR).
5. Москалев П. В., Мягков А. С. Билогистическая аппроксимация функций мощности перколяционных кластеров на ограниченных неравномерно взвешенных квадратных решетках с $(1, 0)$ -окрестностью // *PREPRINTS.RU*. – 2024. – DOI: [10.24108/preprints-3113167](https://doi.org/10.24108/preprints-3113167).
6. Moskalev P. V. SPSL: Site Percolation on Square Lattices. – CRAN: Contributed Packages, 2019. – DOI: [10.32614/CRAN.package.SPSL](https://doi.org/10.32614/CRAN.package.SPSL).
7. Chau J. gslnls: GSL Multi-Start Nonlinear Least-Squares Fitting. – CRAN: Contributed Packages, 2024. – DOI: [10.32614/CRAN.package.gslnls](https://doi.org/10.32614/CRAN.package.gslnls).

О ПЕРКОЛЯЦИОННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ РАСХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРИСТОГО ТИТАНА

П. В. Москалев^{1,2}, В. Ф. Селиванов², А. С. Мягков¹, А. А. Краснов²

¹ Московский государственный технологический университет “СТАНКИН”,
Москва, Россия, 127055, Вадковский пер., 1

² Воронежский государственный технический университет,
Воронеж, Россия, 394006, ул. 20-летия Октября, 84

E-mail: moskaleff@mail.ru; almyagkov99@yandex.ru

Распределение пор по размерам в общем случае является одной из наиболее трудноопределимых характеристик пористых структур оцениваемых, как правило, с применением косвенных физических методов [1, 2]. Выборка была сформирована из образцов пористого титана, полученных прессованием с различной степенью уплотнения электролитического титанового порошка марок ПТЭК и ПТЭС. Работы по изготовлению и исследованию образцов проводились в Воронежском государственном техническом университете в 2023–2024 годах в рамках гранта РНФ (проект № 23-21-00376), первичные результаты этих исследований были представлены в наших работах [3–5]. Для оценки распределения пор по размерам использовалось сопоставление расходных характеристик для сухих и насыщенных дистиллированной водой образцов пористого титана. На рис. 1(а) показаны примеры таких расходных характеристик для образца с эффективной пористостью $P_e = 0,394$. Аппроксимация расходной характеристики для сухого образца строилась на базе квадратичного полинома с нулевым свободным членом:

$$\frac{Q_{0i}}{Q_c} = b_1 \frac{P_i}{P_c} - b_2 \left(\frac{P_i}{P_c} \right)^2 + e_i, \quad \text{для } i = 1, 2, \dots, n_0, \quad (1)$$

где P_i, P_c — текущее и характерное значения дифференциального давления для образца, кПа; Q_{0i}, Q_c — текущее и характерное значения объемного расхода воздуха через сухой образец, $\text{дм}^3/\text{мин}$; $b_{1,2}$ — компоненты вектора параметров модели (1), оцениваемые методом наименьших квадратов по выборке $\{Q_0(P_i)\}$ объемом n_0 .

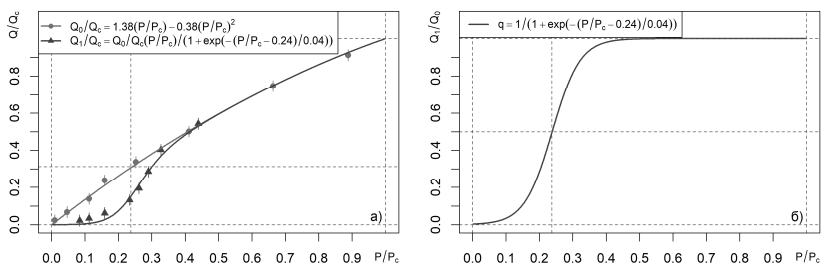


Рис. 1. Расходные характеристики для исследуемого образца пористого титана [4]:
а) аппроксимации (1) и (2); б) переходная функция (3)

Аппроксимация расходной характеристики для насыщенного дистиллированной водой образца строилась как произведение полинома (1) и логистической функции:

$$\frac{Q_{li}}{Q_c} = \frac{b_1 P_i/P_c - b_2 (P_i/P_c)^2}{1 + \exp(-(P_i/P_c - b_3)/b_4)} + e_i, \text{ для } i = 1, 2, \dots, m_1, \quad (2)$$

где Q_{li} — объемный расход воздуха через насыщенный дистиллированной водой образец, $\text{дм}^3/\text{мин}$; $b_{3,4}$ — компоненты вектора параметров модели (2), оцениваемые нелинейным методом наименьших квадратов по выборке $\{Q_{li}(P_i)\}$ объемом m_1 . Отношение функций, описывающих аппроксимации (2) и (1) позволяет записать дополнительную функцию $q(P/P_c) = Q_1(P/P_c)/Q_0(P/P_c)$, описывающую переход между функциями (2) и (1) при увеличении относительного дифференциального давления на образце P/P_c :

$$q = \frac{1}{1 + \exp(-(P/P_c - b_3)/b_4)}. \quad (3)$$

Пример переходной функции (3) для исследуемого образца пористого титана показан на рис. 1(б). Сдвиговой параметр для этого образца можно оценить на уровне $b_3 \approx 0,238$, где $P/P_c = b_3$ соответствует точке перегиба переходной функции (3).

Как показано в [4], от дифференциального давления на образце P можно перейти к гидравлическим радиусам пор r , что позволяет получить оценки как для соответствующего параметру b_3 критического радиуса пор $r_c \approx 0,018$ мм, так и для соответствующего переходной функции (3) доверительного интервала $I_{0,95}(r) = (r_0; r_1) = (0,01; 0,04)$ мм. Принимая в качестве характерных размеров цилиндрического образца высоту его образующей и диаметр основания $h = d = 16$ мм, можно получить априорную оценку линейного размера расчетной сетки:

$$N = \frac{d}{2r_1 k_1} = \frac{200}{k_1} \in [8; 13] \text{ узлов}, \quad (4)$$

где $k_1 \in [15; 25]$ — априорные оценки минимального числа пор по выделенной оси элементарного репрезентативного объема.

Одним из эффективных инструментов моделирования процессов одно- и многофазной фильтрации в пористых материалах является модели, основанные на математической теории перколяции [2]. По способу аппроксимации порового пространства среди перколяционных моделей можно выделить модели решеточной, континуальной и потенциальной перколяции. Модели решеточной перколяции, на локальном уровне, различаются по характеристикам окрестности узла перколяционной решетки (метрика и радиус окрестности), а на глобальном уровне — по характерным размерам моделируемой области, характеристикам случайной величины, взвешивающей узлы и/или связи перколяционной решетки и долям достижимых узлов и/или связей этой решетки.

Рассмотрим модель перколяции узлов на кубической решетке с линейным размером $x = 11$ узлов с (1, 0)-окрестностью, взвешенной бета-распределенной случайной величиной $S \sim \mathbf{B}(s_1, s_2)$, где параметры бета-распределения $s_1 = 0,88$ и $s_2 = 1,14$ выбраны для оптимальной аппроксимации при отображении функции (1) из интервала дифференциальных давлений $0 \leq P \leq P_c \approx 10,7$ кПа в интервал значений параметра перколяционной модели $0 \leq p \leq 1$. Для таких решеток будем рассматривать статистику образования кластеров, стягивающих решетку от верхней до нижней горизонтальных границ для различных значений параметра p .

Для аппроксимации оценок мощности перколяционных кластеров на ограниченных решетках $\{P_{xi}(p_i)\}$ будем использовать произведение интегральной функции распределения $F_0(p|S)$ взвешивающей перколяционную решетку случайной величины S и некоторой переходной функции $F_x(p) = F_1(p)F_2(p)$, то есть:

$$P_{xi} = F_0(p_i)F_1(p_i)F_2(p_i) + e_i, \quad (5)$$

где $F_x(p)$ – асимметричная сигмоидная функция, представимая в виде

$$F_1(p) = \frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{p-b_{10}}{b_{11}}\right)}, \quad F_2(p) = 1 - \exp\left(-\frac{p-b_{20}}{b_{21}}\right), \quad (6)$$

где b_{10}, b_{20} – сдвиговые, а b_{11}, b_{21} – масштабные параметры аппроксимаций (5) и (6).

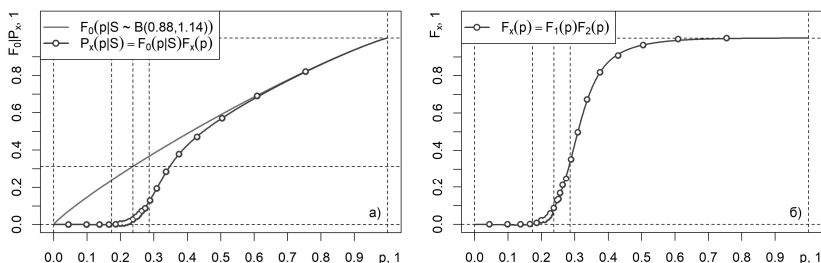


Рис. 2. Аппроксимации вида (5) и (6) для мощностей стягивающих кластеров $\{P_{xi}(p_i)\}$ и переходных функций $\{F_x(p_i)\}$ на бета-взвешенных квадратных решетках

Для статистической оценки параметров моделей (5), (6) будем использовать функцию “*gsl_nls()*” из пакета “*gsl_nls*”, выпущенного под лицензией GNU GPL-3 для системы R [6]. Сводка результатов, полученных при оценке параметров модели (5) для исследуемого образца пористого титана, приведена в листинге 1.

Листинг 1. Оценка параметров модели (5) для исследуемого образца

```
> summary(fPx)

Formula: Px ~ pbeta(p, s[1], s[2]) * F1(p, b10, b11) * F2(p, b20, b21)

Parameters:

Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)

b10 0.2859400 0.0021060 135.78 < 2e-16 ***
b11 0.0325224 0.0008439 38.54 < 2e-16 ***
b20 0.1735621 0.0093556 18.55 4.51e-14 ***
b21 0.0991442 0.0041905 23.66 4.27e-16 ***

---

Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Residual standard error: 0.002384 on 20 degrees of freedom

Number of iterations to convergence: 14

Achieved convergence tolerance: 5.607e-15

а основе приведенных статистических показателей показанные на рис. 2 аппроксимаций (5) и (6) можно охарактеризовать как хорошие. В то же время сопоставление параметров моделей (5) и (2) демонстрирует достаточно сложную структуру аппроксимации, необходимой для описания перколяционной модели при наблюдаемом сочетании параметров. В частности, заслуживает дополнительного исследования взаимосвязь апостериорных оценок сдвиговых и масштабных параметров функций (3) и (6) с репрезентативным объемом пористой среды: $b_{20} < b_3 < b_{10}$ и $b_{21} > b_4 > b_{11}$.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект № 23-21-00376).

Литература

- [1] Плачев Т. Г., Колосенцев С. Д. Порометрия. – Л.: Химия, 1988.
- [2] Москалев П.В. Перколяционное моделирование пористых структур. – М.: URSS, 2018. – 320 с. – EDN: [ZRJSWD](#).
- [3] Москалев П. В., Онищенко Л. С. // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: сборник трудов Международной научной конференции. – Воронеж: Научно-исследовательские публикации, 2024. – С. 564-568. – EDN: [HVSMMWR](#).
- [4] Москалев П. В., Селиванов В. Ф., Бокарев Д. И. и др. // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: сборник трудов Международной научной конференции. – Воронеж: Научно-исследовательские публикации, 2024. – С. 569-572. – EDN: [AZQKPM](#).
- [5] Москалев П. В., Селиванов В. Ф., Онищенко Л. С. и др. // Моделирование нелинейных процессов и систем: материалы VII Международной конференции. – М.: Янус-К, 2024. – С. 141-144. – EDN: [URTRWX](#).
- [6] Chau J. gslnls: GSL Nonlinear Least-Squares Fitting. – CRAN, 2024. – DOI: [10.32614/CRAN.package.gslnls](#).

ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ СИМВОЛЬНОЙ РЕГРЕССИИ В ПЕРКОЛЯЦИОННЫХ ЗАДАЧАХ

А.С. Мягков, Л.А. Уварова, П.В. Москалев

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,
Москва, Россия, 127055, Вадковский пер., 1

E-mail: almyagkov99@yandex.ru

Анализ свойств нелинейных моделей аппроксимации в различных прикладных задачах представляет собой важнейшую, однако, вместе с тем крайне трудоемкую задачу. В ряде случаев математическая модель не может быть представлена в аналитической форме, несмотря на наличие численных аппроксимаций. Особый интерес представляет процесс извлечения данной информации о виде математической модели и ее параметрах, которые связаны некоторой функциональной зависимостью. Иногда удается подобрать необходимую аналитическую формулу, и определить значения параметров модели посредством применения нелинейного МНК.

В последнее время, в связи с стремительным развитием теории и технологий проектирования нейронных сетей, а также адаптивных методов многомерной оптимизации, например, генетических алгоритмов активно внедряется аппарат символьной регрессии. В данной работе рассматривается применение методов символьной регрессии в теории перколяции, строго говоря – в задачах аппроксимации функции мощности перколяционного кластера.

Ряд статистических оценок характеристик кластеров на решетках конечной размерности [1,2], зависят от значений вероятности образования этих кластеров. Аппроксимация эмпирических зависимостей в этом случае основана на использовании асимметричных сигмоидных моделей, например логистических функций [3]. При этом характер поведения модели в предельных случаях, а также вид модели и число функциональных параметров выбирается исходя из физических соображений анализируемого явления. Как показано в работе [4] можно выделить несколько различных вариантов построения подобной аппроксимации функции мощности. Например, можно рассматривать модели вида (1-2)

$$F_1(p) = \frac{1 - \exp(-(p - a_2)/b_2)}{1 + \exp(-(p - a_1)/b_1)}, \quad (1)$$

$$F_2(p) = \frac{1}{1 + \exp(-(p - a_1)/b_1)}. \quad (2)$$

В качестве модели для аппроксимации функции мощности перколяционных кластеров $P_x(p|s)$ будем использовать функцию вида:

$$P_x(p|s) = F_0(p|s)F(p), \quad (3)$$

где $F_0(p|s_1, s_2) = \mathbf{B}(p|s_1, s_2)/\mathbf{B}(s_1, s_2)$ – функция бета распределения взвешивающей узлы перколяционной решетки случайной величины S ; $F(p) = F_1(p)F_2(p)$ – асимметричная функция вида (1) или (2). При этом a_1, a_2 – параметры сдвига, определяющие абсциссы точек перегиба отдельных компонент $F_1(p)$ и $F_2(p)$ функции (2); b_1, b_2 – параметры

масштаба, радиусы асимметричного интервала значений параметра $p \in (p_c - \varepsilon_1, p_c + \varepsilon_2)$, p_c – значение порога перколяции. Отметим, что пороговые значения перколяции $p \approx p_c$ определяются параметрами взвешивающего распределения: а) $S \sim \mathbf{B}(1, 2)$, $p = 0.3618$; б) $S \sim \mathbf{B}(1, 1)$, $p = 0.5927$; в) $S \sim \mathbf{B}(2, 1)$, $p = 0.7699$.

Положим, что имеется некоторых массив значений, описывающий зависимость числа узлов кластера m на неравномерно взвешенных квадратных решетках от вероятности открытых узлов (корреляционные поля). Требуется подобрать на основании эмпирических данных, некоторую функциональную зависимость, учитывающую асимметрию. В качестве входных переменных рассматриваются значения масштабных и сдвиговых параметров a, b . Эту задачу можно решать с применением различных пакетов и библиотек программ, в которых реализован нелинейный МНК.

Однако, в данной работе представлена идея нахождения аналитической функциональной зависимости, аппроксимации, основанная на применении методов машинного обучения в комбинации с генетическим алгоритмом оптимизации. Существует ряд проблемно-ориентированного ПО, в которых реализованы методы символьной регрессии. Например, пакеты QLatice, Operon, Eureqa, GPLearn, PySR [5]. Последняя библиотека имеет весь необходимый инструментарий и имеет программную реализацию на языке Julia: “SymbolicRegression.jl”, которая и используется в данной работе.

Большинство алгоритмов символьной регрессии, реализованных в виде вышеописанных программных модулей и библиотек, основано на идее, описанной в работе [6]. Рассматривается, генетический алгоритм с несколькими эволюциями, выполняемыми асинхронно. Основной цикл алгоритма, работающий с каждой популяцией, независимо является модификацией классического эволюционного алгоритма отбора индивидуального элемента (особи), с возможностью осуществления мутаций и кроссоверов, необходимых для генерации новых особей.

В качестве элементов, позволяющих построить аналитическое выражение рассматриваются классические бинарные операторы “+”, “-”, “/”, “*” и простейшие унарные операторы – асимметричные сигмоидальные модели содержат такие операторы как $[\exp(\cdot), \tanh(\cdot)]$. По сути, имеем граф аналитической зависимости, вершины которого представляют собой различные элементарные функции, а связи между узлами – некоторые операторы, в общем случае нелинейные. Таким образом, алгоритм символьной регрессии подбирает некоторую аппроксимацию в виде комбинации операторов и констант различного уровня сложности.

Исходные данные представляют собой выборку реализаций, полученных с помощью функции библиотеки “SPSL” для системы R [7]:

- а) “fssi20(n = 300, x = 129, p = 0.3618, shape = c(1, 2))”;
- б) “fssi20(n = 300, x = 129, p = 0.5927, shape = c(1, 1))”;
- в) “fssi20(n = 300, x = 129, p = 0.7699, shape = c(2, 1))”.

Вызов функции, инициализация параметров модели, выбранных операторов, необходимых для построения аналитической аппроксимации в “SymbolicRegression.jl” представлен ниже:

```
# значение порога перколяции и параметра сдвига
pc = .769900 .+ 0.01 .* rand(24)
s = 0.05 .+ 0.05 .* rand(24)
# df1_21.pp -- обучающая выборка
X = hcat(df1_21.pp, pc, s)
```

```

Y = df1_21.Finf
# параметры модели символьной регрессии
model1 = SRRegressor(
    niterations=1000,
    populations=50,
    population_size=30,
    binary_operators=[+, -, *, /],
    unary_operators=[exp, tanh],
    should_simplify=true,
    use_frequency=true,
    parallelism=:multiprocessing,
    nested_constraints = [exp => [exp => 0], tanh => [tanh => 0]],
)
# обучение и тренировка модели
mach1 = machine(model1, X, Y)
fit!(mach1)
# результат работы и вывод наилучшего приближения (функции)
result = predict(mach1, X)
r = report(mach1)
println(r.equations[r.best_idx])

```

Ниже в таблице 1 представлен пример полученных зависимостей, при определенных значениях доли достижимости узлов решетки и масштабных параметрах.

Таблица 1. Аналитические зависимости аппроксимаций функции мощности $S \sim \mathbf{B}(1,1)$

$S \sim \mathbf{B}(1,1)$	$P_{sr}(p s) = \frac{(\alpha_1 p - \lambda_1)(1 + \tanh(\alpha_2 p - \beta_1 s - \lambda_3))}{\alpha_3 p - \lambda_2}, \quad (4)$	$MSE_{\max} \approx 6.610e-6,$
	$F_{sr}(p s) = \tanh\left(\frac{p - \gamma_1}{\exp(\gamma_2 + a(\alpha_1 p - \alpha_2 p^2)) + \gamma_3}\right) p^2, \quad (5)$	$MSE_{\max} \approx 1.0256e-5,$

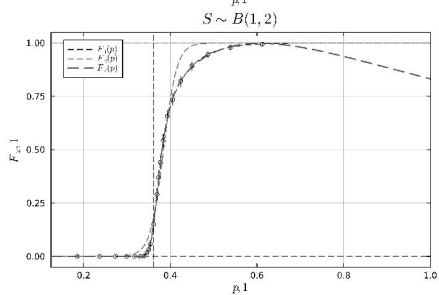
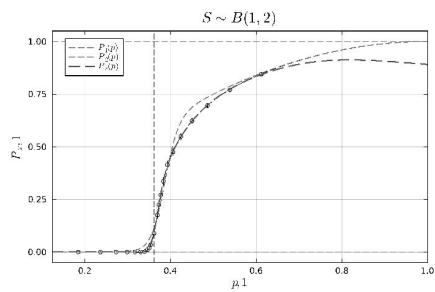
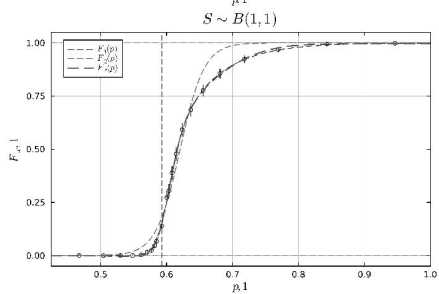
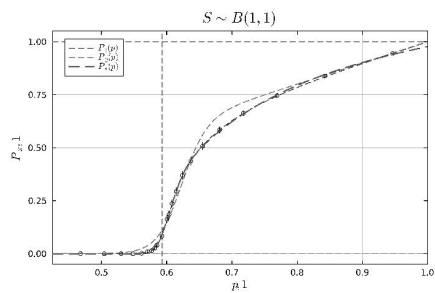
здесь $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ – коэффициенты, a, s – параметры сдвига и масштаба.

Полученные зависимости существенно сложнее с точки зрения формального описания модели, а также представляют произведение дробно-линейных функций, степенных функций. При этом, в ряде случаев, некоторые параметры, например, значение порога перколяции не учитывается при построении модели.

Ниже соответственно представлены графики аппроксимаций функции мощности моделями (1)–(2), а также полученными аналитическими зависимостями.

Очевидно, что полученные зависимости не являются оптимальными, и могут усложнить анализ свойств нелинейной модели рассматриваемого явления. Более того, в ряде случаев, алгоритмы не учитывают параметры, которые физически обуславливают процессы протекания при докритических и закритических значениях вероятности открытых узлов. Стоит отметить, что по сравнению с классическими методами регрессии, в том числе и нелинейным МНК, временные затраты подбора зависимости и оценки значений модельных параметров существенно возрастают.

Одним из способов оптимизации данного процесса является проектирование пользовательских шаблонов операторов, учитывающих физические закономерности. Например, инициализация предельных значений функций, уточнение границ модельных параметров. Рассматриваемые в данной работе модели, например, допускают представление в виде ряда, разложения по базису некоторых функций, подбор которых можно как раз осуществить с применением методов символьной регрессии.



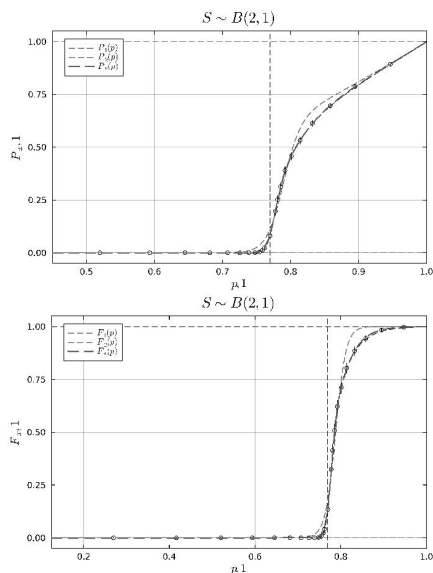


Рис. 1. Аппроксимации функции мощности функциями вида (1)–(4): утолщенной пунктирной линией показана аппроксимация, найденная с помощью алгоритмов символьной регрессии

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (проект № FSFS-20240007).

Список литературы

1. Москалев П. В. Перколяционное моделирование пористых структур / П. В. Москалев. – М.: URSS, 2018. – 240 с. – EDN: ZRJSWD.
2. Ziff R. M., Newman M. E. J. Convergence of threshold estimates for two-dimensional percolation // Physical Review E. – 2002. – V. 66, No. 1. – P. 016129. – DOI: 10.1103/phys-reve.66.016129.
3. Москалев П. В. Об аппроксимации функций мощности перколяционных кластеров на равномерно взвешенных квадратных решетках с (1,0)-окрестностью / П.В. Москалев, Л.С. Онищенко // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: сборник трудов Международной научной конференции. – Воронеж: Научно-исследовательские публикации, 2024. – С. 564–568. – EDN: HVSMWR.
4. Москалев П.В., Мягков А.С. О связи переходных функций с оценками мощности стягивающих кластеров на бета-взвешенных квадратных решетках с (1, 0)-окрестностью. – PREPRINTS.RU, 2024. – DOI: 10.24108/preprints-3113192.
5. Cranmer M. Interpretable machine learning for science with PySR and SymbolicRegression. jl. – arXiv preprint, 2023. – DOI: 10.48550/arXiv.2305.01582.
6. Goldberg D.E., Deb K. A comparative analysis of selection schemes used in genetic algorithms // In Book: Foundations of Genetic Algorithms. – 1991. – V. 1. – P. 69–93. – DOI: 10.1016/B978-0-08-050684-5.50008-2.
7. Moskaev P. V. SPSL: Site Percolation on Square Lattices. – CRAN, 2019. – DOI: 10.32614/CRAN.package.SPSL.

МЕТОД ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО РАЗЛИЧЕНИЯ ИЗОМЕРОВ МОЛЕКУЛЯРНЫХ СТРУКТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТРИЦ РАССТОЯНИЙ

Назаренко К.М., Коробов Н.А., Марков П.Н., Назаренко Е.С., Надыкто А.Б.

МГТУ «СТАНКИН» Россия, 127055, г. Москва, ул. Вадковский пер. 1;

Тел.: (+7 499)972-95-00, E-mail: cmr.nazy@gmail.com

При проведении конформационного поиска молекулярных кластеров решаются задачи многомерной оптимизации. При этом множество получаемых локальных минимумов, как правило, представляет собой группы изомеров схожей геометрической конфигурации. Отметим, что как при использовании различных начальных условий, так и при повторной оптимизации одних и тех же конфигураций, полученные результаты могут существенно различаться. Последний факт, вероятно, объясняется применением в ряде реализаций используемых алгоритмов метода случайного поиска [1].

Рассмотрение всей совокупности результатов, как правило, не требуется, и для исследования свойств молекулярных кластеров вполне достаточно использовать наиболее стабильные изомеры из каждой группы, а в особых случаях – несколько изомеров из группы. Такое цензурирование рассматриваемых данных позволяет существенно сократить затраты вычислительного времени. Для выбранного уровня теории, при применении одной и той же математической модели и в рамках одной ее реализации, выявление таких групп, как правило, может быть произведено на основе значений свободной энергии Гиббса и модуля дипольного момента молекулярного кластера [2]. Однако, при использовании различных квантово-химических моделей электронной структуры и даже различных реализаций одних и тех же моделей получаемые характеристики молекулярных кластеров могут существенно различаться [3].

В таких случаях единственным методом сравнения и группировки получаемых изомеров является непосредственный анализ взаимного расположения атомов молекулярных кластеров. Общепринятой практикой описания различий геометрических конфигураций молекулярных структур является перечисление отличающихся расстояний и углов между соответствующими атомами структур и образованными ими плоскостями. Данные величины измеряются исследователями вручную на основе 3D-моделей в специальных редакторах таких как GaussView [4] и Chemcraft [5]. И если при сравнении нескольких систем относительно небольшого размера и/или несложной структуры такой подход применим, то при проведении конформационного поиска молекулярных кластеров атмосферного происхождения, в котором участвуют результаты моделирования сотен-тысяч их изомеров, выполнение этой работы вручную не представляется возможным.

Смежной с описанной задачей является отыскание среди имеющихся результатов моделирования изомеров со структурой, наиболее похожей на данную, что требует ранжирования по мере отличия от неё.

Нами предлагается метод сравнения геометрических конфигураций молекулярных структур, основанный на анализе разностей их матриц расстояний.

Такой подход позволяет не только оценить степень различия геометрических структур друг от друга, но и установить его причины, а именно – указать наиболее сильно смещенные атомы кластеров.

Рассмотрим применение метода для синтетических данных. На рисунке 1 взаимное расположение вершин А, В, С, D, Е не изменяется в то время как вершины F и G перемещаются относительно них.

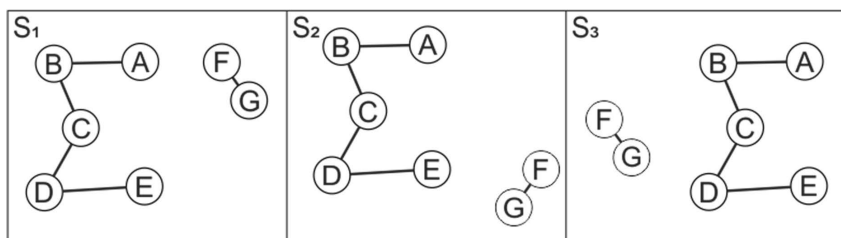


Рис. 1. Примеры структур, образованные перемещением вершин F и G относительно неподвижных вершин A, B, C, D, E

Матрицы расстояний для структур S_1 , S_2 , S_3 соответственно равны:

$$\hat{\rho}(S_1) = \begin{pmatrix} 0.00 & 1.90 & 1.94 & 3.53 & 2.71 & 1.80 & 2.54 \\ 1.90 & 0.00 & 1.52 & 2.81 & 3.34 & 3.70 & 4.37 \\ 1.94 & 1.52 & 0.00 & 1.61 & 1.89 & 3.41 & 3.75 \\ 3.53 & 2.81 & 1.61 & 0.00 & 2.20 & 4.82 & 4.92 \\ 2.71 & 3.34 & 1.89 & 2.20 & 0.00 & 3.19 & 2.96 \\ 1.80 & 3.70 & 3.41 & 4.82 & 3.19 & 0.00 & 1.02 \\ 2.54 & 4.37 & 3.75 & 4.92 & 2.96 & 1.02 & 0.00 \end{pmatrix},$$

$$\hat{\rho}(S_2) = \begin{pmatrix} 0.00 & 1.90 & 1.94 & 3.53 & 2.71 & 3.69 & 4.02 \\ 1.90 & 0.00 & 1.52 & 2.81 & 3.34 & 5.15 & 5.17 \\ 1.94 & 1.52 & 0.00 & 1.61 & 1.89 & 4.01 & 3.83 \\ 3.53 & 2.81 & 1.61 & 0.00 & 2.20 & 4.60 & 4.06 \\ 2.71 & 3.34 & 1.89 & 2.20 & 0.00 & 2.40 & 1.98 \\ 3.69 & 5.15 & 4.01 & 4.60 & 2.40 & 0.00 & 1.02 \\ 4.02 & 5.17 & 3.83 & 4.06 & 1.98 & 1.02 & 0.00 \end{pmatrix}$$

$$\hat{\rho}(S_3) = \begin{pmatrix} 0.00 & 1.90 & 1.94 & 3.53 & 2.71 & 4.58 & 4.34 \\ 1.90 & 0.00 & 1.52 & 2.81 & 3.34 & 2.78 & 2.80 \\ 1.94 & 1.52 & 0.00 & 1.61 & 1.89 & 3.11 & 2.58 \\ 3.53 & 2.81 & 1.61 & 0.00 & 2.20 & 2.79 & 1.86 \\ 2.71 & 3.34 & 1.89 & 2.20 & 0.00 & 4.73 & 3.95 \\ 4.58 & 2.78 & 3.11 & 2.79 & 4.73 & 0.00 & 1.02 \\ 4.34 & 2.80 & 2.58 & 1.86 & 3.95 & 1.02 & 0.00 \end{pmatrix}.$$

Рассмотрим матрицы абсолютных значений разностей построенных матриц расстояний:

$$|\hat{\rho}(S_1) - \hat{\rho}(S_2)| = \begin{pmatrix} 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.89 & 1.47 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.45 & 0.79 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.59 & 0.08 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.22 & 0.86 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.79 & 0.98 \\ 1.89 & 1.45 & 0.59 & 0.22 & 0.79 & 0.00 & 0.00 \\ 1.47 & 0.79 & 0.08 & 0.86 & 0.98 & 0.00 & 0.00 \end{pmatrix}$$

$$|\hat{\rho}(S_2) - \hat{\rho}(S_3)| = \begin{pmatrix} 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.89 & 0.32 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 2.36 & 2.37 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.90 & 1.24 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.81 & 2.20 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 2.33 & 1.97 \\ 0.89 & 2.36 & 0.90 & 1.81 & 2.33 & 0.00 & 0.00 \\ 0.32 & 2.37 & 1.24 & 2.20 & 1.97 & 0.00 & 0.00 \end{pmatrix}$$

$$|\hat{\rho}(S_1) - \hat{\rho}(S_3)| = \begin{pmatrix} 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 2.78 & 1.79 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.92 & 1.58 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.31 & 1.17 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 2.03 & 3.07 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.54 & 0.98 \\ 2.78 & 0.92 & 0.31 & 2.03 & 1.54 & 0.00 & 0.00 \\ 1.79 & 1.58 & 1.17 & 3.07 & 0.98 & 0.00 & 0.00 \end{pmatrix}.$$

Нулевые строки (столбцы) матриц позволяют выявить смещенные атомы молекулярной структуры. Таким образом, анализ данных разностей матриц позволяет определить насколько сильны геометрические различия изомеров друг от друга, а также сделать вывод о том, какие атомы существенно изменили свое положение относительно других.

С использованием данного подхода нами исследованы результаты [3] моделирования гидратов серной кислоты на уровне теории 6-311++G(3df,3pd) [6] с использованием проблемно-ориентированных пакетов прикладных программ Gaussian 09 [7] и Orca [8]. Геометрические конфигурации результатов моделирования дигидрата серной кислоты представлены на рис. 1.

Для ранжирования сходства изомеров нами используются метрики различия в виде среднего значения модуля разности (m_1), максимальное значение модуля разности (m_2), нормированное на число атомов молекулярного кластера, а также максимальной суммы строки модулей разностей матриц расстояний (m_3). Рассмотрим панельные данные этих метрик для дигидратов серной кислоты, приведенных на рисунке 2. В таблице 1 приведены значения метрик m_1 , m_2 , m_3 для моделей геометрических конфигураций изомеров, полученных с использованием пакетов Gaussian09 и Orca. Анализ таблицы 1 позволяет сделать вывод о том, что результаты оптимизации, проводимой каждым из рассматриваемых пакетов по всем трем метрикам, выделяют одинаковое количество изомеров. В таблице 2 приведены значения метрик попарного сравнении расположения атомов в результатах моделирования различными пакетами.

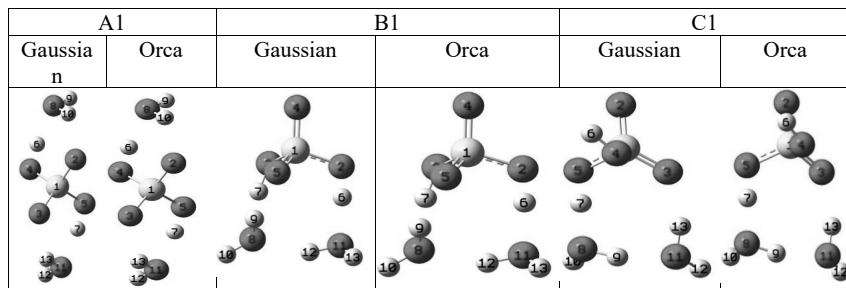


Рис. 2. Геометрические конфигурации изомеров дигидрата серной кислоты, результаты моделирования в пакетах Gaussian09 и Orca

Таблица 1. Метрики различия между изомерами дигидратов серной кислоты

Метрики различия изомеров для результатов Gaussian09									
Метрика	A1			B1			C1		
	A1	B1	C1	A1	B1	C1	A1	B1	C1
m ₁	0.00	1.19	0.97	1.19	0.00	0.71	0.97	0.71	0.00
m ₂	0.00	1.70	1.94	1.70	0.00	1.41	1.94	1.41	0.00
m ₃	0.00	22.06	25.24	22.06	0.00	18.31	25.24	18.31	0.00
Метрики различия изомеров для результатов Orca									
Метрика	A1			B1			C1		
	A1	B1	C1	A1	B1	C1	A1	B1	C1
m ₁	0.00	1.20	0.98	1.20	0.00	0.71	0.98	0.71	0.00
m ₂	0.00	1.73	1.98	1.73	0.00	1.41	1.98	1.41	0.00
m ₃	0.00	22.52	25.73	22.52	0.00	18.39	25.73	18.39	0.00

Таблица 2. Метрики различия между результатами моделирования дигидратов серной кислоты различными пакетами

		Gaussian09			Метрика
		A1	B1	C1	
Orca	A1	0.02	1.19	0.97	m ₁
		0.05	1.69	1.94	m ₂
		0.63	22.02	25.23	m ₃
	B1	1.20	0.00	0.71	m ₁
		1.74	0.01	1.41	m ₂
		8 22.56	12 0.16	18.39	m ₃
	C1	0.98	0.71	0.00	m ₁
		1.98	1.41	0.01	m ₂
		25.73	18.31	0.12	m ₃

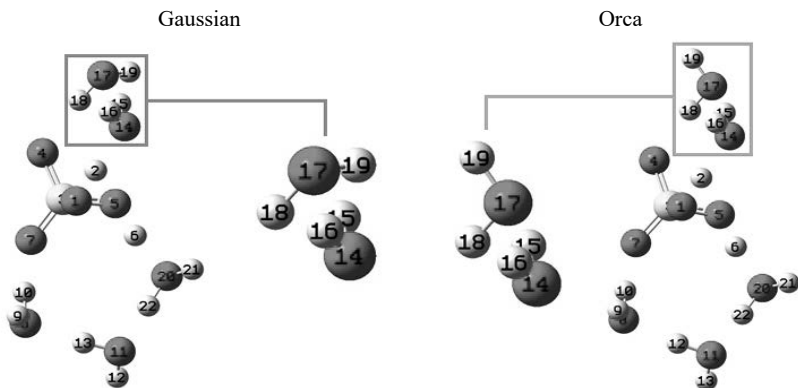


Рис. 3. Положения молекул воды в изомерах пентагидрата серной кислоты (слева, справа), характеризующиеся малыми изменениями положений атомов водорода (крупно по центру)

В результате установлено, что лишь в небольшом числе случаев полученные геометрические конфигурации существенно отличаются друг от друга. Отметим, что

применение данных методик малочувствительно к различиям положения молекул воды, представленным на рисунке 3. Особенностью представленных конфигураций является малые различия в координатах атомов водорода 18, 19 (около 0.2Å).

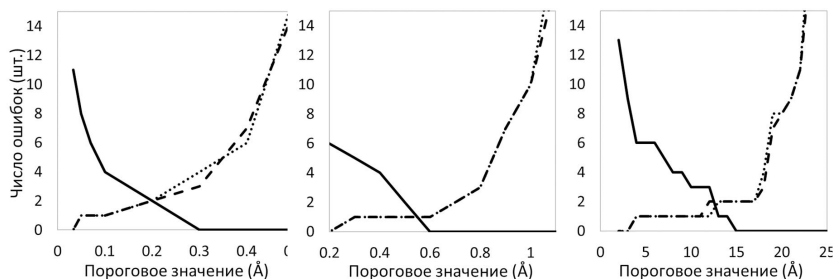


Рис. 4. Ошибки первого типа Gaussian – точки; Ошибки первого типа Orca – штрих; Ошибки второго типа Gaussian Orca – сплошная линия

При наличии в структуре изучаемых изомеров подобных особенностей нами предлагается выбирать пороговые значения метрик, выше которых геометрические структуры будут считаться разными исходя из равенства (или близости) числа установленных ложных сходств/различий. На рисунке 4 приведен график эмпирической зависимости количества ложных установленных сходств/различий от значения порога для метрик m_1 , m_2 , m_3 , наблюдаемой при исследовании гидратов серной кислоты.

Анализ рисунка 4 позволяет сделать вывод о том, что при использовании каждой из метрик m_1 , m_2 , m_3 существует единственный оптимум порогового значения, обеспечивающий минимальное количество ошибок первого и второго рода.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения государственных заданий FSFS-2024-0007 и FSFS-2024-0011.

Литература

1. Назаренко Е.С. и др. Статистическое оценивание производительности конформационного поиска // Самарские чтения (в память об академике А.А. Самарском). – 2022. – С. 183. ISBN-978-5-8037-0841-4
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018612048 от 09.02.2018г. «Программное средство идентификации данных математического моделирования молекулярных структур (Близнец)», Назаренко К. М. и др.
3. Назаренко К.М. и др. Особенности реализаций алгоритмов конформационного поиска // Моделирование нелинейных процессов и систем (MNPS - 2023). Сборник тезисов седьмой международной конференции, 2023, с 151. ISBN 978-5-8037-0943-5.
4. <https://gaussian.com/gaussview6/>
5. <http://www.chemcraftprog.com/ru/>
6. Назаренко Е.С. Особенности моделирования формирования газофазных гидратов в атмосфере. // Естественные и технические науки. 2017. №9. С. 83-91.
7. <https://gaussian.com/>
8. <https://orcaforum.kofo.mpg.de/>

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ МЕТОДА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА

MODERN APPROACHES TO THE USE OF THE SEQUENTIAL ANALYSIS METHOD

К.Э. Никитина-Кошкина¹, Г.В. Кошкина², Е.Е. Фомина², Н.А. Стукалова²

¹ Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Тверской области
170100, г. Тверь, ул. Советская, 35
e-mail: kris22t@rambler.ru

² ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»
170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22
Тел.: +7 (4822) 78-91-90

В настоящее время в навигации при определении и корректировке траекторий движущихся объектов предлагается методика обнаружения, основанная на последовательном анализе с элементами нечеткого логического вывода.

Необходимо отметить, что продолжительность последовательного анализа - случайная величина, однако для независимой однородной выборки с вероятностью единица число шагов конечно, т. е. бесконечное время анализа исключено [1]. В то же время при статистически близких гипотезах анализ может оказаться весьма длительным, в этом случае применяют так называемую усеченную процедуру, в которой число шагов анализа ограничено сверху. В этом случае, если по достижении максимального числа шагов решение об обнаружении последовательным критерием не принято, процесс прекращается принятием решения, основанным на критерии, оперирующем фиксированной выборкой.

Поскольку при обнаружении траектории данные поступают последовательно через относительно большие промежутки времени, равные периоду обзора, использование методов статистического последовательного анализа в силу их преимуществ представляется вполне оправданным.

Для упрощения процесса моделирования можно использовать искусственные нейронные сети (ИНС). Основное преимущество их использования для моделирования движения объектов заключается в том, что они могут адекватно интерпретировать основные понятия теории движения динамических систем (траектория, параметры фазового состояния, параметр управления, время, возмущения и др.). Нейронные сети обладают свойствами, которые позволяют отражать особенности и сложные ситуации вариантов поведения движущегося объекта. Важно отметить, что в нейросетях реализована операция передачи возбуждений, что предполагает наличие в них межнейронных связей, формируемых в виде обучаемых матриц их передачи [2]. Преимущества применения нейроструктур включают:

а) ассоциативность, которая позволяет обрабатывать множество траекторий и работать с образами ситуаций моделирования, а не ограничиваться их отдельными описаниями;

б) способность к обучению, что дает возможность получать стабильные решения в результате имитационного моделирования прикладных задач в реальном времени [3].

Эти достоинства подчеркивают эффективность использования искусственных нейронных сетей для моделирования движения как отдельных, так и групп объектов.

Применение ИНС значительно упрощает процесс моделирования движения, а также облегчает принятие решений о возможных траекториях объектов, включая разнообразные стратегии поведения и широкие возможности маневрирования в зонах ответственности измерительных систем.

Литература

1. Вальд А. Последовательный анализ / под ред. Б.А. Севастьянова. М.: Государственное изд-во физико-математической литературы. 1960. 329 с.
2. Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети. М.: Горячая линия. Телеком, 2002. 382 с.
3. Круглов В.В., Дли М.И., Голунов Р.Ю. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. М.: Изд-во Физико-математической литературы, 2001. 224 с.

АНАЛИЗ РЕНТГЕН-СНИМКОВ ГРУДНОЙ КЛЕТКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ АППАРАТА ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

В.К. Нуриев, Е.М. Красикова

ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

127055, Россия, Москва, Вадковский пер., 3а, Тел.: (+7 996)349-27-98, e-mail:
vlad.nuriev.12@mail.ru, krasikova-cat7@yandex.ru

Аннотация. В работе рассматривается разработка программного модуля, нацеленного на обучение компьютерной системы. Акцентируется внимание на распознавании компьютерной системой изображений рентген-снимков грудной клетки с целью расшифровки симптомов заболевания посредством аппарата искусственных нейронных сетей. Проведен анализ способов и методов распознавания рентген-снимков грудной клетки, разработан алгоритм программного модуля и выполнено его тестирование с подведением основных итогов.

Ключевые слова: рентген-снимки, нейронные сети, программный модуль, техническое зрение.

В настоящее время компьютерное зрение очень востребованная отрасль, особенно в мире ИТ. Несмотря на то, что развитие компьютерного зрения происходит небольшими темпами, выбор производственных предприятий часто падает именно на него. Дело в том, что подобные системы применяются для неограниченного спектра производственных задач, в том числе для автоматизации технологических процессов.

На данный момент существует некоторое количество систем для распознавания рентген-снимков. Такие системы ставят перед собой задачу оптического распознавания специфических отклонений, что является одной из ключевых задач распознавания заболеваний.

Применение системы технического зрения для автоматизации определения симптомов заболеваний, сократит время проведения этой процедуры, кроме того, компьютерное зрение имеет большой спрос для повышения качества, например, проверки размеров и расстояний.

Соответственно, возникла идея применить AI к области распознавания изображений там, где и врачи занимаются распознаванием изображений, а именно к анализу снимков и, для начала, рентгеновских снимков.

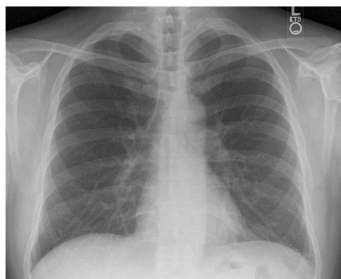


Рис 1.1. Рентген-снимок грудной клетки

Рентгеноскопия применяется для диагностики широкого спектра заболеваний и повреждений: повреждения легких (пневмония, раковые заболевания), переломы и иные повреждения костей, часть диагностики работы системы пищеварения и много чего другого.

Если в данных для обучения, которые загружают в систему, есть предвзятость, то результаты получатся неточными. Это бывает при небольшой выборке, недостаточном качестве обучающего материала. Чтобы распознавание было эффективным, требуются качественные базы данных. Обучающие изображения должны размечаться опытными врачами-рентгенологами. Неточности могут возникать, если патология нестандартная и встречается редко, если модель не учила её определять.

Сама интеграция ИИ-систем в медицинские учреждения — сложная и трудоёмкая задача, требующая слаженной работы всех участников процесса. Это главная задача, на решение которой требуется и время, и ресурсы.

В конечном итоге, был выбран обширный датасет для обучения нейронной сети, в который входил следующий список заболеваний:

1. Воспалительные процессы лёгких (пневмония);
2. Повышенная плотность (плевральный выпот, ателектатическая консолидация, гидроторакс, эмпиема);
3. Низкая плотность (пневмоторакс, пневмоперитонеум);
4. Обструктивные заболевания лёгких (эмфизема, бронхопневмония, эмболия);
5. Дегенеративные инфекционные заболевания (туберкулез, саркоидоз, фиброз);
6. Инкапсулированные поражения (абсцессы, узелки, кисты, метастазы, опухоли);
7. Изменения средостения (перикардит, артериовенозные мальформации, увеличение лимфатических узлов);
8. Изменения грудной клетки (ателектаз, пороки развития, агенезия).

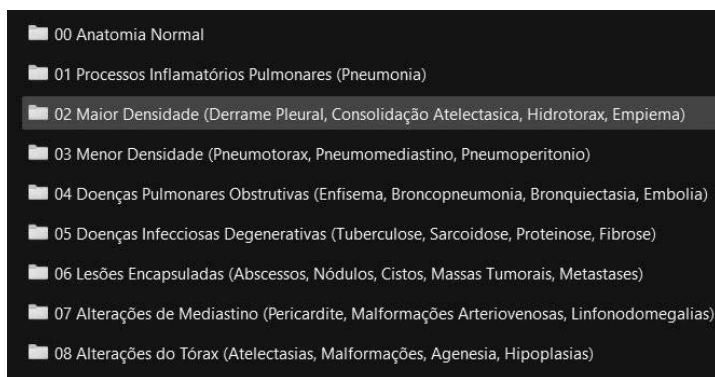


Рис 1.2. Пример датасета

Нейронная сеть также была обучена на рентген-снимках нормальной анатомии легких.

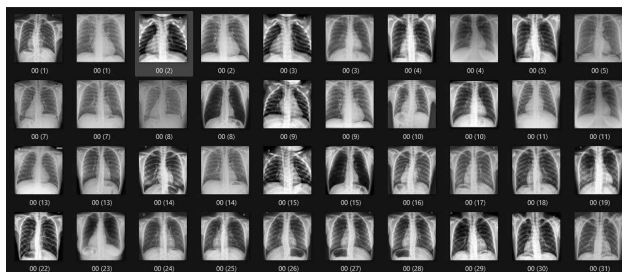


Рис 1.3. Нормальная анатомия

Был построен общий алгоритм работы приложения определены основные компоненты – библиотеки OpenCV и TensorFlow. Определив библиотеки, была проведена работа по созданию каждого модуля программы:

1. скрипта для получения изображения рентген-снимка грудной клетки;
2. базы данных, состоящей из изображений рентген-снимков грудной клетки с различными симптомами;
3. графического пользовательского интерфейса для взаимодействия с пользователем (рис.1.4)

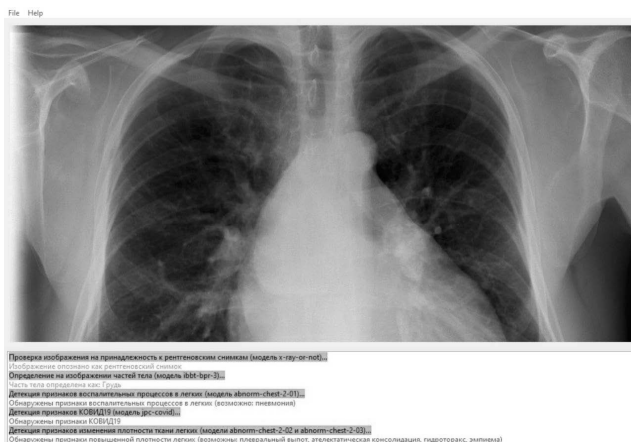


Рис. 1.4. Графический интерфейс программного модуля

Приложение создавалось на Python. Созданный программный модуль успешно прошел тестирование.

В результате исследования были выполнены следующие задачи:

- проанализированы способы распознавания рентген-снимков различных частей тела, оценены возможности анализа изображений рентген-снимков с применением аппарата искусственных нейронных сетей;
- разработана структурная схема системы анализа рентген-снимков грудной клетки;

- разработан алгоритм и программный модуль анализа рентген-снимков грудной клетки;
- протестирован разработанный программный модуль анализа рентген-снимков грудной клетки.

Для решения поставленных исследовательских задач были использованы следующие методы: теоретический анализ, сравнительно-сопоставительный анализ, экспериментальный метод, включающий разработку и тестирование программы.

Исходя из проделанной работы можно сделать вывод о том, что в настоящее время потребность в распознавании рентген-снимков возрастает, так как совершенствуется анализ визуальных данных, распознавания патологий, поэтому в нейросетях заинтересована практически любая сфера деятельности, а также, необходимость в данном программном модуле увеличивается с каждым днем.

Литература

1. TADVISER. Компьютерное зрение: технологии, рынок, перспективы // Веб-сайт компании TADVISER: [сайт], 2019. – URL: <https://www.tadviser.ru/index.php>.
2. Дятлов Е.И. Машинное зрение (аналитический обзор). / Е.И. Дятлов // Математические машины и системы. – 2013. – №2. – С. 21–24.
3. Принцип и реализация калибровки камеры // [сайт]. – URL: <https://russianblogs.com/article/59361057608>. – С. 24–26.
4. Селянкин В.В., Скороход С.В. Анализ и обработка изображений в задачах компьютерного зрения – 2015. –URL: http://ntb.tti.sfedu.ru/UML/UML_5493.pdf.
5. Никищечкин А.П. Нейросетевые технологии: Учебное пособие для студентов вузов. – ЕТИ (филиал) ГОУ ВПО МГТУ «Станкин», Егорьевск, 2010.
6. SICK IVP Machine Vision Introduction. – 2006 г. – https://www.academia.edu/38693358/Machine_Vision_Introduction2_2_web.
7. Распознавание рукописных цифр с помощью нейросетей. // Youtube: [сайт]. – URL: https://www.youtube.com/watch?v=pyZ8_P-l_SE.
8. OpenCV шаг за шагом. Поиск объекта по цвету. Цветовое пространство HSV. // RoboCraft.ru: [сайт], 2010 — <http://robocraft.ru/blog/computervision/402.html>
9. Python // Python 3.10.4: [сайт]: URL: <https://www.python.org/downloads>.
10. Operations on arrays // OpenCV 4.5.5: Open Source Computer Vision: [сайт], 2021. – URL: <https://opencv.org/releases>.

НЕЛИНЕЙНАЯ ОПТИКА ВИРУСОВ: О ВОЗМОЖНОСТИ ВЫСОКОИЗБИРАТЕЛЬНОГО IN VIVO ВОЗБУЖДЕНИЯ ДАННОГО ВИРУСА

В.Б. Ошурко^{1,2}, А.Ф. Бункин¹, С.М. Першин¹, И.И. Демилханов²

¹*Институт общей физики им. Прохорова РАН*

²*Московский государственный технологический университет «Станкин»*

Очевидно, что химический или биохимический метод борьбы с вирусами не может быть эффективным в связи с тем, что вирусы химически неотличимы от других биологических объектов. В то же время иммунологические методы лечения вирусных инфекций действуют очень медленно. Следовательно, любой физический метод избирательного контроля вируса становится очень важным. Недавнее открытие низкочастотного вынужденного комбинационного рассеяния акустических колебаний вирусов открывает новые возможности борьбы с вирусами. Несмотря на отсутствие спонтанного комбинационного рассеяния света, вынужденное комбинационное рассеяние легко наблюдать в водных суспензиях вирусов с комбинационным сдвигом около десятков ГГц. Физический механизм такого вынужденного рассеяния предложен в нашей работе [1]. Этот механизм позволил объяснить некоторые особенности вынужденного светорассеяния в вирусных суспензиях. Также было показано, что при этом процессе вирус может быть локально нагрет за счет возбуждения акустических колебаний. В настоящей работе показано, что многие акустические резонансы данного вируса можно обнаружить с помощью бихроматического нелинейного возбуждения двумя лазерами (две разные длины волн, одна из них должна быть сдвинута на соответствующую частоту акустических колебаний). Напротив, при вынужденном комбинационном рассеянии вирусов можно обнаружить только один акустический пик. Таким образом, появляется возможность записать акустический «паспорт» данного вируса. Показано также, что использование множества различных длин волн (соответствующих разным акустическим резонансам) может обеспечить любую желаемую селективность возбуждения данного вируса в водной суспензии различных биологических объектов.

Литература

1. В.Б. Ошурко, О.В. Карпова, М.А. Давыдов, А.Н. Федоров, А.Ф. Бункин, С.М. Першин, М.Ю. Гришин, Зарядовый механизм низкочастотного вынужденного комбинационного рассеяния света на вирусах, ОБЗОР А 105, 043513 (2022).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА СИГНАЛОВ В БИОНЕЙРОННОЙ СЕТИ НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ГАМИЛЬТОНОВЫХ УРАВНЕНИЙ

Преображенская А. Р.

ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН»

127055, Россия, Москва, Вадковский пер., 1

Тел.: +7-977-388-74-98, e-mail: alpreobra@yandex.ru

Ключевые слова: нелинейное уравнение Шредингера, уравнение sin-Гордон, метод обратной задачи рассеяния, искусственные нейронные сети, PINN-нейросети.

Распространение сигналов внутри нервной системы является сложным электрохимическим процессом и заключается в передаче нервных импульсов между нейронами. Распространение нервных импульсов можно рассматривать как волновой процесс, а передаваемый нервный импульс – как уединенную устойчивую волну (солитон) [2].

Солитоны описываются разными нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных. Известными примерами таких уравнений являются нелинейное уравнение Шредингера и уравнение sin-Гордон [3].

Нелинейное уравнение Шредингера (НУШ) имеет следующий вид (1):

$$i \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + v|u|^2 u = 0 \quad (1)$$

А уравнение sin-Гордон для размерности (1+1) может быть записано в виде (2):

$$\varphi_{xx} - \varphi_{tt} = \sin \varphi \quad (2)$$

Подобные уравнения применяются для моделирования распространения сигналов в самых разных областях. Для решения таких уравнений также существуют как аналитические, так и численные методы.

Известен аналитический метод решения, называемый методом обратной задачи рассеяния, согласно которому решение нелинейного уравнения сводится к решению трех линейных задач, одна из которых решается явно [1].

Немало существует и численных методов решения нелинейных уравнений, одним из которых можно считать и нейронные сети.

В работе предлагается рассмотреть моделирование процесса переноса сигналов в биейронной сети на основе нелинейных гамильтоновых уравнений: нелинейного уравнения Шредингера и уравнения sin-Гордон, используя метод обратной задачи рассеяния в качестве аналитического метода решения и искусственные нейросети для получения численного решения. При этом предлагается использовать так называемые PINN-нейросети – физически обоснованные нейронные сети, в структуре которых учитываются физические ограничения, характерные для процесса и выражаемые в уравнениях в частных производных. Применение PINN-нейросетей позволит ограничиться меньшим объемом данных для обучения и получить более точный и достоверный результат моделирования.

Литература

1. Абловиц М., Сигур Х. Солитоны и метод обратной задачи: Пер. с англ. – М.: Мир, 1987, 479 с.

2. Дорогина, О.И. Нейрофизиология: учеб. пособие / О.И. Дорогина ; М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. – 100 с.
3. Захаров В.Е., Манаков С.В., Новиков С.П., Питаевский Л.П. – Теория солитонов. Метод обратной задачи – Москва : Наука, 1980. – 319 с.: ил.

ВРОЖДЕННЫЙ КОЛЛЕКТИВИЗМ ЧАСТЕЙ В ОРГАНИЗМЕ, ГЕШТАЛЬТ-АРХЕТИПЫ ВЕРОЯТНОСТЕЙ В ГЕНОМНЫХ ДНК И ЦИКЛИЧЕСКИЕ КОДЫ ГРЕЯ

С.В. Петухов

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН,
Москва, Россия
101990, Малый Харитоньевский переулок, 4
Tel.: +7915-092-85-65, e-mail: spetoukhov@gmail.com

INNATE COLLECTIVISM OF PARTS IN THE ORGANISM, GESTALT ARCHETYPES OF PROBABILITIES IN GENOMIC DNAS AND CYCLIC GRAY'S CODES

S.V. Petoukhov

Mechanical Engineering Research Institute named after A.A. Blagonravov, RAS,
Moscow, Russia
101990, Maliy Kharitonyevsky pereulok, 4
Tel.: +7915-092-85-65, e-mail: spetoukhov@gmail.com

Аннотация. Материал посвящен исследованию закономерностей стохастической организации нуклеотидных последовательностей однонитевых ДНК геномов высших и низших организмов, а также их связей с циклическими кодами Грея и проблемой целостных структур (гештальтов) в физиологии. Представлены обнаруженные автором во множестве геномных ДНК устойчивые статистические структуры, названные геномными гештальт-архетипами вероятностей и обсуждаемые в качестве возможной основы ряда генетически наследуемых свойств живого.

Ключевые слова: геномные ДНК, код Грея, статистический анализ, вероятности, гештальт-архетипы, биологические циклы, карты Карно, биоинформатика.

Понятие «гештальта» (целостной формы) в психологии известно в связи с врожденной способностью человека воспринимать окружающий мир в виде упорядоченных целостных конфигураций, а не отдельных фрагментов [1]. Благодаря этой способности, важной для выживания в изменяющемся мире, организм воспринимает окружающие целостные структуры константным образом при изменении условий их предъявления ему (изменении ракурса зрения, освещенности и пр.). Например, мы распознаем музыкальную мелодию, даже если она исполняется на разных инструментах и разными голосами. Первичными данными гештальтпсихологии являются целостные структуры (гештальты), в принципе не выводимые из образующих их компонентов. В частности, генетически наследуемое тело человека является целостной структурой (гештальтом), несмотря на постоянное циклическое обновление его клеток и пр. Целью данного доклада является представление результатов авторского исследования статистической (вероятностной) организации нуклеотидных последовательностей в однонитевых геномных ДНК высших и низших организмов, в ходе которого обнаружено множество взаимно связанных гештальт-подобных закономерностей, сопряженных с циклическими кодами Грея. Эти статистические закономерности выявлены в представительном множестве геномных ДНК, уже проанализированных автором, и потому называются гештальт-архетипами геномных вероятностей. Видимо, они имеют прямое отношение к утверждению одного из создателей квантовой механики и автора

первой статьи по квантовой биологии П. Йордана о том, что упущенные наукой законы живых организмов являются законами вероятностей [2]. Все исходные данные о геномных ДНК брались автором на сайте GenBank. Напомним, что генетика как наука началась со статистического анализа, предпринятого Г. Менделем, данных наследования альтернативных признаков при скрещивании организмов, в результате которого им были сформулированы генетические правила сегрегации (расщепления) наследования.

Для обнаружения скрытых статистических закономерностей в нуклеотидной последовательности любой геномной ДНК она рассматривается автором сначала как последовательность одиночных нуклеотидов С (цитозин), А (аденин), Т (тимин), G (гуанин), в которой подсчитывается процент каждого вида нуклеотида (%C, %A, %T, %G). Затем она рассматривается как последовательность дуплетов типа CA-TT-GA-... с подсчетом в ней процентов каждого из 16 видов дуплетов (%CC, %CA, %CG, ...). Затем та же геномная последовательность рассматривается как последовательность триплетов, затем тетраплетов и т.д. с подсчетом всякий раз процентов каждого из 64 видов триплетов (%CCC, %CCA, ...), каждого из 256 видов тетраплетов (%CCCC, %CCCA, ...) и т.д. Тем самым, нуклеотидная последовательность каждой геномной ДНК рассматривается как многослойная система из множества n -плетных текстовых слоев. В данном докладе представляются результаты статистического анализа только для $n = 1, 2, 3, 4$.

Полученные величины вероятностей каждого вида n -плетов в исследуемой геномной ДНК вставляем в $(2^n \cdot 2^n)$ -матрицы (Рис. 1), называемые генетическими матрицами Карно. Номера столбцов и строк в них нумеруются числами циклических n -битных кодов Грея согласно [3-5] в связи со структурным соответствием молекулярной системы генетического кодирования семейству циклических кодов Грея. Эти матрицы строятся по аналогии с картами Карно из булевой алгебры логики. Построение этих матриц использует тот факт, что в ДНК алфавит 4 нуклеотидов С, А, Т, G является носителем системы бинарно-оппозиционных признаков: 1) двое из этих нуклеотидов являются пуринами (А и G), имея по 2 кольца в своей молекуле, а двое других нуклеотидов (С и Т) являются пиримидинами с 1 кольцом в молекуле, что дает представление $C=T=0, A=G=1$; 2) двое из этих нуклеотидов являются кето-молекулами (Т и G), а двое других (С и А) – амино-молекулами, что дает представление $C=A=0, T=G=1$. В силу этого алфавиты ДНК 4 нуклеотидов, 16 дуплетов и 64 триплетов и т.д. представляются в форме квадратных матриц, столбцы которых нумеруются оппозиционными признаками «пурин или пиримидин» ($C=T=0, A=G=1$), а строки – оппозиционными признаками «амино или кето» ($C=A=0, T=G=1$), причем номера упорядочиваются в соответствие с n -битными кодами Грея (Рис. 1). Номера каждой ячейки в этих матрицах с определенным n -плетом в ней образуются конкатенацией чисел соответствующего n -битного кода Грея, нумерующих строку и столбец этой ячейки, а потому являются числами $2n$ -битного кода Грея. На Рис. 1 в каждой матричной ячейке указан символ соответствующего n -плета, его $2n$ -битный номер по коду Грея, а также его процентная доля (с точностью до четвертого знака после запятой) в соответствующем n -плетном слое нуклеотидной последовательности однонитевой ДНК первой хромосомы человека.

		00	01	11	10	
0	C	CC	CA	AA	AC	<u>0.2722</u>
	0.2085	0.0541	0.0727	0.0950	0.0503	
	00	0000	0001	0011	0010	
	T	CT	CG	AG	AT	
1	A	0.0713	0.0103	0.0714	0.0743	<u>0.2273</u>
	01	0100	0101	0111	0110	
	G	0100	0101	0111	0110	
	1	0100	0101	0111	0110	

1	0.2918 10	0.2087 11	0.5005
	0.5003	0.4997	

11	TT 0.0957 1100	TG 0.0729 1101	GG 0.0542 1111	GT 0.0505 1110	0.2732
10	TC 0.0601 1000	TA 0.0631 1001	GA 0.0601 1011	GC 0.0440 1010	0.2273
	0.2812	0.2190	0.2807	0.2191	

	000	001	011	010	110	111	101	100	
000	CCC 0.0138 000000	CCA 0.0188 000001	CAA 0.0186 000011	CAC 0.0152 000010	AAC 0.0145 000110	AAA 0.0369 000111	ACA 0.0198 000101	ACC 0.0118 000100	0.1495
001	CCT 0.0185 001000	CCG 0.0029 001001	CAG 0.0210 001011	CAT 0.0179 001010	AAT 0.0238 001110	AAG 0.0199 001111	ACG 0.0025 001101	ACT 0.0162 001100	0.1228
011	CTT 0.0201 011000	CTG 0.0209 011001	CGG 0.0029 011011	CGT 0.0026 011010	AGT 0.0161 011110	AGG 0.0185 011111	ATG 0.0178 011101	ATT 0.0239 011100	0.1228
010	CTC 0.0176 010000	CTA 0.0127 010001	CGA 0.0023 010011	CGC 0.0025 010010	AGC 0.0144 010110	AGA 0.0224 010111	ATA 0.0194 010101	ATC 0.0132 010100	0.1045
110	TTC 0.0197 110000	TTA 0.0198 110001	TGA 0.0195 110011	TGC 0.0146 110010	GGC 0.0126 110110	GGA 0.0160 110111	GTA 0.0112 110101	GTC 0.0096 110100	0.1228
111	TTT 0.0372 111000	TTG 0.0188 111001	TGG 0.0190 111011	TGT 0.0199 111010	GGT 0.0119 111110	GGG 0.0138 111111	GTG 0.0153 111101	GTT 0.0145 111100	0.1504
101	TCT 0.0223 101000	TCG 0.0023 101001	TAG 0.0128 101011	TAT 0.0194 101010	GAT 0.0133 101110	GAG 0.0176 101111	GCG 0.0025 101101	GCT 0.0144 101100	0.1046
100	TCC 0.0159 100000	TCA 0.0196 100001	TAA 0.0199 100011	TAC 0.0110 100010	GAC 0.0096 100110	GAA 0.0196 100111	GCA 0.0146 100101	GCC 0.0125 100100	0.1227
	0.1652	0.1159	0.1160	0.1031	0.1161	0.1646	0.1031	0.1160	

Рис. 1. Расположение нуклеотидов, дуплетов и триплетов в генетических ($2^n \cdot 2^n$)-матрицах Карно (матрицы даны в жирных рамках с номерами их столбцов и строк по n -битным кодам Грея) с указанием процентной доли каждого из n -плетов в n -текстовых слоях ДНК первой хромосомы человека. Справа и снизу от каждой матрицы показаны суммы долей n -плетов в каждой строке и столбце (пояснение в тексте)

Эта хромосомная ДНК человека, используемая в данных Рис. 1 в качестве примера геномной ДНК, содержит примерно 250 миллионов нуклеотидов. Ее исходные характеристики взяты на сайте https://www.ncbi.nlm.nih.gov/nuccore/NC_000001.11.

На первый взгляд, матрицы на Рис. 1 содержат хаотичный набор процентов n -плетов. Однако проведенный автором анализ выявил целую серию закономерных взаимосвязей в данной многослойной системе вероятностей, которые реализуются также на множестве геномных ДНК, проанализированных автором. Некоторые из них связаны с понятием комплементарных столбцов (строк), из которых состоят

генетические матрицы Карно: пара столбцов (строк), номера которых в этих матрицах переходят друг в друга при взаимной замене $0 \leftrightarrow 1$, называются комплементарными по номерам Грея. Например, столбцы с номерами *100* и *011* по числам Грея комплементарны в этом смысле.

Правило 1 (о гештальт-архетипе комплементарности вероятностей в n -плетном слое геномных ДНК). Первое выявленное геномное правило вероятностей в n -плетных слоях геномной ДНК заключается в том, что в каждом слое суммы вероятностей n -плетов в двух комплементарных по номерам Грея столбцах (строках) практически одинаковы (см. Рис. 1), хотя вероятности n -плетов в их составе различны. Это можно охарактеризовать термином «гештальт», означающим целостный образ. Данное правило работает для разных геномных ДНК, исследованных автором: всех 24 видов хромосом человека; всех хромосом дрозофилы, мыши, червя, многих растений; 19 геномов бактерий и архей; многих экстремофилов, живущих в экстремальных условиях. Поэтому мы говорим об алгебраических гештальт-архетипах вероятностей в геномных ДНК, кратко именуя их в случае Правила 1 «гештальт-архетипами комплементарности».

При переходе в геномных ДНК от n -плетного слоя к очередному $(n+1)$ -плетному слою число видов полиплетов в столбцах (и строках) удваивается (Рис. 1). При этом в геномных ДНК между матрицей Карно для n -плетов и матрицей Карно для $(n+1)$ -плетов реализуются закономерные связи суммарных вероятностей полиплетов столбцов (и строк), выражаемые следующими двумя правилами.

Правило 2. Для геномной ДНК в ее $(2^n \cdot 2^n)$ -матрице Карно каждый столбец (строка) имеет такую суммарную вероятность всех его n -плетов, которая практически равна сумме суммарных вероятностей двух столбцов (строк) в $(2^{n+1} \cdot 2^{n+1})$ -матрице Карно. Например, на Рис. 1 в матрице Карно для дуплетов столбец под номером *01* имеет вероятность 0.2190, а в матрице Карно для триплетов два столбца с номерами *010* и *011* имеют практически ту же сумму их суммарных вероятностей 0.2191 ($= 0.1160 + 0.1031$).

Правило 3. В геномной ДНК любой паре комплементарных столбцов (строк) в ее n -плетном слое соответствуют две пары комплементарных столбцов (строк) в $(n+1)$ -плетном слое с равными суммарными вероятностями $(n+1)$ -плетов в них. Например, паре комплементарных столбцов с нумерацией Грея *01* и *10* в матрице Карно для дуплетов соответствуют в матрице Карно для триплетов две пары комплементарных столбцов *011* и *100*, а также *010* и *101*, имеющих в согласии с правилом №1 практически одинаковые суммарные вероятностей триплетов: оба столбца первой пары имеют суммы вероятностей по 0.1160, а столбцы второй пары по 0.1031 (хотя проценты n -плетов в них существенно различны). Кратко эту алгебраическую закономерность называем «гештальт-архетипом сегрегации комплементарных суммарных вероятностей». Эта дихотомическая сегрегация сумм вероятностей в комплементарных столбцах и строках сопровождается образованием дихотомического фрактального дерева вероятностей, в котором каждый n -плет является началом своего собственного фрактального дерева.

Еще один гештальт-архетип вероятностей в многослойной системе n -плетных слоев геномных ДНК связан с равенством сумм вероятностей n -плетов в тех их группировках, которые характеризуются расположением того или иного нуклеотида, называемого атрибутивным, на определенной позиции в n -плетях. Например, если в качестве атрибутивного выступает цитозин С, то триплет ТСА имеет атрибутивный нуклеотид на второй позиции, а триплет ГТС – на третьей позиции. В геномных ДНК закономерная взаимосвязь между суммами вероятностей в группировках n -плетов, определенных признаком одинакового атрибутивного нуклеотида на одинаковой позиции n -плетов, выражается следующим правилом, говорящем о геномном гештальт-архетипе.

Правило 4. В геномных ДНК процент каждого из нуклеотидов С, G, A, T практически равен сумме процентов всех тех дуплетов, триплетов и тетраплетов, в которых атрибутивный нуклеотид расположен на той же фиксированной позиции (первой, или второй, или третьей, или четвертой), при том, что количества п-плетов и значения вероятностей существенно различны. Эту алгебраическую закономерность геномных ДНК называем «гештальт-архетипом суммарных вероятностей п-плетов с атрибутом».

С точки зрения десятичных эквивалентов чисел кодов Грея, номерам в каждой паре комплементарных по Грею столбцов (строк) матриц Карно соответствует пара десятичных чисел, одно из которых является четным, а второе нечетным. С учетом этого можно отметить существование еще следующего правила.

Правило 5. В генетических матрицах Карно для геномных ДНК суммы вероятностей п-плетов во всех столбцах (строках) с десятичными четными номерами и с нечетными номерами практически равны. Это можно рассматривать как гештальт-архетип геномных вероятностей типа «чет-нечет», перекликающийся с давней темой различия функций двух полушарий мозга, а также двоичности «чет-нечет» основных кодов человеческой культуры и теории диалога, описанных в книге «Чет и нечет» [6].

Полагаем, что за этими статистическими закономерностями геномных ДНК стоят подлежащие раскрытию наукой квантово-физические закономерности сегрегации в огромных ансамблях вибрационных и циклических процессов живой материи. Отметим еще, что процессы в живых телах являются стохастическими, поскольку отдельные молекулы взаимодействуют в клетках стохастическим образом. В частности, наш мозг, содержащий 86 миллиардов нервных клеток и один квадриллион межнейронных контактов, работает на вероятностных принципах, поскольку на передачу каждого импульса от нейрона к нейрону может влиять необозримое число факторов. Но на основе стохастических потоков нейронных импульсов в мозге мы получаем детерминистское гештальт-представление о конкретных предметах окружающего мира. Раскрытие секретов этой взаимосвязи стохастики и детерминизма в живом представляет фундаментальную задачу науки. Поскольку мозг наследуется через систему генетического кодирования, то можно полагать, что, познавая в алгебраической гештальт-генетике универсальные гештальт-архетипы геномных вероятностей, мы опосредованно познаем вероятностные принципы работы мозга, алгоритмы квантовой биоинформатики и возможные основы геноморфных систем искусственного интеллекта (известно использование кодов Грея в квантовой информатике при упорядочении базисных векторов в задачах оптимизации). Представляемые результаты свидетельствуют, что реализация наследуемых гештальт-архетипов вероятностей в живом связана с циклическими кодами Грея в системе генетического кодирования и наследуемыми множествами согласованных циклических биопроцессов. Архетипы коллективного бессознательного К. Юнга могут иметь связи с геномными гештальт-архетипами.

Заключение. В геномных ДНК реализуются гештальт-архетипы вероятностей, учет которых полезен для осмысления гештальт явлений в наследуемых биосистемах.

Литература

1. Антти Ревонсуо. *Психология сознания*. - Питер, 2013, ISBN: 978-5-459-01116-6.
2. McFadden J., Al-Khalili J. The origins of quantum biology. – *Proceedings of the Royal Society A*, Vol. 474, Issue 2220, p. 1-13, 2018, <https://doi.org/10.1098/rspa.2018.0674>.
3. Petoukhov S.V. Genetic code, the problem of coding biological cycles, and cyclic Gray codes. – *Biosystems*, 2024, vol. 246, 105349, <https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2024.105349>.

4. Petoukhov, S. Cyclic Gray Codes in Modeling Inherited Cyclic Biostructures and Analysis of Statistical Rules of Genomic DNAs. – Preprints 2024, 2024020713, from 13.02.2024, <https://doi.org/10.20944/preprints202402.0713.v1>.
5. Петухов С.В. Генетическое булево-логическое кодирование, цикличность в живом и циклические коды Грея. Коллективное алгебрологическое сознание. – *Биомаш-системы*, 2024, т.8, №3, стр. 175–177.
6. Иванов Вяч. Вс. *Чет и нечет: Асимметрия мозга и знаковых систем*. М.: Сов. Радио, 1978, 184 с.

ON SHAPED SURFACES WITH CONSTANT GEOMETRIC CHARACTERISTICS AT THE BOUNDARY OF A NONLINEAR GENERATRIX

Petr Pivkin^{1,2,3,4}

¹ Лаборатория Технологий Микрообработки, Московский Государственный Технологический Университет “СТАНКИН”, 127055 Москва, Россия;

² кафедра инструментальной техники и технологии формообразования, Московский Государственный Технологический Университет “СТАНКИН”, 127055 Москва, Россия;

³ кафедра прикладной математики, Московский Государственный Технологический Университет “СТАНКИН”, 127055 Москва, Россия;

⁴ Молодежная Лаборатория цифрового моделирования кибер-физических инструментальных систем, Московский Государственный Технологический Университет “СТАНКИН”, 127055 Москва, Россия.

Abstract. В работе предложена новая модель проектирования и заточки зуба инструмента позволяющая сформировать постоянную геометрию вдоль свободно заданной режущей кромки. В работе достигнута цель минимизация количества необходимых физических испытаний при расширении возможностей результатов моделирования. Метод проектирования зуба инструмента не имеет ограничений по форме режущей кромки, процессу эксплуатации и формы рабочих поверхностей инструмента. Метод используется при разработке режущего инструмента и процесса для анализа различных геометрических закономерностей сложных форм инструмента на технологический процесс заточки зуба инструмента, что позволит адаптировать САПР острозаточенных зубьев режущих инструментов для технологии их формообразования на станке с ЧПУ. Математическая модель процесса формообразования главной задней поверхности позволит обеспечить постоянно нормального заднего угла вдоль режущей кромки произвольной формы, лежащей на конической производящей поверхности.

1. Введение

Механообработка является наиболее массовым способом изготовления изделий в различных отраслях промышленности [1,2]. Объем производимых режущих инструментов для механообработки увеличивает ежегодно [3]. Растущий спрос на режущие инструменты на мировом рынке обуславливается приводит к тенденции развитию и совершенствования процессов заточки инструментов [4-6]. Поэтому повышение технологичности процессов заточки инструментов и разработка совершенно уникальных процессов изготовления новых видов режущих инструментов [7] является устойчивыми трендами развития современного инструментального производства. Существуют конструкции сверл и фрез с различной формой задней поверхности: плоская, винтовая, эвольвентно-винтовая и коническая [4,8]. Все они имеют свои преимущества и недостатки. Однако, классические виды заточки не позволяют гибко регулировать углы резания вдоль режущей кромки со специализацией подбора геометрии режущего клина на обрабатываемом изделии по точности и виду материала. Использование управляемой формы режущих кромок геометрией инструмента задается внешним диаметром d , передним углом γ и задним углом α ,

формой режущей кромки, углом наклона образующей производящей поверхности резания φ , чтобы технологию обработки специализированной заточки [9].

Известно множество исследований на основе теоретического моделирования в области раскрытия взаимосвязей процессов многокоординатного шлифования поверхностей режущего инструмента при расчете форм изделия в зависимости от изнашивания и корректирования технологических наладок [10]. Однако применение знаний обработки, воспроизводимых движением самих по себе поверхностей трудновыполнимо. В связи с этим в данной работе предложен подход формообразования острозаточенных зубьев режущих инструментов с криволинейными режущими кромками в свободной форме, которая может регулироваться углами наклона режущей кромки в фиксированных точках или их координатами координатами.

Объекты сложной формы и нелинейными ребрами описываются различными численными и аналитическими методами. Метод моделирования формы геометрических тел, подлежащих изменению, использует оболочку объекта в качестве упорядоченного положения ребер представлен в [11]. Данные поверхности широко используется в автоматизированном проектировании объектов техники и средств поддержки технологии. Специальный вариант этого использует только простые элементы для представления поверхности, т. е. плоские многоугольники или даже только треугольники. Вычислительная твердотельная геометрия (CSG), другое представление из САПР, также используется в моделировании процессов [12]. Этот метод моделирования использует численные решение при объединении элементов графики в единую конструкцию [13]. В большинстве существующих подходов при вычисление геометрической формы при создания режущей кромки не учитывают форму поверхности резания относительно клина [14], что обосновывается соображениями упрощения контактной вдоль режущей. Этот фактор приводит к значительным искажениям, а при образования фасонных поверхности может привести к значительным негативным факторам (перегреву и интерференции). Расчет поверхности подточки в данном случае сводится к стандартным проектным решениям, во многих случаях не учитывающих фактические параметры формообразования шлифовальным кругом.

Существование плавного непрерывного сопряжения участков задних поверхностей (которые образуют режущую кромку при пересечении с винтовой поверхностью) с различной кривизной между собой подразумевает бесконечное множество ограничений и условий образования поверхности. Описание формы задней поверхности решалась в работе с помощью расчета линейных элементов-направляющих при переходе режущей кромки в заднюю поверхность [15]. Существуют работы учитывающие технологические закономерности с образованием проекции винтовых линий в качестве следа режущей кромки [16]. Ряд исследований по совершенствованию формы и расположения традиционных конструкций используют расчеты и приближения для оптимизации изменения заднего угла с хорошим начальным приближение, задающим положения конуса [8]. Такой подход дает решение с ограничением форм режущих кромок. Форма режущих кромок в данном случае может быть регулируемой на этапе разработки автоматизированной системы проектирования. Другой класс исследований рассматривает фасонную подточку в совокупности с показателями работоспособности и охлаждения с изменением конструктивного исполнения [17]. Исследовались комплексную математические модели поведения поверхностей, включая коническую, гиперболоидальную и эллипсоидальную боковые поверхности режущих инструментов [18]. Представление методологию моделирования спиральных сверл с общей геометрией точки с использованием NURBS может иметь перспективный тренд при адаптации конструкторских систем в технологические на лазерных машинах [19]. В настоящий момент проанализированы модели канавок фрез

и сверл и боковой поверхности для оценки углов режущей кромки [20,21]. Они также разработали математическую модель произвольной поверхности канавки, которая генерируется путем перемещения поперечной кривой канавки вдоль оси инструмента в винтовом движении. Моделирование вершины сверла с плоскими передними поверхностями для сверления стали и с подходящей геометрией, техническими осуществилось в работе [22]. Процесс моделирования является важным этапом при создании новых классов режущих инструментов. Моделирование систем разработки группы конструкций инструмента позволяет быстро и с небольшими затратами создавать гамму конструкций с наиболее выгодными для заданных условий эксплуатационными показателями прежде, чем переходить к разработке промышленной технологии. В связи с этим моделирование сложных поверхностей на стадии предварительной подготовки производства нашло широкую заинтересованность и различные аспекты применения данных методов в технических и технологических системах.

Предложенная работа относится к группе формализации форм фасонных поверхностей с граничными условиями применительно к проектированию инструмента класса сверл и фрез. При конструировании фасонных изделий их форма определяется прежде всего функциональными требованиями. Режущие кромки криволинейной форме усложнят задачи образования постоянного угла в нормальном сечении в результате образования самопересечений поверхности и различной кривизны поверхности при образовании одного и того же заднего угла на различном сочетании углом наклона поверхности резания, угла наклона режущей кромки и угла взаимного расположения данных участков может приводить, как к кинематическому заострению так и к затуплению режущего клина. Это приводит к формированию не классического перехода к проектированию при множестве возможных комбинаций при различных формах режущей кромки. В данной работе впервые предлагается возможность создания поверхностей фасонной кромки на конусе без использования сшивок и сглаживания в аналитическом виде без численного пересчета точек.

Одной из основных целей текущего исследования является минимизация количества необходимых физических испытаний при расширении возможностей результатов моделирования. Математическая модель процесса формообразования главной задней поверхности режущего инструмента позволит обеспечить постоянство нормального заднего угла вдоль режущей кромки, также разработать различные виды подточек с постоянным передним нормальным углом.

2. Методы и подходы

Задание требуемой геометрии при жестких условиях, управление произвольной формой режущих кромок на сегодняшний день не в полной мере изучено. Задача еще более усложняется в связи с необходимостью обеспечить положение режущих кромок на поверхности резания определённой формы и образовывать с ней в каждом положении режущей кромки заднюю поверхность режущего инструмента. Причем задняя поверхность должна обеспечивать постоянным углом между наклоном касательной к поверхности резания и касательной задней поверхности в каждой точке режущей кромки. Неизбежно, существуют много сотни возможных исполнений траекторий генерирования задней поверхности, однако удовлетворяющих всем вышеописанным требованиям не так много. Их поиск, возможное сочетание и является основной идеей развития исследуемой в данной работе области. Однако главная проблема заключается не только в точности образования режущей кромки конической поверхности резания наиболее важным элементом проектирования является качество формирование оболочки, гладкости соседних участков задней поверхности в одну непрерывную

область, что позволит обеспечить рациональное распределение заднего угла в нормальном сечении к режущей кромки.

Ошибки расчетов угла могут возникать в случае контроля в осевом сечении, образуя поднутрения могут образовываться интерференция и затирания [23], что не учитывается в известных методах расчета угла. Во многих расчетных моделях поверхность резания, образованная вращением режущей кромки, является базой для отсчета заднего угла [24]. Таким образом, классические методы используемые для разработки системы автоматического проектирования и подготовки производства инструмента с криволинейной режущей кромкой с применением стандартных видов заточки не позволяют провести рациональный поиск путей совершенствования инструмента с точками перегиба проекций режущих кромок. Режущая кромка является объектом, которая исследуется перед моделированием специальной заточки по задней и передней поверхности. Угол наклона режущей кромки определяется между осями инструментальной системы координат. Поэтому форма режущей кромки традиционно для непрямолинейных режущих кромок является исходной величиной и известна до процесса проектирования задней и передней поверхностей. В работе предлагается метод задания режущую кромку различными видами сплайнов, например В-сплайном и кубическим сплайном. Для определения формы поверхности, удовлетворяющей двум условиям: первое условие – режущая кромка расположена на конической производящей поверхности; второе условие – задняя поверхность образует постоянный нормальный задний угол вдоль всей режущей кромки, который определяется как угол между касательной к задней поверхности и касательной к конической поверхности резания в нормальном сечении к режущей кромки в рассматриваемой точке. Рассчитывается нормальная секущая плоскость на каждом бесконечно малом элементе лезвия. Определение формы поверхности резания нормально расположенной к режущей кромки необходимо для вычисления касательного вектора к поверхности резания в искомой точке режущей кромки элемент ортогональный к бесконечно малому участку дифференцирования лезвия. Используя такую форму определения поверхности резания определение фактической величины заднего осуществляется более точно. Это обосновывается тем, что в нормальной секущей плоскости к режущей кромки форма определяется с фактических углом наклона относительно осевого сечения.

Первым шагом в подготовке модели является назначение характеристик режущей кромки на поверхности резания. Использование вектора касательного скорости резания в данном случае некорректно в связи с тем, что реальные условия резания могут проходить в сечении под наклоном к нему. В результате получим ортогональное пространство и направляющий вектор врезания лезвия в обрабатываемый материал.

2.1. Разработка системы проектирования острозаточенных зубьев режущих инструментов криволинейной режущей кромкой

Традиционные параметры задания задней поверхности зависят от характера расположения контакта с обрабатываемой поверхностью заготовки, следовательно от формы режущей кромки и вектора формообразующего движения. В результате для решения задачи построения задних поверхностей необходимо исследовать параметры расположения касательных к поверхностям инструмента и обрабатываемой поверхности в зоне резания. Кривую режущей кромки на поперечном сечении можно аппроксимировать как полиномиальную кривую или различные виды В-сплайна. Предположим, что уравнение кривой канавки имеет вид:

$$f_{CE}(t) = \frac{t - m_i}{m_{i+k} - m_i} \cdot B_i(t) + \frac{m_{i+k+1} - t}{m_{i+k+1} - m_{i+1}} \cdot B_{i+1}(t) \quad (1)$$

Выбор порядка полинома или сплайна зависит от формы кривой канавки на поперечном сечении и назначается согласно алгоритму подбора формы режущей кромки.

Поверхность резания описывается выражением:

$$f_{cs}(X, Y) = R \cdot \cot(\varphi) - \cot(\varphi) \cdot \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (2)$$

Тогда получим систему уравнение, описывающих форму режущей кромки на поверхности резания при контакте с обрабатываемым материалом:

$$f_{CEv}(t) = \begin{bmatrix} t \\ f_{CE}(t) \\ -\cot(\varphi) \cdot \sqrt{x^2 + f_{CE}(t)^2} + R \cdot \cot(\varphi) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Если угол наклона режущей кромки откладывается в направлении, не пересекающем ось инструмента или параллельно осевой плоскости инструмента, возникает ошибка при использовании традиционных составляющих заднего угла. Здесь представлены новые координаты задней поверхности, основанные на идее анализа ортогональной контактной зоны с обрабатываемым материалом. Схема геометрических параметров задней поверхности инструмента на базе конической производящей поверхности (показана фиолетовым цветом) представлена на рисунке 1.

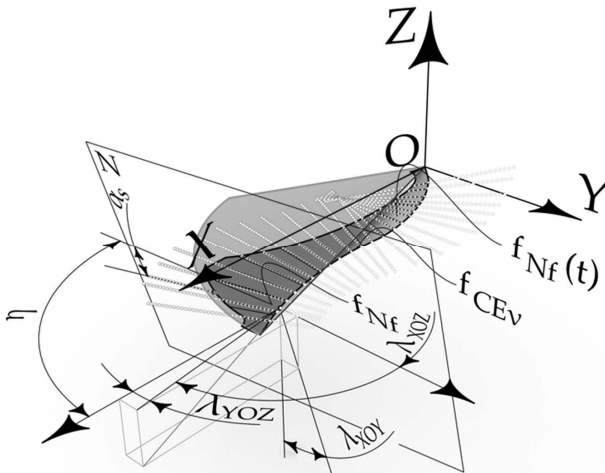


Рис. 1. Параметры режущей кромки и задней поверхности зуба инструмента при дифференцировании бесконечно малых участков

Определить координаты касательной к режущей кромки можно с помощью системы уравнений:

$$T(t) = \left[\begin{array}{c} t \\ \frac{d}{dt_0} f_{CE}(t_0) \cdot t + f_{CE}(t_0) - t_0 \frac{d}{dt_0} f_{CE}(t_0) \\ \left[-\frac{\cot(\varphi) \cdot \left(t_0 + f_{CE}(t_0) \cdot \frac{d}{dt_0} f_{CE}(t_0) \right)}{\sqrt{t_0^2 + (f_{CE}(t_0))^2}} \right] \cdot t + \frac{\cot(\varphi) \cdot \left(R \cdot \sqrt{t_0^2 + (f_{CE}(t_0))^2} - (f_{CE}(t_0))^2 + t_0 \cdot f_{CE}(t_0) \cdot \frac{d}{dt_0} f_{CE}(t_0) \right)}{\sqrt{t_0^2 + (f_{CE}(t_0))^2}} \end{array} \right] \quad (4)$$

Углы наклона режущей кромки между осями инструментальной системы координат:

$$\lambda XOY(t_\tau) = \text{atan} \left(\frac{d}{dt_\tau} \cdot f_{CE}(t_\tau) \right) \quad (5)$$

$$\lambda XOZ(t_\tau) = \text{atan} \left(-\frac{\cot(\varphi) \cdot \left(t_\tau + f_{CE}(t_\tau) \cdot \frac{d}{dt_\tau} \cdot f_{CE}(t_\tau) \right)}{\sqrt{t_\tau^2 + f_{CE}(t_\tau)^2}} \right) \quad (6)$$

$$\lambda YOZ(t_\tau) = \text{atan} \left(\frac{-\frac{d}{dt_\tau} \cdot f_{CE}(t_\tau) \cdot \sqrt{t_\tau^2 + f_{CE}(t_\tau)^2}}{\cot(\varphi) \cdot \left(t_\tau + f_{CE}(t_\tau) \cdot \frac{d}{dt_\tau} \cdot f_{CE}(t_\tau) \right)} \right) \quad (7)$$

Координаты профиля поверхности резания в нормальном сечении определяются системой уравнений:

$$f_{csN}(X_t) = \left[\begin{array}{c} \cos(k) \cdot (Y_{CE}(X_t) \cdot \sin(k_1) + X_t \cdot \cos(k_1)) + \sin(k) \cdot \left(\cot(\varphi) \cdot \sqrt{t_0^2 + Y_{CE}(X_t)^2} - R \cdot \cot(\varphi) \right) \\ Y_{CE}(X_t) \cdot \cos(k_1) - X_t \cdot \sin(k_1) \\ \sin(k) \cdot \left(Y_{CE}(X_t) \cdot \sin(k_1) + X_t \cdot \cos(k_1) - \cos(k) \cdot \cot(\varphi) \cdot \sqrt{X_t^2 + Y_{CE}(X_t)^2} - R \cdot \cot(\varphi) \right) \end{array} \right] \quad (8)$$

Координаты формообразования фасонной задней поверхности с постоянным нормальным задним углом:

$$f_{Nf}(t) = \left[\begin{aligned} & \left(\tan(\alpha) - \frac{1}{\frac{d}{dt_0} f_{CE}(t_0)} \right) \cdot t + f_{CE}(t_0) - t_0 \cdot \left(\tan(\alpha) - \frac{1}{\frac{d}{dt_0} f_{CE}(t_0)} \right) \\ & \left[\tan(\alpha) - \frac{\cot(\varphi) \cdot \left(t_0 - f_{CE}(t_0) \cdot \frac{1}{\frac{d}{dt_0} f_{CE}(t_0)} \right)}{\sqrt{t_0^2 + f_{CE}(t_0)^2}} \right] \cdot t - \\ & - \cot(\varphi) \cdot \sqrt{t_0^2 + f_{CE}(t_0)^2} + R \cdot \cot(\varphi) - t_0 \cdot \left[\frac{\cot(\varphi) \cdot \left(t_0 - f_{CE}(t_0) \cdot \frac{1}{\frac{d}{dt_0} f_{CE}(t_0)} \right)}{\sqrt{t_0^2 + f_{CE}(t_0)^2}} \right] + \tan(\alpha) \end{aligned} \right] \quad (9)$$

Установлена интересная особенность, что при преобразование нормальной плоскости при смещение вдоль бесконечно маленьких элементов режущей кромки вектор нормали в наивысшей точке к поверхности резания параллелен оси инструмента, что позволяет снизить количество преобразований при поиске угла между задней поверхностью и поверхностью резания. Изменение угла наклона касательной к задней поверхности в ортогональной плоскости (относительно инструментальной системы координат и технологической системы координат станка) вдоль дифференцируемых участков режущей кромки в статической системе координат и угол траектория движения лазерного луча определяется выражением:

$$\alpha_s = \alpha \pm \tan^{-1} \left[\frac{\left[\sin(k) \cdot \left(\cos(k_1) + \frac{dY_{CE}(X_t)}{dX_t} \sin(k_1) \right) - \frac{\cot(\varphi) \cdot \cos(k) \cdot \left(t_0 + Y_{CE}(X_t) \cdot \frac{dY_{CE}(X_t)}{dX_t} \right)}{\sqrt{t_0^2 + Y_{CE}(X_t)^2}} \right]}{\left(\frac{dY_{CE}(X_t)}{dX_t} \cos(k_1) - \sin(k_1) \right)} \right] \quad (10)$$

Знак в формуле назначается в зависимости от внешнего нормального направления кривизны кривой. Определение диапазонов существования поверхностей без самопересечения представлен в следующем пункте.

Таким образом реальный наклон образующей на траектории лазерного луча или образующей шлифовального круга определяется углом α_s и углом наклона нормали к режущей кромке η .

$$\eta(t_0) = \frac{\pi}{2} + \operatorname{atan} \left(\frac{df_{CE}(t_0)}{dt_0} \right) \quad (11)$$

Для каждого бесконечно малого элемента режущей кромки можно определить комплексную траекторию заточки в статической инструментальной системе координат и передать данные систему координат.

Форма задней поверхности и поиск расположения образующей задней поверхности определяется в зависимости от положения режущей кромки. При анализе формы можно заметить два перепада направления кромки. Таким образом направление подсчета касательного вектора при переходе в режущую кромку изменяется два раза. В точке перегиба поле векторов главной нормали испытывает разрыв. Внешнее нормальное направление кривой изменяет знак. Вектор нормали к режущей кромки с выпуклым участком положительно, а в правой и по центру при вогнутом участке –

отрицательно. В результате для непрерывного существования решения необходимо установить диапазоны поиска угла наклона задней поверхности с расчетом общих линий на фасонной заточке задней поверхности

Рассмотрим существование кривых в непрерывном диапазоне координат, поверхности имеют область единой кривизны, ограниченную условием контакта $\eta - 90 \leq 0 \rightarrow \alpha \leq 0$ и $\eta - 90 \leq 0 \rightarrow \alpha \leq 0$, пример существования непрерывной поверхности представлен на рисунке 2.

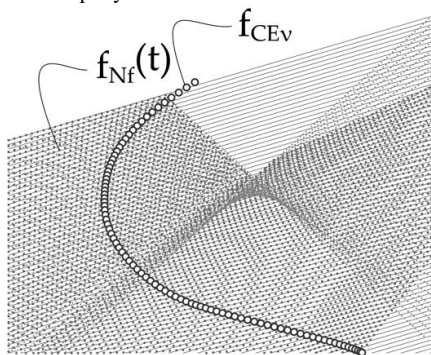


Рис. 2. Комбинация задних поверхностей при изменении знака внешнего нормального направления кривой (режущей кромки)

Удовлетворение полученному условию обеспечивает регулярность поверхности, исключит самопересечений и сохранением характеристик единства для автоматического создания траекторий на станок с ЧПУ. В этих диапазонах исключается наличие вырожденных точек, что позволяет не потерять информацию о криволинейной задней поверхности на всем диапазоне режущей кромки.

3. Обсуждение и результаты

Обобщённая математическая модель острозаточенных зубьев режущих инструментов для фасонных режущих кромок на базе конической производящей поверхности резания является исходными данными для создания направляющих векторов траектории движения при заточке зуба инструмента. Сочетание выполнения ограничений и поиска фиксированных точек при соединении участков поверхности с переменным нормальным направлением режущей кромки сверла позволяет избежать вырожденных результатов. Для решения технологической задачи необходимо заточить заднюю поверхность под углом α_m . Направляющая траектории движения задается нормально режущей кромки под углом η относительно оси OX . В результате работы системы группу различных форм режущих кромок и траектории движения с учетом соединения групп поверхностей, образующих плавную заднюю поверхность. Существуют различные формы режущих кромок режущих инструментов представлены углы наклона в нормальном сечении: при заточке зуба сверла (рисунок 3а), при заточке зуба фрезы (рисунок 3с). Зависимость угла наклона направляющей траектории при заточки соответствующим формам режущих кромок задних поверхностей зубьев показаны на рисунка 3b и 3d.

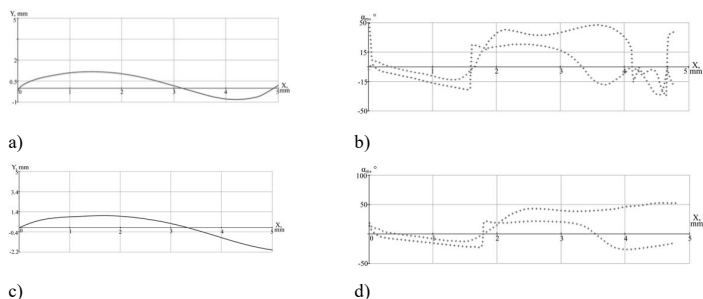


Рис. 3. Различные формы режущих кромок режущих на виде сверху: при заточке зуба сверла (а), при заточке зуба фрезы (с) и зависимость угла наклона направляющей траектории при заточки соответствующим формам режущих кромок а и с задних поверхностей зубьев b и d.

4. Заключение

В отличие известных новая модель проектирования и заточки зуба инструмента не дискредитируется участками кромки и формирования условия стандартные формы задней поверхности, а создает геометрию вдоль свободно сформированной режущей кромки. Достигнута цель минимизация количества необходимых физических испытаний при расширении возможностей результатов моделирования. Во-первых, метод не имеет ограничений по форме режущей кромки, процессу эксплуатации и формы винтовой канавки. Во-вторых, необходимые предыдущие знания проектировщика об этапах проектирования и ограничениях формообразования минимизированы. Метод используется при разработке режущего инструмента и процесса для анализа различных геометрических закономерностей сложных форм инструмента на технологический процесс заточки зуба инструмента. Это позволяет адаптировать САПР острозаточенных зубьев режущих инструментов для технологии их формообразования на станке с ЧПУ. В результате в работе разработана платформу для проектирования новой формы задних поверхностей сверл и их производства. Развитие данного исследования позволит разработать такую систему и для заточки инструмента по передней поверхности с рациональным распределением переднего угла. Математическая модель процесса формообразования главной задней поверхности позволит обеспечить постоянство нормального заднего угла вдоль режущей кромки произвольной формы, также разработать различные виды подточек с постоянным передним нормальным углом.

5. Благодарности

The support of this work under the project FSFS-2024-0014 of the State Research Task is gratefully acknowledged and was carried out using equipment provided by the Center of Collective Use of MSUT STANKIN.

The study was carried out on the equipment of the Centre of collective use «State Engineering Center» of MSUT “STANKIN” supported by the Ministry of Higher Education of the Russian Federation (project № 075-15-2021-695 from 26.07.2021, unique identifier RF-2296/61321X0013).

Литература

1. Liang, Z., Guo, H., Wang, X. et al. Influence of chisel edge axial rake angle on the drilling performance of helical point micro-drill. *Int J Adv Manuf Technol* 107, 2137–2149 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05180-6>
2. Abouridouane, Mustapha & Klocke, F. & Lung, D. (2013). Microstructure-based 3D Finite Element Model for Micro Drilling Carbon Steels. *Procedia CIRP*. 8. 94-99. 10.1016/j.procir.2013.06.071.
3. Bobzin, Kirsten. (2016). High-performance coatings for cutting tools. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 18. 10.1016/j.cirpj.2016.11.004.
4. Bai, H., Gao, F., Shen, Y. et al. Forming method and experimental research on wire cutting of twist drill cone flank. *Int J Adv Manuf Technol* 103, 4815–4823 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04044-y>
5. Jiang, L., Yang, Z., Li, Y. et al. An optimized calculation method of the grinding wheel profile for the helical flute forming grinding. *Int J Adv Manuf Technol* 132, 1649–1664 (2024). <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13447-5>
6. Xiong, Q., Yan, Q., Lu, J. et al. The effects of grinding process parameters of a cemented carbide micro-drill on cutting edge burr formation. *Int J Adv Manuf Technol* 117, 3041–3051 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07662-7>
7. Grigoriev, S. N., Pivkin, P. M., Grechishnikov, V. A., Petukhov, Y. E., Volosova, M. A. and Nadykto, A. B., “High-precision method for determining the optimal trajectory of movement of a conical grinding wheel relative to the helical grooves of solid ceramic mills,” presented at Emerging Imaging and Sensing Technologies for Security and Defence V; Advanced Manufacturing Technologies for Micro- and Nanosystems in Security and Defence III, 20 September 2020, Online Only, United Kingdom, 48, SPIE doi:10.1117/12.2574389.
8. Ren, Kaichun & Ni, Jun. (1999). Analyses of Drill Flute and Cutting Angles. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 15. 10.1007/s001700050100.
9. Petukhov, Y.E., Vodovozov, A.A. Sharpening helical bits with curvilinear cutting edges at the rear surface. *Russ. Engin. Res.* 35, 670–673 (2015). <https://doi.org/10.3103/S1068798X15090178>
10. Liu, X., Chen, Z., Ji, W. et al. A compensation method for wheel wear in solid cutting tool groove grinding based on iteration algorithm. *Int J Adv Manuf Technol* 107, 3389–3399 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05269-y>
11. Gradisek J, Kalveram M, Weinert K (2004) Mechanistic identification of specific force coefficients for a general end mill. *Int J Mach Tools Manuf* 44:401–414.
12. Böß, V., Niederwestberg, D., Ammermann, C. et al. Cutting edge orthogonal contact-zone analysis using detailed tool shape representation. *Int J Adv Manuf Technol* 75, 1641–1650 (2014). <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6230-8>
13. Yang Y, Zhang W, Wan M, Ma Y (2013) A solid trimming method to extract cutter-workpiece engagement maps for multi-axis milling. *Int J Adv Manuf Technol* 68:2801–2813.
14. Pivkin, P. M., Yazev, A. M., Grechishnikov, V. A., Ershov, A. A., Minin, I. V., Zelensky, A. A., Alenina, E. E., Jiang, X. and Nadykto, A. B., “An approach for recognizing surface defects in products with a complex helical shape,” presented at Optoelectronic Imaging and Multimedia Technology X, 27 November 2023, Beijing, China, 65, SPIE doi:10.1117/12.2690093.
15. Zou, P., Kim, M.I. & Liu, F. Modeling and optimization of grinding parameters for custom-oriented twist drill with a Biglide parallel machine. *Int J Adv Manuf Technol* 88, 691–699 (2017). <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8805-z>

16. Karaguzel, Umut & Bakkal, Mustafa & Budak, Erhan. (2017). Mechanical and Thermal Modeling of Orthogonal Turn-milling Operation. *Procedia CIRP*. 58. 287-292. 10.1016/j.procir.2017.03.191.
17. Kyratsis, Panagiotis & Tapoglou, Nikolaos & Bilalis, N. & Antoniadis, Aristomenis. (2011). Thrust force prediction of twist drill tools using a 3D CAD system application programming interface. *Int. J. of Machining and Machinability of Materials*. 10. 18–33. 10.1504/IJMMM.2011.040852.
18. Tsai WD, Wu SM (1979) A mathematical model for drill point design and grinding. *J Eng Ind* 101(3):333–340
19. Sambhav K, Tandon P, Dhande SG (2012) Geometric modeling and validation of twist drills with a generic point profile. *Appl Math Model* 36(6):2384–2403
20. Ren K, Ni J (1999) Analyses of drill flute and cutting angles. *Int J Adv Manuf Technol* 15(8):546–553
21. Combined processing of micro cutters using a beam of fast argon atoms in plasma / A. Metel, Y. Melnik, E. Mustafaev [et al.] // *Coatings*. – 2021. – Vol. 11, № 4. – P. 465. – DOI: 10.3390/coatings11040465.
22. Zhang Q, Wang J (2010) Geometry, specification, and drilling performance of a plane rake faced drill point design. *Proc Inst Mech Eng C J Mech Eng Sci* 224(2):369–378]
23. Технология изготовления цельной конструкции резца для обработки торцевых канавок сложной формы / П. М. Пивкин // *Вестник МГТУ "Станкин"*. – 2016. – № 4(39). – С. 40–46. – EDN XIBSYP.
24. Zhou, R. Analytical model of milling forces prediction in five-axis milling process. *Int J Adv Manuf Technol* 108, 3045–3054 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05582-6>

МАРКОВСКАЯ МОДЕЛЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНКАПСУЛИРОВАННОГО ЗНАНИЯ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ФИНАНСОВЫМ ИНСТИТУТОМ

О.Е. Пыркина, А.Ю. Юданов

**MARKOV MODEL FOR SIMULATION THE USE OF ENCAPSULATED
KNOWLEDGE IN THE MANAGEMENT OF A FINANCIAL INSTITUTION**

Olga E. Pyrkina, Andrei Yu. Yudanov

Финансовый университет при Правительстве РФ, Москва, Россия

125167, Ленинградский проспект, 49/2

Тел.: +7 (499) 553-12-68, e-mail: olga.pyrkina@gmail.com

В работе рассматривается моделирование управления абстрактным финансовым институтом (кредитной организацией, или банком) на основе применения инкапсулированного знания. Под инкапсуляцией знания в данном случае понимается замена полного понимания процесса алгоритмом действий, достаточных для достижения результата. Такой подход поддерживает активно используемую в настоящее время концепцию фирмы как агрегатора и потребителя знаний (knowledge-based view of the firm – KBV [1]) и опирается на понимание знания как основного ресурса фирмы, обеспечивающего ее функционирование и конкурентоспособность. Модель анализирует эффективность использования инкапсулированного знания как важного элемента управления на примере некоего абстрактного финансового института (кредитной организации, или банка).

К инкапсулированному знанию можно отнести очень многие компоненты, без которых функционирование современного банка попросту невозможно. Оно охватывает широкий круг управленческих процедур: от простейших канцелярских правил, назначение которых исполнителю непонятно, до сложнейших комплексов компьютерных программ (сугубо прикладных административных, исследовательских, математических моделей различного вида), которыми работник владеет только на уровне пользователя. К таким моделям можно отнести, например, модели кредитного скоринга на основе машинного обучения, семантические модели для создания чат – ботов, модели обработки данных разного вида (иерархические, реляционные, объектно – ориентированные и др.).

Использование всех этих форм инкапсулированного знания обладает одним общим свойством – человек, его применяющий, не должен обладать всей полнотой знаний по данному вопросу, для применения инкапсулированного достаточно четкой пользовательской инструкции. Наличие этого свойства приводит к существенной экономии ресурсов, затрачиваемых на обучение персонала, и к повышению эффективности каждодневной рутинной деятельности [2]. При этом творческий процесс, требующий глубокого понимания природы вещей, остается лишь для задач разработки «капсул знаний» и для решения нестандартных задач, не вписывающихся в формат рутинной деятельности.

Высокая эффективность работы организации, тотально использующей инкапсулированное знание (каждый работник следует четкому алгоритму, подлинного, глубинного смысла которого он не понимает) имеет, однако, оборотную сторону. Абстрактный банк, соответствующий этому допущению, превращается в «заводную игрушку», хорошо работающую только в том случае, если действующая в нем система

инкапсулированного знания идеально соответствует реальным бизнес-условиям, в частности, характеру поступающих заказов. Поскольку такого идеального соответствия в действительности не бывает, центральное значение приобретает задача управления, постоянной подстройки системы инкапсулированного знания предпринимателем для наилучшего ее соответствия внешней и внутренней среде фирмы.

Математическая модель такой системы управления строится на основе скрытых цепей Маркова (Hidden Markov Model, HMM). Концепция таких цепей активно разрабатывалась в 60-е и 70-е годы прошлого века в применении к проблеме автоматического распознавания речи [3], но впоследствии стала активно применяться и во многих других задачах, например, при изучении генома [4] или в исследованиях по информационной безопасности [5]. При дальнейшем анализе проблемы инкапсуляции знаний при управлении фирмой и развитии математической модели процесса управления возможно применение гибридных систем, состоящих из комбинации скрытых моделей Маркова и искусственных нейронных сетей, в которых используют преимущества обоих методов моделирования [6].

Предлагаемая в настоящей работе модель на основе скрытых цепей Маркова имитирует работу случайного процесса марковского типа с неизвестными характеристиками, и задачей ставится «разгадывание» неизвестных характеристик процесса на основе наблюдаемых. При этом подразумевается, что наблюдению доступны лишь какие-то функции от марковского процесса. «Скрытость» модели в том и заключается, что мы не можем получить сами состояния процесса, мы не знаем, сколько их и какие между ними существуют связи. Эти состояния и факторы, их связывающие, суть параметры модели. Поэтому в такой модели мы можем следить лишь за переменными, на которые оказывает влияние то или иное конкретное состояние случайного процесса.

Каждое состояние имеет вероятностное распределение среди всех возможных выходных значений. Поэтому последовательность символов, сгенерированная HMM, даёт информацию о последовательности состояний. Полученные характеристики (найденные параметры процесса) могут быть использованы в дальнейшем анализе; такая модель может быть рассмотрена как простейшая байесовская сеть доверия [7]. Задачей оптимизации системы управления кредитной организацией (банком) является нахождение (генерация) такой последовательности скрытых состояний («капсул знания»), которая позволяют получить на выходе желаемый результат – прибыль банка – с наименьшими затратами времени и усилий сотрудников.

В предлагаемой модели Маркова первого порядка рассматриваются только дискретные марковские процессы. На вход системы кредитной организации (банка) попадает какая-то заявка – запрос на финансовую услугу или продукт. Этот запрос нужно правильно распознать, классифицировать и провести через внутреннюю структуру банка (систему состояний), обрабатывая с помощью «капсул знания» на каждом этапе так, чтобы на выходе получить желаемый результат – прибыль банка.

В нашей модели распределение вероятностей для начального состояния $\pi = \{\pi_i\}$ отражает спектр и долю заявок различных типов на финансовую услугу (продукт), поступающих в банк. После классификации (отнесения к одному из этих состояний) заявка проходит серию этапов обработки, последовательно попадая в одно из множества состояний S ; переходы осуществляются в соответствии с матрицей переходных вероятностей $A = \{a_{ij}\}$. При каждом переходе модель генерирует контрольную переменную O_i – один из символов наблюдаемой последовательности $O = O_1 O_2 \dots O_T$, значения которых, берущиеся из «алфавита» $V = \{v_1, v_2, \dots, v_M\}$, позволяют судить об успешности обработки заявки- на каждом этапе. При этом заявка считается

обработанной на каждом этапе успешно, если происходит переход на следующий этап обработки (следующее состояние); сохранение состояния или возврат к предшествующему состоянию свидетельствуют о неудачной обработке. Таким образом, на начальном этапе нас будет интересовать «алфавит», состоящий из трех символов $V = \{1, 0.5, 0\}$, где 1 соответствует успешной обработке заявки, 0.5 соответствует заявке, оставшейся в прежнем состоянии, и 0 выбираем для возврата к предыдущему состоянию (этапу обработки).

При моделировании последовательно решаются 3 задачи:

1. По наблюдаемой последовательности $O = O_1 O_2 \dots O_T$ контрольных переменных и модели $\lambda = \{N, M, A, B, \pi\}$ рассчитывается вероятность $P(O|\lambda)$ того, что наблюдаемая последовательность построена именно для данной модели.
2. По наблюдаемой последовательности $O = O_1 O_2 \dots O_T$ контрольных переменных и модели $\lambda = \{N, M, A, B, \pi\}$ подбирается последовательность состояний системы $Q = q_1, q_2, \dots, q_T$ («капсул знаний»), которая наилучшим образом соответствует наблюдаемой модели.
3. Параметры модели $\lambda = \{N, M, A, B, \pi\}$ подбираются таким образом, чтобы максимизировать вероятность $P(O|\lambda)$. В этом случае мы находим наиболее подходящую последовательность скрытых узлов S , которая наиболее точно описывает данную модель. Таким образом, мы определяем, какими должны быть «капсулы знаний», обеспечивающие успешное функционирование банка (финансовой структуры).

Для иллюстрации идеи представлена простейшая модель обработки кредитных заявок физических лиц. Классифицируем заявки на кредит, относя их к одному из четырех типов, в зависимости от объема запрашиваемой суммы и формы залога:

- 1) Ипотечный кредит
- 2) Автокредит
- 3) Кредит на технику
- 4) Кредит неопределенного назначения

Соответственно распределение вероятностей для начального состояния выбирается простейшим: $\pi = \{0.25, 0.25, 0.25, 0.25\}$.

Далее, работа с заявкой проходит 3 глобальных этапа:

1. анализ документов о кандидатуре и финансовом положении заемщика,
2. принятие решения о выдаче кредита и его выдача,
3. контроль за своевременностью выплат и закрытие кредита в случае его погашения

При необходимости каждый из этих трех глобальных этапов разбивается еще на несколько «подэтапов».

Идеальным прохождением заявки через все три этапа считается последовательность $O = 1, 1, 1$, допустимым $O = 1, 0.5, 1$, содержащая не более одной задержки на любом из этапов, недопустимым – последовательность, содержащая хотя бы одно нулевое значение.

Для подбора оптимальных скрытых состояний – капсул знания – в модели используется алгоритм Витерби [8].

Результатом моделирования является или подбор состояний – капсул знания – обеспечивающих успешное прохождение заявки, или вывод о том, что при существующих параметрах модели – наборе капсул знания – успешное прохождение заявки невозможно, что свидетельствует о необходимости изменения параметров модели

Литература

1. Demsetz, H. (1988). The theory of firm revisited. *Journal of Law, Economics and Organization*, 4(1), 141–161.
2. Мальцев В. В., Юданов А. Ю. Теория фирмы и феномен инкапсуляции знания // *Вопросы экономики*. № 1. 2024. С. 115–136.
3. Rabiner L. A. Tutorial on Hidden Markov Models and Selected Applications in Speech Recognition// *Proceedings of the IEEE*, 1989, 77, 257-286.
<http://dx.doi.org/10.1109/5.18626>
4. Durbin R., Eddy S.R., Krogh A., Mitchison G. *Biological sequence analysis: probabilistic models of proteins and nucleic acids*. Cambridge University Press 2002, 350pp.
5. Токарев В.Л. Скрытые марковские модели в задаче обнаружения атак на компьютерные сети. *Чебышевский сборник*. 2021;22(5):391-399.
<https://doi.org/10.22405/2226-8383-2021-22-5-391-399>
6. Fink G.A. *Markov Models for Pattern Recognition From Theory to Applications*. Springer-Verlag London 2014, 276pp.
7. Pearl J. *Causality: Models, Reasoning, and Inference*. – 2-nd Edition. – Cambridge University Press, 2009. – 464 p. – ISBN 9780521895606.
8. Viterbi, A.J. Error bounds for convolutional codes and an asymptotically optimum decoding algorithm. *IEEE Transactions on Information Theory*. April 1967, 13 (2): 260–269. <https://doi:10.1109/TIT.1967.1054010>

РАСЧЕТ ИНДЕКСА МОРСА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ОРБИТАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ШРЕДИНГЕРА НА ГРАФЕ-ЗВЕЗДЕ

CALCULATION OF THE MORSE INDEX IN THE STUDY OF THE ORBITAL STABILITY OF THE NONLINEAR SCHRÖDINGER EQUATION ON A STAR GRAPH

Рогозина Н.Г.

Rogozina N.G.

МГТУ «СТАНКИН», Москва, Россия

MSTU "STANKIN", Moscow, Russia

127055, Вадковский Переулок, 3а

Тел: 8(985)931-12-13, почта: natasha-ro@mail.ru

В работе предлагается новый метод расчета индекса Морса при исследовании орбитальной устойчивости нелинейного уравнения Шредингера

$$i \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} = - \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} - (p+1) |u(x, t)|^{2p} u(x, t), \quad p > 0 \quad (1)$$

на графе-звезде с N ребрами бесконечной длины [1]. После линеаризации стационарного уравнения Шредингера: $-u'' - (p+1)|u|^{2p}u = -\omega u$, отвечающего (1), исследуется поведение собственных значений $\lambda \in (-\infty, 1)$ краевой задачи

$$\left\{ \begin{array}{l} -\phi_j''(x, \lambda) + (1 - (p+1)(2p+1)s(x)^{2p})\phi_j(x, \lambda) = \lambda\phi_j(x, \lambda); x \in (0, \infty), j = 3 \\ AX(x, \lambda) + BU(x, \lambda) = 0, X(x, \lambda) = \begin{bmatrix} \phi_1(0, \lambda) \\ \vdots \\ \phi_n(0, \lambda) \end{bmatrix}, U(x, \lambda) = \begin{bmatrix} \phi_1'(0, \lambda) \\ \vdots \\ \phi_n'(0, \lambda) \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & -1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 1 & -1 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 \\ 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \\ Y(x, \lambda) = \begin{bmatrix} X(x, \lambda) \\ U(x, \lambda) \end{bmatrix} = \exp(-\sqrt{1-\lambda}x) \left(\begin{bmatrix} I_N \\ -\sqrt{1-\lambda} I_N \end{bmatrix} + O(\exp(-\eta x)) \right), \eta > 0, x \rightarrow \infty. \end{array} \right. \quad (2)$$

Для любого вещественного $\lambda_0 < 1$ число собственных значений краевой задачи (2) строго меньших λ_0 , определяется формулой [2]:

$$\#(-\infty, \lambda_0) = \text{Mas} \left(J\beta^T, Y(\lambda_0); [0, \infty) \right), \quad \lambda_0 < 1, \beta = \begin{bmatrix} A & B \end{bmatrix}, J = \begin{bmatrix} 0_N & I_N \\ -I_N & 0_N \end{bmatrix}$$

где $\text{Mas}(J\beta^T, Y(\lambda_0); [0, \infty))$ - индекс Маслова матричного решения $Y(x, \lambda_0), x \in [0, \infty)$, в частности, индекс Морса Mor для уравнения (1) равен числу отрицательных собственных значений (2) и определен формулой $Mor = \text{Mas}(J\beta^T, Y(0); [0, \infty))$ [1, 2]. В данной работе предложен новый метод вычисления индекса Маслова и индекса Морса, основанный на результатах работы [3].

Литература

1. A. Kairzhan, D. Pelinkovsky: Nonlinear instability of half-solitons on star graphs // J.Differential Equations 264 (2018) 7357–7383.
2. P. Howard, A. Sukhtayev: The Maslov and Morse Indices for Sturm-Liouville Systems on the Half-Line // Discrete and Continuous Dynamical Systems, Volume 40, Issue 2: 983-1012, 2020.
3. J. Elyseeva, P. Šepitka, R. Šimon Hilscher: Oscillation Numbers for Continuous Lagrangian Paths and Maslov Index // Journal of Dynamic and Differential Equations (2023) 35:2589–2620

УГЛУБЛЕНИЕ ЗНАНИЙ В СФЕРЕ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ В ПРОЦЕССЕ ШКОЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

DEEPENING KNOWLEDGE IN THE FIELD OF CYBERSECURITY IN THE PROCESS OF SCHOOL EDUCATION

Я.А. Романов

Ya.A. Romanov

Школа №15

170039, Россия, Тверь, Молодёжный бульвар, 10, к. 2.

School №15

170039, Russia, Tver', Molodezhny boulevard, 10, building 2.

ekaterlnayarovslav@yandex.ru

Аннотация

В связи с распространением доступности и увеличением охвата сети интернет [1], а также совершенствованием компьютерных вирусов обсуждается необходимость введения в образовательный процесс в школах занятий по тематике защиты от компьютерных вирусов [2]. В связи с этим предлагается методика проведения мероприятий данного типа в школьном курсе информатики.

Ключевые слова: кибербезопасность, компьютерный вирус, образовательный процесс, классификация, киберосведомленность.

Annotation

In connection with the spread of accessibility and increased coverage of the Internet, as well as the improvement of computer viruses, the need to introduce classes on protection against computer viruses into the educational process in schools is discussed. In this regard, a methodology for conducting events of this type in a school computer science course is proposed.

Keywords: cyber security, computer virus, educational process, classification, cyber awareness.

В настоящее время происходит активное развитие информационных технологий, в связи с этим особенно актуальным становится создание классификации компьютерных вирусов и способов защиты от них. Одной из самых уязвимых для вирусов групп является возрастная группа 10–18 лет. Это связано с тем, что данная группа не обладает достаточным опытом использования сети интернет и, следовательно, является привлекательной мишенью для мошенников и недобросовестных пользователей. Разработанные на данный момент меры предосторожности для данной группы являются неэффективными, так как преподносятся в непривлекательной форме и содержат исключительно общие рекомендации. В связи с этим возникает необходимость разработки методики защиты от угроз в сети и преподнесения данной методики в простой, понятной и привлекательной форме в образовательном процессе. В рамках данной методики пользователям предлагается ознакомиться со следующей информацией: 1. История возникновения вирусов и первого человека, применившего вирус для получения

выгоды. 2. Общие сведения о всех разновидностях вирусов, использующихся в настоящее время. 3. Подробное описание наиболее распространенных вирусов. 4. Ознакомление с самыми уникальными и вредоносными представителями вирусов и результатами их применения в различных областях. 5. Методика распознавания вирусов в процессе пользования компьютера. 6. Способы защиты от компьютерных вирусов различных типов.

В ходе работы по данному направлению была разработана презентация для проведения занятий. Предложенная методика повышения грамотности в сфере кибербезопасности уже была опробована в рамках проведения урока в школе № 15 г. Твери.

В заключении необходимо отметить, что грамотности в сфере компьютерной безопасности пользователей сети интернет необходимо уделять особое внимание, так как процесс заражения компьютерным вирусом является не только результатом недочета пользователя, но и результатом психологического воздействия на него и носит междисциплинарный характер.

Литература

1. <https://www.forbes.ru/tekhnologii/525618-s-operezeniem-trafika-kak-vyroc-v-rossii-ob-em-dannyh-v-seti-i-pri-cem-zdes-youtube>
2. <https://moslenta.ru/news/city/uchitelya-ocenili-neobkhodimost-zanyatii-po-kiber-bezopasnosti-dlya-shkolnikov-14-10-2024.htm>

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМ И ИХ ИЗМЕНЕНИЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ

FEATURES OF THE STRUCTURE OF THE SOCIAL SYSTEMS AND THEIR CHANGES UNDER THE INFLUENCE OF VARIOUS FACTORS

Е.Ю. Романова

E.Yu. Romanova

Тверской институт (Филиал) АНО ВО МГЭУ,
170006, Россия, Тверь, улица Дмитрия Донского, д. 37

TVER BRANCH OF MOSCOW HUMANITIES AND ECONOMICS UNIVERSITY,
170006, Russia, Tver, Dmitry Donskiy Street, 37

Особенностью структуры социальных систем является многоуровневость, нелинейность, самоорганизационность. Все части системы взаимосвязаны и взаимодействуют в социальном поле. Под воздействием внешних и внутренних факторов происходят изменения систем. Рассмотрены схемы-модели изменений и факторов, вызывающих эти изменения.

Ключевые слова: система, структура, общество, индивидуумы.

A feature of the structure of social systems is the multi-level, non-linearity, self-organized. All parts of the system are interconnected and interact in the social field. Under the influence of external and internal factors, changes in the systems occur. The schemes-models of the changes and factors causing these changes are considered.

Keywords: system, structure, society, individuals.

Социальные системы – открытые, сложные, многоуровневые, нелинейные, самоорганизующиеся системы. Необходимо также учитывать, что социальные системы – динамические, развивающиеся, подверженные внешним воздействиям. Социальные системы можно рассматривать с разных точек зрения: 1) систему как целое в определенном состоянии (макроуровень); 2) подгруппы, группы, подсистемы (мезоуровень); 3) индивидуумы (микроуровень). Элементы системы взаимосвязаны, взаимодействуют друг с другом. Нелинейность такой системы определяется многовариантностью путей развития. Макроуровень во многих случаях определяет поведение и структуру частей системы на других уровнях, но мезо- и микроуровень могут влиять на систему в целом.

Исследования социальных систем показали [1, 2], что: 1) социальные явления и процессы, происходящие в социальных системах определяются внутренней структурой; 2) выявлены специфические изменения и закономерности перехода социальных систем из одного качественного состояния в другое. Наиболее сложными элементами социальных систем является общество (социум) и его элементы – индивидуумы, социальная деятельность которых определяется следующим: 1) определенным социальным статусом; 2) социальными функциями, т.е. ролями, которые они выполняют; 3) социальными нормами и ценностями, принятыми в системе; 4) индивидуальными качествами (мотивы, интересы и т.п.)

При моделировании социальных систем необходимо рассматривать общество как единый организм, т.е. органическое единство различных сторон его жизнедеятельности и функционирования с учетом взаимосвязи и взаимодействия, объективного и субъективного, материального и духовного. Взаимодействие индивидуума и общества формирует характер и индивидуальность отдельной личности. Все виды взаимодействий в социальной системе осуществляются через социальные поля [3]. Структуру социальных изменений и факторов, их определяющих, можно представить следующим образом [1, 2, 4]:

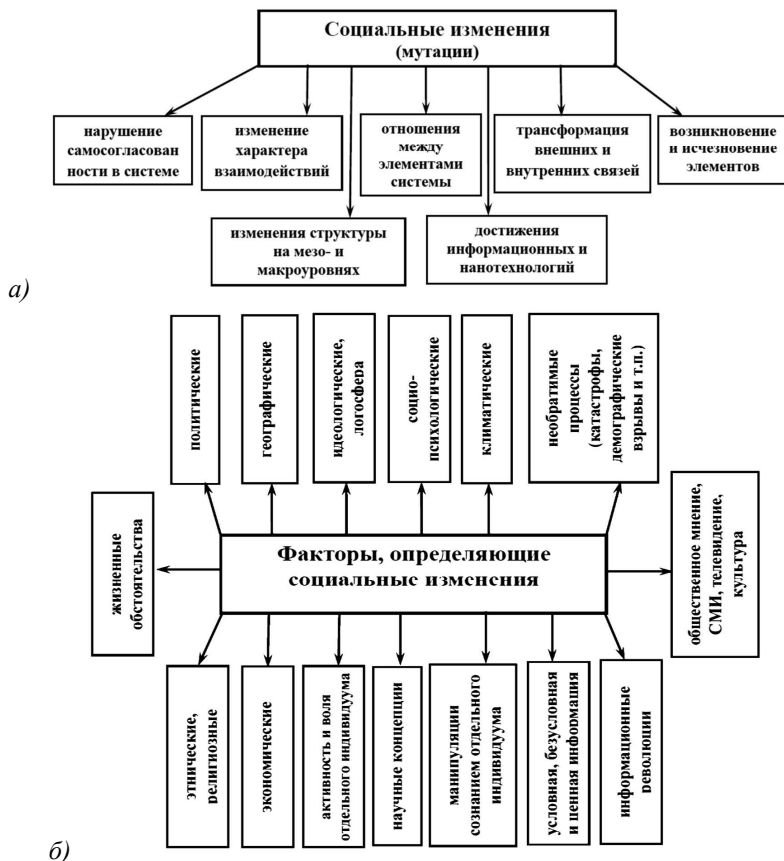


Рис. 1. Схема – а) видов социальных изменений и б) факторов их вызывающих

В заключении необходимо отметить, что при моделировании сложных социальных систем надо использовать системный, синергетический подходы, учитывать функционирование всех уровней системы и особое внимание уделить роли отдельных индивидуумов при переходе системы в целом из одного состояния в другое.

Литература

1. Осипов Г.В. Социология. – М.: Издательство ЛКИ, 2012. – 384 с.
2. Вайдлих В. Социодинамика: Системный подход к математическому моделированию в социальных науках./ Под ред. Ю.С. Попкова, А.Е. Семечкина. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010. – 480 с.
3. Гуц А.К., Паутова Л.А., Фролова Ю.В. Математические методы в социологии. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2014. – 214 с.
4. Хакен Г. Тайны природы. Синергетика: учение о воздействии. – Москва - Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. – 320 с.

ЭНТРОПИЙНАЯ ОЦЕНКА «ПОЛЕЗНОЙ ИНФОРМАЦИИ» О ФИНАНСОВОМ СОСТОЯНИИ ПРЕДПРИЯТИЯ

Т.В. Рыжкова

РЭУ им. Г.В. Плеханова, Москва, Россия
117997 Российская Федерация, г. Москва, Стремянный пер., 36,
Тел.: +7 (499) 236-7373. E-mail: RTVHOME@yandex.ru

При построении энтропийной модели количественной оценки информации по финансовому анализу компании на первом этапе идет определение вероятностных характеристик информации. При этом под экономической информацией понимаем сведения, которые снимают неопределенность, существующую до получения информации. В противном случае, сведения несут дезинформацию. Затем идет этап количественной оценки и анализа энтропийных показателей X_i [1]. На этом этапе возможна постановка гипотез об отклонениях информации при изменении поведения случайных величин в обозначенных диапазонах. В таблице 1, в качестве примера, приведены вероятностные распределения дискретного показателя X_1 - безразмерная случайная величина со значениями, равными коэффициенту покрытия (current ratio).

Таблица 1

Критические границы показателя	A ₁ -A ₂	A ₂ -A ₃	A ₃ -A ₄	A ₄ -A ₅
Истинное вероятностное распределение P_i показателя X_1	p_1^1	p_2^1	p_3^1	p_4^1
Первое состояние(после истинного) изменения вероятностного распределения q_i показателя X_1	q_1^1	q_2^1	q_3^1	q_4^1
Второе состояние(после первого) изменения вероятностного распределения q_i показателя X_1	q_1^2	q_2^2	q_3^2	q_4^2

Если $A1 = \{a_i\}$, $i=1,2,3,4$ – множество с характеристиками изменений ситуаций в истинных распределениях вероятностей и переходом в соответствии с первым изменением состояния показателя. По методу Бонгарда[2] рассчитываем энтропию $H(A1)$, как неопределенности при первом изменении состояния (Таблица 1) –

$$H(A1) = -\sum_{i=1}^4 p_i \log q_i$$

Тогда «полезная информация» при переходе в первое состояние от

истинного будет определяться разностью энтропий

$$I(A0 \rightarrow A1) = H(A1) - H(A0).$$

Литература

1. T.V. Ryzhkova. Entropy Economic Model of the Company // IV International Conference “Modeling of Nonlinear Processes and Systems” (MNPS-2019). EPJ Web of Conferences, 2019, 224, 06007. doi.org/10.1051/epjconf/201922406007.
2. Бонгард М.М. О понятии «полезная информация» – В сб.: Проблемы кибернетики. Вып. 9. М. Физматгиз, 1963.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ И МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ БЛОКИРОВКИ АТОМОВ ПРИ ЭМИССИИ С ПОВЕРХНОСТИ ГРАНИ (001) Au

Самойлов В.Н.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
г. Москва, Россия,
119991, Ленинские горы, д. 1
Тел.: +7(965)369-35-05, e-mail: samoilov@polly.phys.msu.ru

Мусин А.И.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вятский государственный университет»,
Кировская обл., г. Киров, Россия
610000, ул. Московская, д. 36
Тел.: +7(926)134-34-56, e-mail: ai.musin@physics.msu.ru

Аристархов П. В.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва, Россия
127055, Вадковский пер., д. 3
Тел.: +7(909)948-16-92, e-mail: pavel.aristarkhov@mail.ru

В явлении распыления поверхности твердого тела под действием ионной бомбардировки можно выделить три стадии: 1) падение иона на поверхность; 2) образование каскада столкновений; 3) эмиссия атомов с поверхности.

Ранее было показано [1], что молекулярно-динамическая модель, в которой рассматривается только стадия эмиссии атомов с поверхности грани (001) Ni, тем не менее, воспроизводит важнейшие особенности распределений распыленных атомов по углам и энергии, наблюдаемые экспериментально, например, эффект немонотонного сдвига максимума углового распределения распыленных атомов с увеличением энергии наблюдения [2]. Поэтому взаимодействие эмитируемого атома с поверхностью в процессе вылета является определяющим фактором при формировании конечного распределения распыленных атомов по углам и энергии.

В настоящей работе исследовались особенности эмиссии атомов с поверхности грани (001) Au по полярному углу. Были рассмотрены лишь атомы, вылетающие в азимутальном направлении $\langle 010 \rangle$, совпадающим с азимутальным направлением на максимум в распределении распыленных атомов по углам (пятно Венера). В этом случае эмитируемый атом рассеивается на двух ближайших к нему атомах-соседях, образующих линзу из двух атомов в плоскости поверхности.

Аналитические расчеты эмиссии выполнялись по формулам из [3]. Использовалось приближение жестких сфер, диаметр которых зависит от начальной энергии эмитируемого атома и параметров потенциала взаимодействия. В качестве потенциала взаимодействия атом-атом использовался чисто отталкивательный потенциал Борна-Майера. Для учета сил притяжения после столкновения атом проходил через плоский потенциальный барьер, высота которого равна энергии связи золота $E_b = 3,78$ эВ [4].

Численные расчеты эмиссии выполнялись с помощью модели, аналогичной модели из [1], в которой учитывалось взаимодействие эмитируемого атома с 20 атомами поверхности грани (001) Au. В рамках метода молекулярной динамики (МД) интегрировалась система классических уравнений Ньютона с потенциалом взаимодействия Борна-Майера, который на малых расстояниях гладко сшивался с обратноквадратичным потенциалом. После удаления атома на достаточно большое расстояние от поверхности он также проходил через плоский потенциальный барьер высотой $E_b = 3,78$ эВ.

В рамках аналитической и молекулярно-динамической моделей были получены зависимости $1 - \cos \theta$ от $1 - \cos \theta_0$ для распыленных атомов, где θ_0 – начальный полярный угол вылета, θ – полярный угол наблюдения, для различных начальных энергий эмиссии E_0 (рис. 1 и 2). Для всех энергий, кроме 5 эВ, на графиках наблюдаются два конуса вылета. Первый конус вылета включает в себя распыленные атомы, которые вылетали вблизи нормали к поверхности и не испытали столкновения с линзой из двух атомов поверхности, второй конус вылета – распыленные атомы, которые в результате взаимодействия с линзой испытали на себе *блокировку*, т.е. отклонение по полярному углу в направлении нормали к поверхности.

В аналитической модели между конусами наблюдается резкий переход (излом графиков на рис. 1). Это происходит из-за того, что значение минимального угла θ_{cr} , при котором атом начинает сталкиваться с атомами линзы, четко определено. В МД-модели при удалении атомов друг от друга взаимодействие уменьшается постепенно, поэтому граница между конусами вылета на рис. 2 плавная.

На рис. 2 второй конус вылета смещен в сторону к нормали к поверхности (т.е. в область меньших углов θ) по сравнению с рис. 1. Это происходит из-за того, что траектория эмитируемого атома при блокировке сильнее разворачивается к нормали из-за более длительного взаимодействия с атомами линзы при использовании потенциала Борна-Майера, чем при использовании приближения жестких сфер. Кроме того, в аналитической модели [3] диаметр жестких сфер рассчитывается по начальной энергии эмиссии E_0 и далее фиксирован, что не совсем корректно, т.к. в процессе взаимодействия энергия атомов меняется со временем.

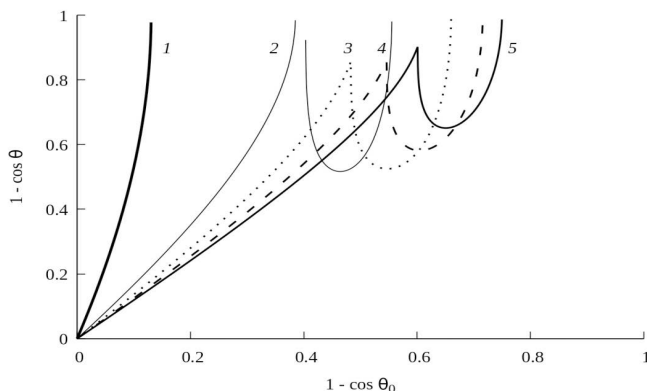


Рис. 1. Зависимости $1 - \cos \theta$ от $1 - \cos \theta_0$ для атомов, эмитируемых с поверхности грани (001) Au в азимутальном направлении $\langle 010 \rangle$ с начальными энергиями E_0 5 (1), 10 (2), 15 (3), 20 (4) и 25 (5) эВ, полученные аналитически в модели жестких сфер [3]

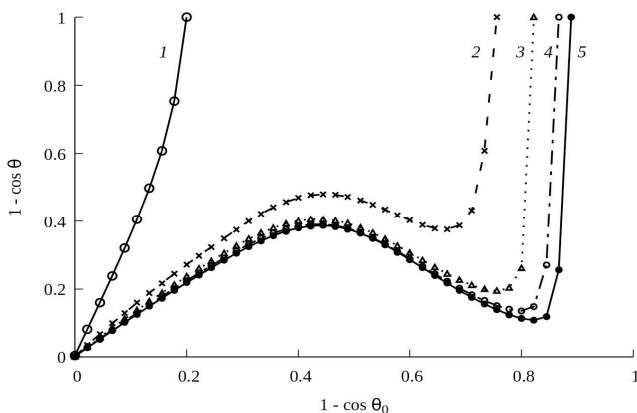


Рис. 2. Зависимости $1 - \cos \theta$ от $1 - \cos \theta_0$ для атомов, эмитируемых с поверхности грани (001) Au в азимутальном направлении $\langle 010 \rangle$ с начальными энергиями E_0 5 (1), 10 (2), 15 (3), 20 (4) и 25 (5) эВ, полученные методом молекулярной динамики

Результаты расчетов позволяют сделать вывод, что эффект блокировки проявляется сильнее в МД-модели, чем в аналитической модели. В численном эксперименте значительная часть распыленных атомов является *сильно блокированными*, для которых $\theta < \theta_0$. Этот результат согласуется с результатами работы [5], в которой использовалась полноценная МД-модель с падением ионов Ag на поверхность грани (001) Ni.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова [6].

Литература

1. Самойлов В.Н., Мусин А.И. Эффекты фокусировки атомов, эмитированных с грани (001) Ni, с разрешением по углам и энергии // Известия РАН. Серия физическая. 2018. Т. 82. № 2. С. 171-176.
2. van Veen A. Sputtering and Scattering by Interaction of Low Energy Noble Gas Ions with Monocrystalline Metal Surfaces: Ph.D. Thesis / A. van Veen; Univ. Utrecht, Utrecht, Netherlands. 1979.
3. Туляков Н.Ю., Левкович-Маслюк Ф.Л., Самойлов В.Н. Аналитические расчеты эмиссии атомов с поверхности граней (111) Ni, (001) Ni и (001) Au в рамках трехмерной модели // Поверхность. 2011. № 4. С. 34-46.
4. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела / пер. А.А. Гусева и А.В. Пахнева, под общ. ред. А.А. Гусева. М.: Наука, 1978. 791 с.
5. Samoilov V.N., Tatur A.E., Kovaleva N.A., Kozhanov A.E. Contribution of the surface mechanism to sputtering of (001) Ni: molecular dynamics computer simulation studies // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B. 1999. V. 153. No. 1-4. P. 319-325.
6. Voevodin V.I. et al. Supercomputer Lomonosov-2: Large Scale, Deep Monitoring and Fine Analytics for the User Community // Supercomputing Frontiers and Innovations. 2019. V. 6. No. 2. P. 4-11.

АВТОВОЛНОВАЯ МОДЕЛЬ РАЗВИТИЯ УРБООКОСИСТЕМ КАК СЛОЖНЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ

А.Э. Сидорова^а, Н.Т. Левашова^б

MODELING OF PROTEIN SUPERHELICES FOR QUANTITATIVE CHIRALITY ASSESSMENT

A.O. Lutsenko, A.E. Sidorova

Физический факультет, Москва МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия,

119991, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, с. 2,

Тел. (+7 495) 939-11-95, e-mail: ^аsky314bone@mail.ru, ^бlevashovant@physics.msu.ru

Рост численности населения, особенно в промышленных и экономических центрах, играет доминирующую роль в территориальном расширении городов во всем мире. Этот процесс, в первую очередь, связан с формированием структурно-пространственных неоднородностей в распределении плотности населения и, следовательно, антропогенно преобразованных городских геобиоценозов. Негативное воздействие антропогенных факторов (акустических и вибрационных, ЭМП промышленных частот, необратимого уплотнения грунтов под действием статических нагрузок, снижение уровня подземных вод, нарушение теплового режима на глубине до 100–300 м, изменение pH среды обитания организмов и т.д.) приводит к нарушению физико-химических свойств среды, скорости биодеструкции, количественному и качественному изменению трофических сетей на территории урбэкоосистем (УЭС). За счет прямых и обратных связей в общей системе УЭС допустимы два основных варианта развития: ослабление автоволнового фронта приводит к его разрыву или уничтожению, а усиление антропогенного воздействия способствует формированию самоподдерживающегося фронта автоволны возбуждения. В автоволновой модели развития УЭС рассматриваются как сопряженные в пространстве и времени активные среды (природная и антропогенная подсистемы). Управляющими параметрами в модели являются природные и антропогенные факторы, формирующие длину и форму автоволн. При этом скорости антропогенных процессов, по меньшей мере, на порядок больше скоростей природных процессов, поэтому антропогенные процессы в модели мы полагаем активаторами, а природные – ингибиторами общесистемных процессов.

На базе системы ФитцХью–Нагумо (Fitz-Hugh R., 1955) рассматривается система уравнений (Сидорова и др. 2017):

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} - \varepsilon^2 D_u \cdot u &= -\left(u(u - \alpha(x, y))\right)(u - 1) - uv, \\ \frac{\partial v}{\partial t} - \varepsilon D_v \cdot v &= -\gamma v - \beta u,\end{aligned}\tag{1}$$

где u – функция интенсивности антропогенных процессов (активатор), v – функция интенсивности природных процессов (ингибитор), α – параметр активации системы ($0 < \alpha \leq 1$), γ – кинетический параметр затухания потенциала ингибитора, $\gamma > 0$, β – кинетический параметр взаимодействия активатора и ингибитора, $\beta > 0$, D_u, D_v – коэффициенты диффузии активатора и ингибитора, $0.1 < \varepsilon D_u < 1$, $0.01 < \varepsilon D_v < 0.1$, ε – параметр, отражающий значительное различие скоростей изменения функций активатора и ингибитора ($0 < \varepsilon < 1$). Решения уравнения относительно u и v

неотрицательны. Система решается численно в пространственной области D с границей ∂D . На границе задаются краевые условия Неймана. Распределение в начальный момент времени считается известным. Реализация численного счета производится при помощи метода прямых и факторизации по пространственным переменным с использованием схемы Розенброка. Распределенные компьютерные вычисления проведены с использованием графических процессоров с помощью компилятора OpenCL.

Возбудимая/невозбудимая среда описывается вырожденной системы уравнений $u(u(x, y) - \alpha)(u(x, y) - 1) + uv = 0, \gamma v - \beta u = 0$ при $\varepsilon=0, 0 < \alpha < 1$. Достаточным условием для формирования автоволнового фронта активатора является соотношение параметров, соответствующее области возбудимой среды. Если значения параметров α ,

β и γ удовлетворяют неравенству $\alpha \geq \left(1 + \frac{\beta}{\gamma}\right) - 2\sqrt{\frac{\beta}{\gamma}}$ (область моностабильности, рис.

1), среда является невозбудимой, и начальное возмущение затухает. Возбудимая среда отвечает области бистабильности (рис. 1), и решения системы (1) имеют вид распространяющихся автоволновых фронтов – функций, которые претерпевают резкие

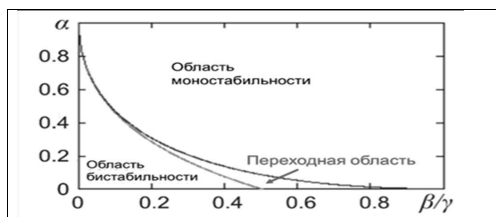


Рис. 1. Диаграмма состояния активной среды в зависимости от соотношения параметров α , β и γ

автоволны. Рассмотренные свойства позволяют качественно оценить пороговые и подпороговые условия распространения автоволнового процесса в зависимости от интенсивности источников воздействия, расположения зон возбудимости. В модель включены два фактора, определяющие пространственную неоднородность: распределение населения в зависимости от координат и наличие барьеров – городских геобиоценозов и городской инфраструктуры. Существование и положение переходного слоя в модели определяется функцией $\alpha(x, y)$, обратно пропорциональной плотности населения. Для двумерной модели с кусочно гладкой границей ∂D и однородными условиями Неймана для двух городов (на примере городов Подмоскovie) показано: если города расположены на достаточном удалении друг от друга, и значение плотности населения между городами меньше критического, это приводит к формированию достаточно устойчивой переходной зоны между двумя УЭС, поэтому общий автоволновой фронт не формируется. В противном случае возможно образование экосистемы с общим автоволновым фронтом. Именно таким образом происходит формирование мегаполисов. Численная реализация модели показала адекватность применения модели с барьерами для описания расширения границ Москвы (1956–1968 гг.) в западном направлении (рис. 2).

Сравнение полученных данных с данными аэрофотосъемки исследуемых районов в 1956 и 1968 годах показало, что ошибка моделирования составила 9.2% (1956 г.) и 4.7% (1968г.) (рис. 1.8). Абсолютная ошибка: 5 (1956 г.) и 4 (1968 г.).

На основе картографических и статистических данных, и планов развития Москвы, <https://investmoscow.ru/city-projects/aip/> модель была откалибрована и использована для прогнозирования развития Новой Москвы с 2017 г. до 2023 г. (Sidorova et. al., 2018):

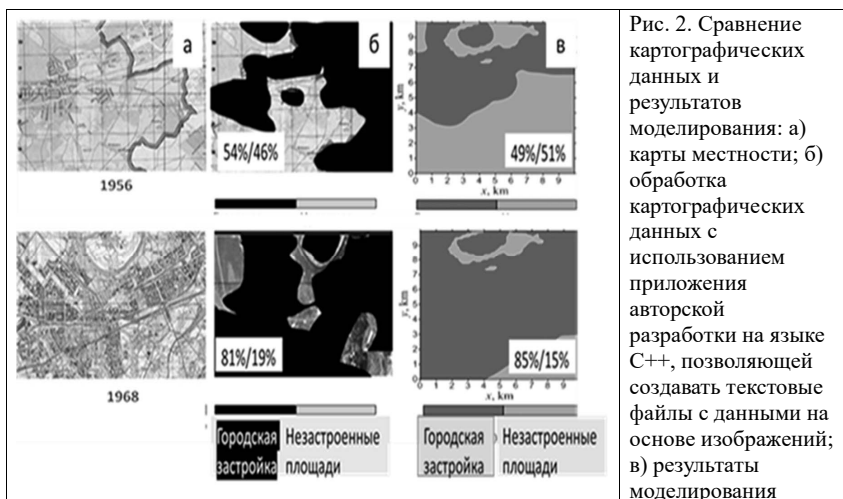


Рис. 2. Сравнение картографических данных и результатов моделирования: а) карты местности; б) обработка картографических данных с использованием приложения авторской разработки на языке C++, позволяющей создавать текстовые файлы с данными на основе изображений; в) результаты моделирования

$$\frac{\partial u}{\partial t} - D_u \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) = -\frac{1}{K^2 T} u (u - N_B K \alpha(x, y, t)) (u - N_B) - \frac{1}{KT} uv,$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} - D_v \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) = -\frac{1}{T} (-v + \beta \gamma u). \quad (2)$$

$u = [\text{км}^2]$ – застроенная площадь, активатор. $v = [\text{км}^2]$ – площадь уничтоженных зеленых насаждений на квадратный километр, ингибитор. Согласно нормативам, площадь биоценозов на территории Новой Москвы должна составить не менее 25% от площади застройки. $\beta = 100/N_B$ – нормировочный коэффициент согласования локальной площади застройки с общей площадью застраиваемого района. $N_B = 80$ – максимальное количество зданий на квадратный километр. $T^* = 1(\text{год})$ – характерный масштаб времени; $K = 10^{-2}[\text{км}^2]$ – характерная площадь одноподъездного дома с придомовой территорией. Функция $\alpha(x, y, t) = \exp(-0.05K\rho(x, y, t))$ характеризует наличие и тип застройки в зависимости от плотности населения (ρ). ρ – планируемая плотность населения на этих территориях: для жилого фонда плотной застройки и промышленной зоны $\rho = 4000 \frac{\text{чел}}{\text{км}^2}$, $K_\rho = 40$; для коттеджной застройки $\rho = 2000 \frac{\text{чел}}{\text{км}^2}$, $K_\rho = 20$; для территорий парков $\rho = 0.1$, $K_\rho = 0.001$, для естественных геобикоценозов равна $\rho = 0$, $K_\rho = 0$. $D_u = [\text{км}^2/\text{год}]$ – скорость роста площади застройки. $D_v = [\text{км}^2/\text{год}]$ – скорость уменьшения площадей геобикоценозов. В 2017 г. (начальные условия модели) площадь геобикоценозов составила 55.7% от площади Новой Москвы. Учитывая скорости застройки территории округа Новой Москвы и уничтожения геобикоценозов в ходе застройки, принимаем $D_v/D_u = 1/10$ ($D_u = 5\text{км}^2/\text{год}$; $D_v = 0.5\text{км}^2/\text{год}$). γ – доля уничтоженной зелени (от площади застройки), $0 \leq \gamma < 0.8$. Для получения численного значения кинетического параметра γ проведен анализ характерных для Москвы площадей парковых территорий, промышленных зон, коттеджной застройки и плотной жилой застройки: $\gamma = 0$ – естественные биоценозы; $\gamma = 0.1$ – парки; $\gamma = 0.5$ – коттеджная

застройка; $\gamma = 0.75$ - плотная жилая застройка; $\gamma = 0.85$ – промышленная зона. На рисунке 3 представлено сравнение карт застройки Новой Москвы с результатами моделирования (2017 – 2023 гг.).

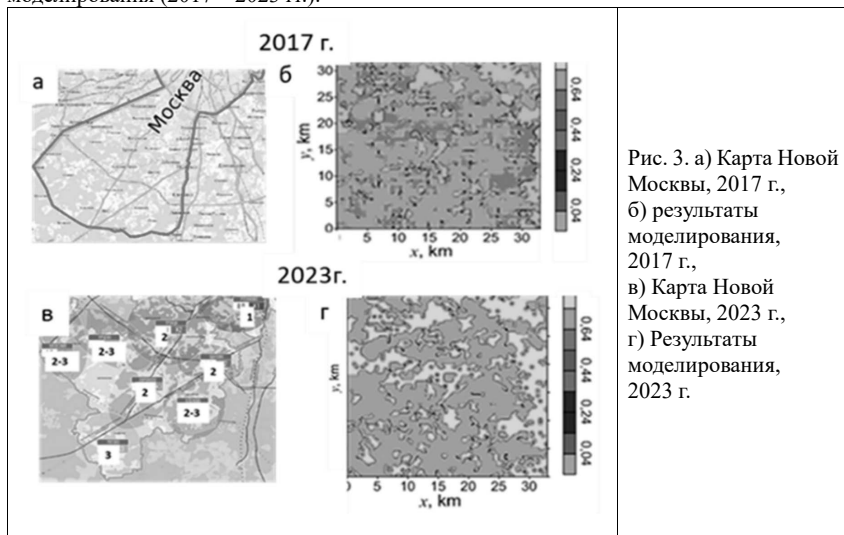


Рис. 3. а) Карта Новой Москвы, 2017 г., б) результаты моделирования, 2017 г., в) Карта Новой Москвы, 2023 г., г) Результаты моделирования, 2023 г.

Анализ модели развития Новой Москвы:

Официальные данные. 2017 г. (рис. 3 а): площадь застройки - 44.3%, лесов - 50%, пустырей - 5.7%. В 2023 г. (рис. 3 в) - площадь застройки - 52.3%, площадь лесов и парков - 47.7%. Расчеты площади проведены с использованием Google Earth Pro.rar.

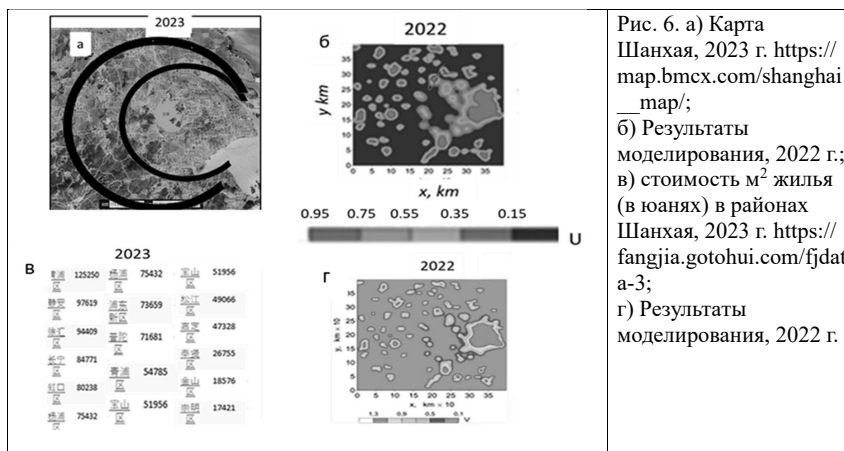
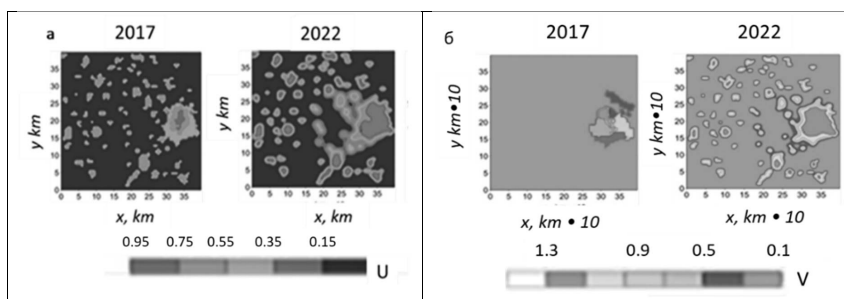
Результаты моделирования. 2017 г. (рис. 3 б): площадь застройки – 42%, в 2023 г. (рис. 3 г) - 53%. Ошибка моделирования: 5.2% (2017 г.), 1.3% (2023 г.). Абсолютная ошибка: 2.3 (2017 г.), 0.7 (2023 г.).

Автоволновая модели развития Шанхая создана с учетом основных механизмов: социально-экономической целесообразности застройки, динамики цен на жилье, доли площади земель под сельское хозяйство (обусловлены нормативами КНР) и географических особенностей прилегающих территорий (Levashova et. al, 2019):

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} - D_u \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) &= -\frac{1}{T} u (u - \alpha(x, y, t)) (u - 1) - \frac{1}{T} v, \\ \frac{\partial v}{\partial t} - D_v \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) &= -\frac{1}{T} (-v + \gamma(x, y, t) u). \end{aligned} \quad (3)$$

u – активатор системы - доля застроенной площади на квадратный километр, безразмерная величина; v – ингибитор - цена м^2 жилой площади (доля от максимально возможной), безразмерная величина; T - характерный масштаб времени (1 год); γ – безразмерный параметр, отражающий зависимость стоимости м^2 жилья от района застройки; D_u – скорость изменения площади застройки, км^2 в год; D_v – скорость изменения цены на жилье в зависимости от района, км^2 в год. В 2017, по сравнению с 2016, цены на жилье поднялись на 22%, поэтому принимаем $D_v = 0.22 D_u$. α - параметр активации системы в модели: при $\alpha = 0.3$ (восточное западное направление) – зона

бистабильности (определяется нормативными актами сохранения сельскохозяйственных земель не менее 30%); в невозбудимой зоне моря, озера Тайху и реки Янцзы $\alpha = 1$. Начальные условия модели - на рисунке 4, компьютерная реализация модели – на рисунке 5, анализ модели– на рисунке 6. Обработка распределенных компьютерных вычислений с помощью графических процессоров AMD и компилятора OpenCL.



По плотности и географическому направлению застройки Шанхая отмечено значительное совпадение (рис. 6 а, б). Картографические данные, 2023 г.: внутренняя окружность - среднее значение доли застроенной площади на км² - 0.85, пояс между окружностями – среднее значение доли застроенной площади на км² - 0.54. Результаты моделирования, 2022 г.: центральная часть – среднее значение доли застроенной площади на км² - 0.80, более низкая плотность – среднее значение доли застроенной площади на км² - 0. Ошибка моделирования при сравнении реальной площади застройки (2023 г.) и результатов модели (2022 г.) – 13.3%. Абсолютная ошибка: 0.09.

Реальные цены за 1м² жилья увеличились в 1.5 раза (с 2017 г. по 2023 г.), согласно модели – в 1.3 раза (с 2017 по 2022 г.) (рис. 6 в, г). Ошибка моделирования при сравнении цен в 2023 г. (реальные) и в 2022 г. (модель) - 13%. Абсолютная ошибка: 0.19.

Вывод. Все полученные результаты подтверждают адекватность использования автоволновой модели для описания развития урбозкосистем.

Литература

1. Fitz-Hugh R. // Bull. Math. Biophysics. 1955, 17, 257–278 doi:10.1007/BF02477753.
2. Сидорова А.Э., Левашова Н.Т., Мельникова А.А., Семина А.Е. // Математическая биология и биоинформатика. 2017, 12(1),186-198 doi:10.17537/2018.13.454.
3. Sidorova A.E., Levashova N.T., Semina A.E., Melnikova A.A. // 2018, 13(2), 454-465 doi:10.17537/icmbb18.94
4. Levashova N., Sidorova A., Semina A., Mingkang Ni.A. // Sustainability, 2019, V. 11, N. 13, P. 3669 doi:10.3390/su11133658

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕЗО- И НАНОСИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ КАТАСТРОФ

Д. М. Силантьев

МГТУ «СТАНКИН», Москва, Россия

e-mail: silad.micher@mail.ru

Применение математической теории катастроф в моделировании систем и процессов наномасштаба имеет хорошие перспективы, так как позволяет наглядно описать качественные изменения физической структуры с акцентом на ограниченном количестве управляющих параметров.

По теме исследования представлено не очень много литературы как отечественной, так и зарубежной. Потому дополнительно были проанализированы источники, где представлено моделирование физических процессов с применением математической теории катастроф [1-10].

Одним из ключевых моментов в построении модели является составление системы уравнений, которая имеет сходство с одной из типичных катастроф. Другой ключевой момент – поиск управляющих параметров, которыми описывается искомая катастрофная модель.

В качестве прикладной задачи рассматривается построение модели сопротивление материала энергетическим нагрузкам от источника, такого как лазер. Так, к примеру, если рассматриваемая мезо- или наносистема позволяет говорить о тепловом источнике, то он (источник) рассчитывается по мощности лазера:

$$q = \frac{m'_1 m''_1 \omega \int |\vec{E}|^2 dS J_0}{V |\vec{E}_0|^2}$$

где m'_1 – показатель преломления материала, m''_1 – показатель поглощения материала, S – площадь, на которую падает излучение, V – объём материала, $\vec{E}_0$ – электрический вектор падающей волны, $\vec{E}$ – электрический вектор внутри материала, ω – круговая частота лазера.

В процессе моделирования должен быть получен фазовый портрет, иллюстрирующий качественные переходы состояния системы с кривыми и точками особенностей, а также влияние управляющих параметров на эти переходы.

Литература

1. А.К. Гуц Тектонические землетрясения и теория катастроф // МСМ. 2023. №4 (68). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tektonicheskie-zemletryaseniya-i-teoriya-katastrof>.
2. Моделирование влияния неоднородностей ионосферы Земли на распространение радиоволн коротковолнового диапазона / А.С. Крюковский, Д.С. Лукин, Е.В. Михалева [и др.] // Распространение радиоволн : Сборник докладов XXVIII Всероссийской открытой научной конференции, Йошкар-Ола, 16–19 мая 2023 года / Редколлегия: Д.С. Лукин, Д.В. Иванов, Н.В. Рябова [и др.]. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2023. – С. 35–42. – EDN DWTVPM.
3. Gromov, Vasilii. (2020). Catastrophes of Cylindrical Shell. 10.13140/RG.2.2.10958.28481.
4. Павлов Сергей Васильевич Феноменологические модели сегнетоэластиков с полносимметричным параметром порядка: классификация методами эквивариантной теории катастроф // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика.

- Астрономия. 2023. №5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/fenomenologicheskie-modeli-segnetoelastikov-s-polnosimmetrichnym-parametrom-poryadka-klassifikatsiya-metodami-ekvivariantnoy-teorii>.
5. Павлов Сергей Васильевич Феноменологические модели фазовых переходов с многокомпонентными взаимодействующими параметрами порядка: построение и классификация методами теории особенностей // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2024. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/fenomenologicheskie-modeli-fazovyh-perehodov-s-mnogokomponentnymi-vzaimodeystvuyuschimi-parametrami-poryadka-postroenie-i>.
 6. Шавлуков, А. М. Катастрофы решений уравнений одномерной газовой динамики и наследование ростков катастроф решений волнового уравнения / А. М. Шавлуков // Уфимская осенняя математическая школа : Материалы Международной научной конференции, Уфа, 28 сентября – 01 2022 года / Отв. редактор З.Ю. Фазуллин. Том 2. – Уфа: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Уфимский университет науки и технологий", 2022. – С. 97–98. – DOI 10.33184/uomsh2t-2022-09-28.35. – EDN SDBMLY.
 7. Крюковский, А.С. Математическое моделирование специальных функций каспидных краевых волновых катастроф / А.С. Крюковский, М.С. Домнина, Д.В. Растягаев // Распространение радиоволн : Сборник докладов XXVIII Всероссийской открытой научной конференции, Йошкар-Ола, 16–19 мая 2023 года / Редколлегия: Д.С. Лукин, Д.В. Иванов, Н.В. Рябова [и др.]. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2023. – С. 540–543. – EDN GOACFC.
 8. Применение мониторинга для оценки повреждаемости стальных конструкции / В.Н. Гадалов, С.Н. Кутепов, О.М. Губанов, А.А. Калинин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 9. – С. 447–450. – DOI 10.24412/2071-6168-2023-9-442-443. – EDN USWHHK.
 9. Jain, Samyak & Bhagwat, Ameeya. (2023). Catastrophe theoretic approach to the Higgs Mechanism. 10.48550/arXiv.2307.12042.
 10. Liang, Jing-Yu & Dan, Long & Wang, Min & Hu, Yun-Qi & Du, Chun-Guang & Yang, Lan & Long, Gui-Lu. (2024). Observation of limit torus and catastrophe point in optomechanical systems. New Journal of Physics. 26. 10.1088/1367-2630/ad7e49.

К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ ВЫБРАННОГО МАТЕРИАЛА НА ФРАКТАЛЬНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ ПРИ МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ МЕТОДАМИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Е. Н. Сосенушкин, Е. А. Яновская, А.С. Желнов

МГТУ “СТАНКИН”, Москва, Россия

127055, Вадковский переулок, 3а

Tel.: +7 (977)135-81-84, e-mail: a.zhelnov@stankin.ru

Аннотация

Одним из ключевых элементов при моделировании поверхностей является выбираемый материал. В зависимости от параметров материала при моделировании фрактальных поверхностей возникают различные значения фрактальных размерностей, которые в дальнейшем влияют на построение рельефа поверхностей и играют важную роль при контактном взаимодействии поверхностей друг с другом. В работе рассматриваются фрактальные поверхности, построенные методами искусственного интеллекта, с помощью генеративного нейросетевого алгоритма. Оценка точности построения моделей ранее проводилась по методу Монте-Карло. Математическое описание рельефов моделируемых поверхностей позволяет внести параметры различных материалов и исследовать их влияние на получаемые модели.

В результате проведенной работы были получены компьютерные модели рельефов фрактальных поверхностей из 4 различных материалов. Получена оценка влияния выбираемого материала на качество и точность построения моделей, а также проведен топографический анализ получаемых рельефов поверхностей.

ON THE INFLUENCE OF SELECTED MATERIAL ON FRACTAL SURFACE IN MATHEMATICAL MODELING BY ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS

E. N. Sosenushkin, E. A. Yanovskaya, A.S. Zhelnov

MSTU “STANKIN”, Moscow, Russia

127055, Vadkovskii lane, 3a

Tel.: +7 (977)135-81-84, e-mail: a.zhelnov@stankin.ru

Abstract

One of the key elements in surface modeling is the chosen material. Depending on the material parameters, different values of fractal dimensions arise in the modeling of fractal surfaces, which further affect the construction of surface relief and play an important role in the contact interaction of surfaces with each other. This paper deals with fractal surfaces constructed by artificial intelligence methods using a generative neural network algorithm. The estimation of the accuracy of model building was previously carried out by Monte Carlo method. Mathematical description of the reliefs of the modeled surfaces allows to introduce parameters of different materials and to study their influence on the obtained models.

As a result of this work computer models of reliefs of fractal surfaces made of 5 different materials were obtained. The estimation of the influence of the chosen material on the quality and accuracy of model building has been obtained, and the topographic analysis of the obtained reliefs of surfaces has been carried out.

1. Математическое моделирование параметров материала и фрактальных размерностей

В работе [1] ранее была рассмотрена возможность применения методов искусственного интеллекта для компьютерного моделирования фрактальных поверхностей. Моделирование фрактальных поверхностей с применением машинного обучения проводилось с использованием языка программирования Python. В результате была получена математическая модель поверхности в общем случае, сведенная к функции Вейерштрасса:

$$Z(x, y) = A \sum_{n=1}^{\max(n, m)} \sum_{m=1}^{\max(n, m)} \frac{\cos\{2\pi k^n x + \varphi_n\} \cos\{2\pi k^m y + \psi_m\}}{k^{n(2-D)} k^{m(2-D)}}, \quad (1)$$

В дальнейшем из закона Арчарда в работе [2, 3] было получено уравнение, связывающее фрактальную размерность с параметрами материала, основанное на теории неровности контакта и используемое для решения задач износа материала. В общем виде объемный износ по закону Арчарда можно найти по формуле:

$$Q(t) = \frac{k_Q W L}{H}, \quad (2)$$

где k_Q – безразмерный коэффициент износа, W – общая нормальная нагрузка, L – расстояние трения, H – твердость изнашиваемого тела (самой мягкой части поверхности).

Одной из важнейших задач на производстве является правильный подбор материала. Зачастую эта задача материаловедов решается, опираясь на известные параметры материалов и адаптируется под конкретные цели предприятия. Все материалы можно представить в виде набора определенных параметров. Если создать базу данных, содержащую эти параметры и моделировать подбор материала методами машинного обучения – это позволит значительно увеличить скорость обработки данных и работы с информацией в целом. Задача данной работы рассмотреть влияние выбранного материала на модели фрактальных поверхностей, полученных ранее и выявить закономерности, которые помогут при создании базы данных для подбора материалов.

2. Компьютерное моделирование фрактальных поверхностей для различных материалов

В качестве входных данных для нейросетевой модели задавались упругопластичные параметры материала, а также параметры прочности. Далее проводилось построение модели по ранее описанному в работе [1, 4] алгоритму. На рисунке 1 показан пошаговый процесс построения модели, описанный в работе [5].

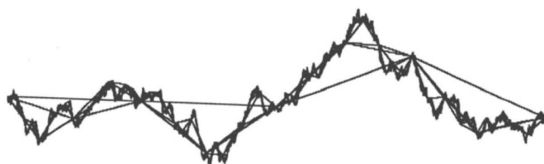


Рис. 1. Пошаговый процесс создания профиля фрактальной поверхности

Этот алгоритм оптимизирован с помощью методов искусственного интеллекта и генеративных нейросетевых алгоритмов. В зависимости от параметров материала получаются поверхности с разными фрактальными размерностями и структурами. Не смотря на визуальную схожесть, в зависимости от выбираемого материала, возникают особенности рельефов поверхностей, влияющие на моделирование контактного взаимодействия поверхностей друг с другом.

3. Оценка качества и точности получаемых моделей. Анализ полученных рельефов фрактальных поверхностей

Для оценки полученных результатов была рассмотрена трехмерная модель поверхностей при моделировании 4 различных материалов: сталь, никель, титан, вольфрам.

На рисунке 2 представлены рельефы полученных поверхностей.

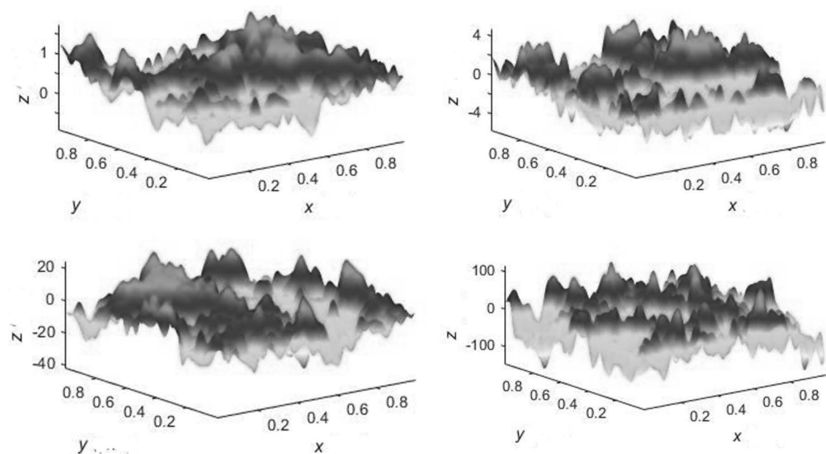


Рис. 2. Рельефы полученных поверхностей

При топографическом анализе можно сделать выводы, о том, как параметры задаваемых материалов влияют на деформации поверхностей при контакте. Также полученные модели рельефов можно использовать в дальнейшем для составления базы данных материалов и обучения нейросетевых алгоритмов подбору материалов в зависимости от требуемых задач.

Литература

1. Сосенушкин Е.Н., Яновская Е.А., Желнов А.С. Применение методов искусственного интеллекта для компьютерного моделирования фрактальных поверхностей // Известия Самарского научного центра РАН – 2024. – №1. – С. 109–115.
2. Сосенушкин Е.Н., Яновская Е.А., Желнов А.С. Компьютерное моделирование фрактальных поверхностей, построенных с использованием методов искусственного интеллекта, для прогнозирования износа // Известия Самарского научного центра РАН – 2024. – №4. – С. 143–149.
3. Желнов А.С. К вопросу об износе фрактальных поверхностей, построенных с использованием методов искусственного интеллекта // «Автоматизация и информационные технологии (АИТ-2024)». Сборник докладов. – М.: ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» – 2024. – С. 46–48.
4. Желнов А.С. Моделирование фрактальных поверхностей методами искусственного интеллекта // Математика в созвездии наук, Издательство Московского университета – 2024. – С. 397–400.
5. Russ, J.C. (1994). Modeling Fractal Profiles and Surfaces. In: Fractal Surfaces. Springer, Boston, MA.

ПОИСК ИНЦИДЕНТНЫХ РЕБЕР ДЛЯ СМЕЖНЫХ ВЕРШИН В РАЗРЕЖЕННОМ ГРАФЕ

Д.О. Стукалов¹, Н.А. Стукалова², М.А. Смирнова²

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, г. Санкт-Петербург, Россия

²Тверской государственной технический университет, Тверь, Россия

170000, Тверь, ул. М. Конева, 12

Тел. (+79105331964), e-mail: nast77@mail.ru

Для решения задачи поиска соседей в разреженном графе на расстоянии два от стартовой вершины можно использовать различные алгоритмы. Мы рассматриваем задачу поиска соседей с ограничениями по времени. Выходные данные содержат информацию не о самих соседях, а о ребрах от соседей первого уровня до соседей второго уровня. Задача в целом известная, но осложняется большим количеством данных (примерно 50 миллионов записей).

Изначально мы использовали postgresql для хранения данных и поиска необходимого графа. Из-за синхронного выполнения запроса решение работало достаточно медленно (несколько часов на запрос), поэтому начался поиск более быстрых альтернатив. Сейчас мы используем trino [1], который позволяет выполнять части запроса параллельно. Также данные теперь хранятся в таблицах в iceberg формате, который хорошо подходит для аналитических выборок на большом объеме данных. Такой подход показывает достаточно хорошие результаты для предъявляемых требований (порядка 15 минут на запрос), но хотелось бы ускорить поиск.

Идея заключается в том, чтобы использовать spark [2] вместе с graphx [3], что в теории должно привести к большей скорости выборки за счет параллельности не на уровне запросов, а на уровне обработки данных. Также не приходится менять формат хранения данных, так как spark умеет работать с iceberg.

Для реализации поднимем spark-кластер из мастер-ноды и двух воркеров. Наш код будет подключаться как клиент к кластеру и выполняться на нем. Алгоритм поиска соседей состоит из двух этапов.

1. Нахождение всех вершин, соединённых со стартовой входящими или исходящими из нее ребрами.
2. Нахождение всех ребер из найденных на первом этапе вершин, кроме тех, которые содержат на одном из своих концов стартовую.

Реализованный алгоритм с использованием spark представлен листингом 1.

```
long target = 22671495143L; // стартовая вершина
```

```
JavaRDD<Long> connectedToTarget = graph.edges().toJavaRDD().filter( // первый этап
```

```
    edge -> edge.srcId() == target || edge.dstId() == target
```

```
).map((
```

```
    edge -> edge.srcId() == target ? edge.dstId() : edge.srcId()
```

```

).filter(
    Objects::nonNull
);
Broadcast<List<Long>> broadcast = sparkContext.broadcast(connectedToTarget.collect());
// рассылка
JavaRDD<Edge<String>> res = graph.edges().toJavaRDD() // второй этап
    .filter(
        edge -> broadcast.getValue().contains(edge.srcId()) ||
        broadcast.getValue().contains(edge.dstId())
    )
    .filter(
        edge -> edge.srcId() != target && edge.dstId() != target
    );

```

Листинг 1. Реализация алгоритма поиска соседей на расстоянии 2 в графе с использованием Spark

Стоит отметить, что после первого шага, происходит рассылка полученных данных на всех воркерах для того, чтобы на втором этапе к ним был обеспечен доступ.

Получившийся алгоритм тестировался на двух объемах данных: 1 и 5 миллионов записей. Сравнение времени работы (в мин.) разных подходов представлены на рисунке 1.

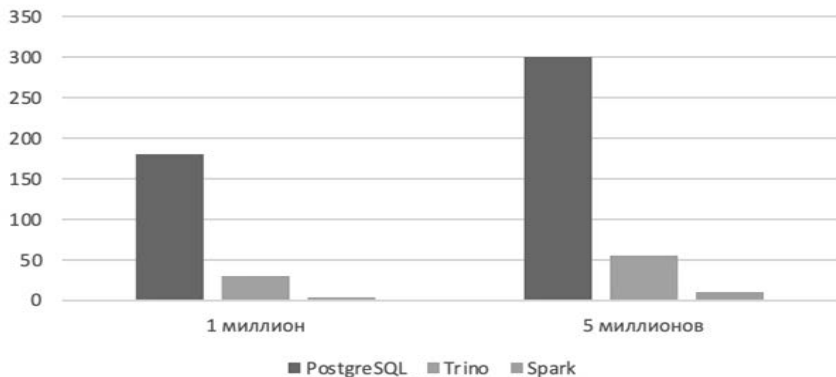


Рис.1. Сравнение времени выполнения запросов

Приведённый алгоритм с использованием spark показывает значительное уменьшение времени запроса на тестовых данных. В дальнейшем планируется введение данного подхода в эксплуатацию и проверка на реальных данных.

Литература

1. Почему Trino такой быстрый: архитектура оптимизатора SQL-запросов. – URL: <https://habr.com/ru/amp/publications/744934/>: (дата обращения: 10.11.2024).
2. Знакомство с Apache Spark. – URL: <https://habr.com/ru/companies/piter/articles/276675/>: (дата обращения: 12.11.2024).
3. Вичугова, А. Графовая аналитика больших данных с Apache Spark: GraphX и GraphFrames. – URL: <https://bigdataschool.ru/blog/what-is-spark-graphx-and-how-to-use-it.html> (дата обращения: 16.11.2024).

ГЕНЕРАЦИЯ КОНФИГУРАЦИЙ ДЛЯ TAINT АНАЛИЗА С ПОМОЩЬЮ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ

Д.О. Стукалов¹, Н.А. Стукалова², Г.В. Кошкина², Л.В. Семилетова², А.А. Гусаров²

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, г. Санкт-Петербург, Россия

²Тверской государственный технический университет, Тверь, Россия

170000, Тверь, ул. М. Конева, 12

Тел. (+79105331964), e-mail: nast77@mail.ru

Taint-анализ – вид анализа кода, который отслеживает поток ненадёжных данных, проходящих через код приложения от ненадёжного источника до уязвимого приёмника. Попадание непроверенных данных в критическую секцию, может привести к уязвимостям, что может быть использовано для нарушения корректной работы системы, получения конфиденциальных данных или выполнения других несанкционированных операций.

Для taint-анализа требуется конфигурация, в которой пользователь назначает одну из следующих ролей каждому методу в программе. Taint source – источник непроверенных данных. Taint pass – функция, которая помечает возвращаемое значение с учетом меток в ее аргументах. Taint cleaner – функция, удаляющая заданный набор меток из переданных аргументов. Taint sink – критический раздел приложения. Алгоритм taint анализа сканирует граф потока данных, пытаясь обнаружить маршрут между методом из набора taint source и методом из taint sink.

С целью ускорения работы пользователя для написания файлов конфигурации используется большая языковая модель. Для этого применяются подходы chain-of-thought [2] и few shot [1] промптинг. Первый из подходов заключается в генерирование промежуточных шагов рассуждений, что позволяет значительно улучшить способности большой языковой модели выполнять сложные рассуждения. Второй подход заключается в предоставлении нескольких примеров входных и ожидаемых выходных данных, что позволяет большой языковой модели лучше находить паттерны.

В результате выполнения данного проекта был успешно разработан клиент, который позволяет сериализовать Java классы в JSON формат для формирования запроса к большой языковой модели. Данный клиент обрабатывает полученные от большой языковой модели ответы, преобразовывая их в taint конфиги, что позволяет упростить разработку, так как избавляет от необходимости в ручном написании файлов конфигурации.

Литература

1. Tom B. Brown, Benjamin Mann, Nick Ryder, Melanie Subbiah, Jared Kaplan, Prafulla Dhariwal, Arvind Neelakantan, Pranav Shyam, Girish Sastry, Amanda Askell, Sandhini Agarwal, Ariel Herbert-Voss, Gretchen Krueger, Tom Henighan, Rewon Child, Aditya Ramesh, Daniel M. Ziegler, Jeffrey Wu, Clemens Winter, Christopher Hesse, Mark Chen, Eric Sigler, Mateusz Litwin, Scott Gray, Benjamin Chess, Jack Clark, Christopher Berner, Sam McCandlish, Alec Radford, Ilya Sutskever, Dario Amodei. Language Models are Few-Shot Learners [Электронный ресурс] // arXiv.org. 2020.
2. Jason Wei, Xuezhi Wang, Dale Schuurmans, Maarten Bosma, Brian Ichter, Fei Xia, Ed Chi, Quoc Le, Denny Zhou. Chain-of-Thought Prompting Elicits Reasoning in Large Language Models [Электронный ресурс] // arXiv.org. 2022.

**ЭПОХА М.В. КЕЛДЫША: ОТ "МАТЕМАТИКА – ЦАРИЦА ВСЕХ НАУК"
ДО "МАТЕМАТИКА – ПРОИЗВОДИТЕЛЬНАЯ СИЛА" И ЦИФРОВОЙ
ЦИВИЛИЗАЦИИ. 300-ЛЕТИЮ АКАДЕМИИ НАУК ПОСВЯЩАЕТСЯ**

Т.А. Сушкевич

ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

e-mail: tamaras@keldysh.ru

Ключевые слова: Эпоха Келдыша, математика, производительная сила, цифровая цивилизация, космическая цивилизация, атом, космос, ЭВМ, авиация, ракетная техника, прикладная математика, приоритеты

Цель работы – историческое просвещение в соответствии с актуальностью и приоритетами в научно-технологической сфере и образовании на современном этапе и в ближайшем будущем для обеспечения суверенитета и безопасности России. 24 февраля 2023 года "Институт Келдыша" внесен в список санкций США: о новых результатах говорить и писать возможности ограничены, а в современных условиях важно вспоминать "ИСТОРИЮ ЗНАНИЙ" и тех, кто эти "ЗНАНИЯ" создавал для фундамента отечественных достижений в науке, технологиях и технике. Выдающийся ученый и блестящий популяризатор науки академик Императорской (с 03.03.1912) и Российской Академии наук, Академии наук СССР, Президент Академии наук Украины (1918–1919), активный организатор в 1925 году и вице-президент Академии наук СССР естествоиспытатель (геолог, минералог, кристаллограф, геохимик, историк науки) и философ Владимир Иванович Вернадский (12.03.1863, Петербург; - 06.01.1945, Москва) в докладе на тему "Мысли о современном значении истории знаний", прочитанном на первом заседании Комиссии по истории знаний (КИЗ) АН СССР 14.11.26, высказал много умных и полезных мыслей, актуальных и ныне. Важно помнить о преемственности в науке: "История науки является в такие моменты орудием достижения нового", говоря о переломных моментах или острых проблемах в истории государств, тем более в условиях тектонический перемен в мире.

Под покровом ночи 3 ноября 2023 года в городе Рига – столице Латвийской Республики местные власти снесли памятник Трижды Героя Социалистического Труда русского Мстислава Всеволодовича Келдыша (рожден 10.02.1911, Рига Рижского уезда, Лифляндская губерния Прибалтийского края, Российская империя, - скончался 24.06.1978, Москва). Причины: трансатлантический тренд русофобии и отмены всего русского и чтобы не напоминать о том, что в 1911 году нынешняя Латвия была в составе Российской империи. С 1915 года Латвия претерпела многочисленные изменения. 21 июля 1940 года Народный Сейм провозглашает Латвию советской республикой (Латвийская Советская Социалистическая Республика), а 5 августа 1940 года Верховный Совет СССР принимает Латвию в состав СССР. 21 августа 1991 года Верховный Совет Латвии подтвердил независимость республики, приняв Конституционный закон "О государственном статусе Латвийской Республики". 6 сентября 1991 года независимость Латвии была признана Государственным Советом СССР. 17 сентября 1991 года Латвийская Республика стала членом ООН. 10 февраля 1995 года Латвийская Республика становится членом Совета Европы, член Европейского союза и НАТО с 2004 года.

Тем важнее и значимее в годовщину 300-летия Академии наук в 2024 году доклад посвятить Мстиславу Всеволодовичу Келдышу – математику академику (с 30.11.1946) в 35 лет, как Л. Эйлер и А.Н. Колмогоров, и самому молодому Президенту Академии наук СССР в 50 лет (19.05.1961-19.05.1975), единственному математику Трижды Герою Социалистического Труда (Указы от 11.09.1956,

17.06.1961, 09.02.1971). М.В. Келдыш – уникальная личность в истории мировой цивилизации и государства российского, которого ещё при жизни называли "Ломоносов XX-го века", Главный математик страны – "властелин цифры", Главный Теоретик космонавтики, который вместе с Главным Конструктором космонавтики Сергеем Павловичем Королевым (12.01.1907-14.01.1966) 4 октября 1957 года открыли "космическую эру человечества", покорили и освоили космос и основали фундамент для "космической цивилизации". М.В. Келдыш вместе с Андреем Николаевичем Тихоновым (30.10.1906-07.10.1993), математиком Дважды Героем Социалистического Труда (Указы от 04.01.1954, 29.10.1986), в 1953 году создали первый в мире академический Институт прикладной математики АН СССР (ОПМ МИАН СССР, п/я 2287, "Институт Келдыша") и заложили фундаментальные основы "цифровой цивилизации". В этом тандеме важно отметить, что оба закончили Московский университет как "чистые" математики и специалисты по "математике – царице всех наук", однако оба внесли фундаментальный вклад в развитие "прикладной математики" и фактически создали новое направление в науке с брендом "математика – производительная сила". Под руководством А.Н. Тихонова проведены расчеты для первой "атомной бомбы" (1949 год), для первой "термоядерной бомбы" (1953 год) и полета 15 ноября 1988 года в космос первого "Бурана" – советский орбитальный корабль-ракетоплан многоразовой транспортной космической системы (МТКС), созданный в рамках программы "Энергия - Буран". Под руководством М.В. Келдыша осуществлены расчеты для запусков в 1957-1958 гг. первых в истории человечества искусственных спутников Земли (ИСЗ) и т.д., первых на планете полетов по космическим орбитам космонавтов – Ю.А.Гагарин в 1961 году и др., космических кораблей к Луне, Венере, Марсу, Долгосрочных орбитальных станций и т.д.

М.В. Келдыш и А.Н. Тихонов как исключение государственной важности имели право на работу по-совместительству! Оба уделяли много внимания образованию и подготовке научных и инженерных кадров с высоким уровнем подготовки по математике для новых сложнейших высокотехнологических областей знаний, необходимых для выполнения "Атомного" и "Космического" проектов и создания "Ракетно-ядерного щита".

А.Н. Тихонов непрерывно с 1929 года работал в МГУ после окончания математического отделения физико-математического факультета в 1927 году и до последних дней жизни; в 1927-1930 гг. – аспирант НИИ Математики и Механики при МГУ. В 1934-1970 гг. А.Н.Тихонов возглавлял кафедру "математики" на физическом факультете МГУ и вместе с А.А.Самарским подготовили и в 1951 году впервые издали университетский учебник для физических и инженерных специальностей "Уравнения математической физики". Важно напомнить: А.Н.Тихонов специалист в области вычислительной математики и математической физики; член-корреспондент с 29.01.1939 по специальности "геофизика, математическая физика", Отделение математических и естественных наук АН СССР; академик с 01.07.1966 по специальности "математика", Отделение математики АН СССР. В 1970 г. А.Н. Тихонов создал факультет вычислительной математики и кибернетики (ВМиК) – декан (1970–1990), заведующий кафедрой вычислительной математики (1970–1982), заведующий кафедрой математической физики (1982–1993). Заведующий кафедрой вычислительной математики механико-математического факультета (1960–1970).

М.В. Келдыш работал в МГУ после окончания математического отделения физико-механического факультета МГУ в 1932-1953 гг. с перерывами на военные годы, сначала доцент физико-математического факультета МГУ, затем профессор механико-математического и заведующий кафедрой физико-технического факультетов МГУ. С

1951 года и до конца жизни М.В. Келдыш заведовал кафедрой и работал в МФТИ. Избран член-корреспондентом 29.09.1943 по специальности "математика" Отделение физико-математических наук; по рекомендации директора Математического института имени В.А.Стеклова академика И.М.Виноградова 30.11.1946 М.В. Келдыш избран академиком по специальности "математика, механика" Отделение технических наук – М.В.Келдыш признан ЛИДЕРОМ по "прикладной математике"; вице-президент 26.02.1960-19.05.1961; Президент 19.05.1961-19.05.1975.

Впервые в истории государства российского и мира 35-летнего математика М.В. Келдыша 2 декабря 1946 года назначили начальником технического Реактивного научно-исследовательского института (РНИИ), который занимался проблемами ракетостроения, и фактически заложили основы современных технологий "ракетных войн". РНИИ – это первая в стране и мире государственная ракетная организация – организован на основании Постановления Совета труда и обороны СССР от 31 октября 1933 года № 104. РНИИ создан на базе Ленинградской Газодинамической лаборатории (ГДЛ) и Московской группы изучения реактивного движения (ГИРД). Возглавил институт начальник ГДЛ военный инженер 1-го ранга Иван Терентьевич Клейменов, а его заместителем был назначен начальник ГИРД Сергей Павлович Королев. Главная задача довоенного, военного и послевоенного периодов истории института – создание ракетного вооружения нашей армии. Коллектив института сыграл основополагающую роль в создании фундамента и подготовке специалистов современной ракетной техники. Э.К.Циолковский был почетным членом Технического совета РНИИ. В 1946-1961 гг. М.В.Келдыш – начальник, а с 1950 года научный руководитель РНИИ (НИИ-1 МАП). Это был первый шаг на пути к "Космическому проекту" и созданию "Ракетно-ядерного щита", научным руководителем которого М.В.Келдыш являлся до конца жизни. Ныне РНИИ – это Государственный научный центр Российской Федерации "Исследовательский центр имени М.В. Келдыша" Роскосмоса (АО ГНЦ "Центр Келдыша").

М.В. Келдыш – единственный ученый, именем которого названа "Эпоха Келдыша". Математика – древнейшая наука. Итогом научной, организационной и государственной деятельности М.В.Келдыша со студенческих лет на математическом отделении физико-математического факультета МГУ, который закончил в 1931 году как "чистый математик", и далее на всех этапах восхождения к вершинам науки, техники, цивилизации фактически является не только расширение сферы приложений "прикладной математики", но и создание нового междисциплинарного статуса "математика – производительная сила". М.В. Келдыш как никто другой в истории научно-технического прогресса реализовал "формулы" и "цифры" не только в свершении человеческой мечты о покорении и освоении атома, космоса, компьютеров, но и в обеспечении безопасности авиации и эффективности реактивного ракетостроения.

В 2024 году на государственном уровне приняты ключевые директивные документы:

- Указ Президента Российской Федерации от 15.03.2021 № 143 "О мерах по повышению эффективности государственной научно-технической политики";
- Указ Президента Российской Федерации от 25.04.2022 № 231 "Об объявлении в Российской Федерации Десятилетия науки и технологий (2022-2031)";
- Распоряжение Правительства от 20.05.2023 № 1315-р "Концепция технологического развития до 2030 года";
- Указ Президента Российской Федерации от 26.10.2023 № 812 "Об утверждении Климатической доктрины Российской Федерации";

- Указ Президента Российской Федерации от 10.10.2019 г. № 490 **"О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации"** (в редакции Указа Президента Российской Федерации от 15.02.2024 № 124);
- Путин В.В. **Послание Президента** Федеральному Собранию 29.02.2024. (накануне выборов Президента 15-17 марта 2024 года).
Особое внимание заслуживают три "майских указа", которые впервые за последние 33 года определили направления и приоритеты в интеллектуальной и духовной сфере:
- Распоряжение Правительства Российской Федерации от 03.05.2024 №1086-р **«Об установлении Дня математика»** 1 декабря – день рождения великого русского математика Николая Ивановича Лобачевского (01.12.1792-24.02.1856);
- Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2024 № 309 **«О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года»**;
- Указ Президента Российской Федерации от 08.05.2024 № 314 **«Об утверждении Основ государственной политики Российской Федерации в области исторического просвещения»**.

В 2023 году в условиях тектонических геополитических сдвигов глобального порядка в мире и в России и новых геополитических вызовов вплоть до угроз третьей мировой "ядерной" войны вышел Указ Президента Российской Федерации от 31.03.2023 № 229 "Об утверждении Концепции внешней политики Российской Федерации". Этот Указ фактически является актуализацией приоритетных направлений, целей и задач внешнеполитической деятельности в новых условиях обеспечения суверенитета и безопасности страны и вызовом для отечественной науки и развития постиндустриального технологического уклада – "Космической цивилизации" и "Цифровой цивилизации".

Никто из философов, в том числе академики математики-философы В.И. Вернадский (12.03.1863-06.01.1945) – основоположник учения о ноосфере и "научная мысль как планетное явление", и Н.Н.Моисеев (23.08.1917-29.02.2000) "Человек и ноосфера", "Судьба цивилизации. Путь Разума", не смог предсказать, что теоретические достижения в физике и математике, а также открытие космической эры человечества в середине 20-го века станут фундаментом формирования и развития "Цифровой реальности" в начале 21-го века на всей планете: "Цифровая экономика", "Киберпространство", "Кибервойны", "Цифровая Вселенная", "Цифровая Земля", "Цифровая физика", "Цифровая философия", "Теория информации", "Квантовая теория информации", "Синергетическая теория информации", "Цифровая передача информации", "Цифровые изображения", "Цифровая анимация", "Цифровое фотографирование", "Цифровое кино", "Электронный учебник", "Электронный ресурс", Big Data, "Основы кодирования", "Теория алгоритмов", "Криптография", "Госуслуги", "Автоматизация производства", "Логистика" в разных сферах приложений и многое другое, включая "Цифровые технологии" на выборах разного уровня. А начинали в 70-ые годы с продажи авиабилетов. Не случайно первым компьютеризированным НИИ был режимный авиационный, когда руководителем авиапрома и министром авиации был И.С.Силаев (21.10.1930-08.02.2023).

Это вызовы для "математики – царицы всех наук, но служанки физики" в 21-м веке, а фраза М.В.Ломоносова (08.11.1711- 04.04.1765) из середины 18 века. Однако с тех пор математика последовательно расширяла сферу приложений и в последние годы математика покорила все науки и население всей планеты. Немецкий математик Карл Гаусс (30.04.1777- 23.02.1855), член-корреспондент с 31.01.1802, почетный член 24.03.1824 Императорской Академии наук, часто говорил фразу: "математика – царица

наук, арифметика – царица математики", подчеркивая важность понятия "число" в математике. В возрасте 62 лет Гаусс выучил русский язык – очень хотел читать труды русского математика Николая Ивановича Лобачевского (01.12.1792-24.02.1956) в оригинале, который не был членом Академии наук, но прославился своей "геометрией" и как ректор Казанского университета – на посту был 18 лет (1827-1845) и занимает третье место после академиков математиков В.А.Садовниченко (р. 03.04.1939) с рекордом среди всех ректоров вузов более 32 лет с 1992 по 2024 гг. и И.Г.Петровского (18.01.1901-15.01.1973) – ректором МГУ был 22 года в 1951-1973 гг. Три математика занимали пост ректоров университетов в разные исторические эпохи – Российская империя, СССР, новая Россия. Этот факт является свидетельством и подтверждением важной роли математики в отечественной системе образования на протяжении трех веков.

Однако, в самой Академии наук первым математиком – Президентом АН СССР стал "Главный Теоретик космонавтики" и "Главный математик" страны Мстислав Всеволодович Келдыш. И фактически с 1961 по 2013 год с перерывом, когда Президентом АН в 1975-1986 гг. был физик А.П. Александров (13.02.1903-03.02.1994), а в 1986-1991 гг. Г.И. Марчук (08.06.1925-24.03.2013), во главе Академии наук были математики. Кстати, с 1961 по 1991 гг. главами АН СССР были руководители "Атомного" и "Космического" проектов и проекта создания "Ракетно-ядерного щита" – Герон Социалистического Труда за исключительные заслуги. Среди математиков М.В. Келдыш – бессменный Председатель МНТС по КИ при АН СССР с его основания в 1959 году до последнего дня жизни в 1978 году. С 1991 по 2013 гг. Президентом РАН был математик академик Юрий Сергеевич Осипов (р. 07.07.1936) – участник создания "Космического" проекта и Председатель МНТС по КИ при РАН.

Рекорд 25 лет (1962-1987) на посту ректора МФТИ установил ученик М.В.Келдыша Олег Михайлович Белоцерковский (29.08.1925-14.07.2015) – выпускник физико-технического факультета МГУ в 1952 году, механик-аэродинамик академик с 15.03.1979.

Самые успешные ректоры математики И.Г. Петровский, О.М. Белоцерковский, В.А. Садовниченко в своей работе соблюдали "Принципы Келдыша" и, будучи единомышленниками М.В. Келдыша, повсеместно сохраняли и развивали научное наследие "Эпохи Келдыша".

Два главных советских вуза, в которых формировали научную и интеллектуальную "элиту", – МГУ с фундаментальной подготовкой на физическом и механико-математическом факультетах (были лидерами в мире!), с 1970 года и на факультете вычислительной математики и кибернетики, а МФТИ готовил инженеров мирового уровня для ракетно-космической отрасли – сыграли ключевую роль в подготовке кадров мирового уровня и в становлении и развитии "цифровой и космической" цивилизаций! Неоценимую роль в этом сыграли академики М.В. Келдыш, И.Г. Петровский, А.Н. Тихонов.

Международная научная конференция "Математика в созвездии наук" 1-2 апреля 2024 года в МГУ – это оперативный адекватный ответ на современные вызовы отечественной науки. И не случайно конференция приурочена "к юбилею ректора В.А. Садовниченко", который под влиянием своих учителей прошел все этапы развития науки и образования и сейчас лично олицетворяет образец современного специалиста с фундаментальной базовой подготовкой "чистого" математика, достигшего высоких достижений в области космических исследований, позволивших опубликовать две энциклопедические книги "Космическое земледование" и получить две госпремии.

Праздничной датой "День математика" считается 1 декабря – день рождения гениального русского математика Николая Ивановича Лобачевского (01.12.1792-24.02.1856). Учитель двух основателей неевклидовой геометрии – Гаусса и

Лобачевского – Мартин Фёдорович Бартельс (Иоганн Христиан Мартин Бартельс, 12.08.1769-08.12.1836), немецкий и российский математик, с 1808 года жил в России. Член-корреспондент Петербургской Академии наук с 26.04.1826 года. В 1808-1820 гг. работал в Императорском Казанском университете. В январе 1821 г. переехал в Императорский Дерптский университет (основан в 1803 г.; позже Юрьевский, Тартусский университет, Эстония), где создал научную школу по дифференциальной геометрии! В должности ординарного профессора чистой и прикладной математики работал до конца жизни, избирался деканом физико-математического факультета, читал лекции по истории математики.

Сам Бартельс не занимался неевклидовой геометрией и к идеям Лобачевского отнесся негативно. Истинными творцами первой в мире неевклидовой геометрии были три крупнейших математика мира – русский Николай Лобачевский, немец Карл Гаусс и венгр Янош Бойяи, которые пришли к своим открытиям независимо.

В 2024 г. у докладчика, Т.А.Сушкевич, 60-летний юбилей первых результатов научной деятельности, которая началась 01.02.1963 после окончания "с отличием" кафедры "математика" (зав. А.Н.Тихонов) физфака МГУ по актуальной специальности "теоретическая и математическая физика" и направления на работу в должности "стажера-исследователя" в "Институт Келдыша" АН СССР (п/я 2287):

– в 1964 году была опубликована **первая научная статья**

Масленников М.В., Сушкевич Т.А. Асимптотические свойства решения характеристического уравнения теории переноса излучения в сильно поглощающих средах // ЖВМ и МФ. 1964. Т.4, № 1. С. 23-34. (Теория переноса излучения и её приложения – основа ДЗЗ и космической оптики!)

– сделан **первый доклад на конференции**

Масленников М.В., Сигов Ю.С., Сушкевич Т.А. Численное решение задачи о стационарном обтекании тела разреженной плазмой // В сб.: "Тезисы докладов. Четвертое совещание по магнитной гидродинамике", Рига, 22-27 июня 1964 г. - Рига: Изд. АН Латв.ССР, 1964.

- выполнено **первое в СССР научное исследование** (моделирование прохождения ракет и спутников через радиационные пояса, открытые на трех первых спутниках в 1957-1958 гг.) на первой в СССР большой полупроводниковой ЭВМ "Весна" с участием в математической сдаче-приемке в августе 1964 года; **ПЕРВЫЕ** в СССР компьютерные графики и компьютерный анимационный фильм совместно с Ю.М.Баяковским – **ПЕРВЫМ** в СССР членом ACM, ACM SIGGRAPH, ACM Siggraph Computer Graphics Pioneers Club, IEEE CS.

Эти первые работы связаны с началом покорения космического пространства. В течение 30 лет Т.А.Сушкевич была членом НТС ВПК по космосу, с 1980 г. по н.в. – ЭКСПЕРТ в научно-технологической сфере и Академии наук АН СССР/РАН!

Для покорения космоса под руководством М.В.Келдыша впервые с помощью ЭВМ создали "МАТЕМАТИЧЕСКИЙ КОСМОС"! Это творение стало драйвером развития новых разделов математики, суперкомпьютеров, кибернетики, информационных технологий, цифровизации, computer science, Big Data science, искусственного интеллекта, автоматизации, роботизации, интернет, управления в разных сферах и много много всего другого, что в 21-м веке взрывными темпами оформляется в "Цифровую цивилизацию" – самый весомый аргумент в адекватной оценке статуса "МАТЕМАТИКА – ПРОИЗВОДИТЕЛЬНАЯ СИЛА".

А как это начиналось? В докладе содержится обзор достижений в ОТЕЧЕСТВЕННОЙ математике на пути к покорению космоса, начиная с 1136 года, когда в нашей стране вышел первый научный труд про "числа" и их приложения: посвященный изучению чисел "Трактат о числах" появился в Новгороде, автор

доместик Антониева монастыря Кирик Новгородец, а также с Реформ Петра Первого и создания в 1701 Школы математических и навигацких наук (1701-1753).

Мы стали ПЕРВЫМИ в покорении космоса, поскольку ни в одной стране мира не было такого научного наследия и множества талантливых ученых и инженеров с высоким математическим образованием в условиях советской мобилизационной социалистической экономики. Только в СССР более 35 математиков Герои Социалистического Труда, среди них М.В.Келдыш – единственный трижды, И.М.Виноградов, А.Н.Тихонов, Н.Н.Боголюбов, В.А.Амбарцумян – дважды.

В 2024 г. научная общественность отметила 90-летие Математического института имени В.А.Стеклова АН СССР/РАН (МИАН) и 160-летие великого В.А.Стеклова, без которых не было бы эпохальных успехов в космосе. С 1934 по 1953 гг. М.В.Келдыш повышал свои математические знания и получал первые результаты в МИАН по-совместительству, работая в 1931-1946 гг. в ЦАГИ, в 1946-1953 – в РНИИ. И созданный в 1953 году М.В.Келдышем ИПМ являлся секретным Отделением МИАН.

ЭФФЕКТИВНАЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СЕТЕЙ НАНОПРОВОДОВ: ПОДХОДЫ СРЕДНЕГО ПОЛЯ, ЭФФЕКТИВНОЙ СРЕДЫ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Ю.Ю. Тарасевич, А.В. Есеркепов, И.В. Водолазская

АГУ им. В.Н. Татищева, г. Астрахань, Россия

414056, ул. Татищева, 20а

Tel.: 8(8512) 24-64-96, e-mail: tarasevich@asu-edu.ru

Прозрачные проводящие электроды являются ключевыми компонентами для различных термо- и оптоэлектронных устройств, в качестве, например, органических светоизлучающих диодов, солнечных элементов, сенсорных экранов, прозрачных обогревателей, фотодетекторов, термоэлектрических генераторов, защитных экранов. Прозрачные проводящие электроды на основе металлических нанопроволочных сетей имеют высокие электрическую проводимость и оптическое пропускание, а также механическую прочность и гибкость. Сопротивление таких сетей (между шинами, расположенными на противоположных границах пленки, на которые подается электрическое напряжение) определяется физическими и геометрическими параметрами: удельным сопротивлением ρ нанопроводов, сопротивлением контактов R_j между нанопроводами, сопротивлением контактов между нанопроводами и шинами R_b , а также размером нанопроволок l и их количеством N [1].

Для модельного исследования сетей металлических нанопроволок используют метод Монте-Карло: проводящие объекты в форме стержней, окружностей, дуг размещают случайным образом в квадратной области размером $L \times L$. После перехода к случайной сети сопротивлений вычисляется сопротивление (или электропроводность) всей сети между шинами по правилу Кирхгофа и закону Ома. Сопротивление отрезков проводов между точками пересечений (ребер) определяется длинами этих отрезков. Модельные исследования позволяют статистическими методами выявить закономерности: зависимости эффективной электропроводности сети G от концентрации ребер n , от анизотропии ориентации нанопроволок, от дисперсии проволок по длинам [2–5] для трех ситуаций: сопротивление контактов сильно преобладает над сопротивлением проводов, обратная ситуация и сопротивление контактов сопоставимо с сопротивлением проводов.

Металлические сети, изготовленные на основе шаблона трещин, имеют уникальные преимущества, такие как: отсутствие межпроводных контактных соединений и отсутствие изолированных проводов, в отличие от стандартных неупорядоченных сетей на основе нанопроволок. Кроме того, в отличие от сетей с регулярной металлической структурой, полученных методами литографии, они не возбуждают дифракционные эффекты и не создают муаровых узоров при освещении светом. Для моделирования сетей на основе шаблона трещин часто используются диаграммы Вороного, которые топологически близки к картине узора трещин, образующихся при высыхании некоторых материалов: различных глин, яичного белка [6–9]. В отличие от реальных трещин, в диаграмме Вороного нет временной иерархии трещин; кроме того, ребра прямолинейные. Реальные трещины в большинстве случаев в окрестности пересечений изгибаются и пересекаются под прямым углом. Трещины первого порядка шире, чем те, которые развились позже, кроме того, трещины имеют

переменную ширину. После заполнения трещин металлом получается связанная бесшовная металлическая сеть, при расчете сопротивления которой сопротивление контактов не учитывается, а сопротивление участка проводящего пути между точками пересечений трещин (ребер) зависит от длины и ширины участка.

Приближение среднего поля позволяет получить аналитическую зависимость среднего значения электропроводности сети от средней концентрации проводящих ребер и их средней длины. В плотной сети (большая концентрация ребер n) падение напряжения в узлах (точках пересечений проволок или точках соединений трещин) вдоль внешнего поля меняется по закону, близкому к линейному, это дает возможность перейти от сети с большим количеством ребер к рассмотрению поведения одного ребра в однородном электрическом поле [2–5, 10–13]. Так как концентрация ребер подчиняется распределению Пуассона (при равномерном случайном размещении проволок или заливок Вороного на плоскости), была получена первая аналитическая формула по теории среднего поля с учетом того, что средняя длина ребра зависит от локальной концентрации ребер. При выводе использовались также свойства разбиения Вороного [14]. Используя формулу Дыхне для электропроводности двумерной двухфазной системы, была получена вторая аналитическая формула, где дополнительно учитывались локальные флуктуации электрического поля [14]. Сравнение показало, что все теоретические описания завышают эффективную электропроводность, по сравнению с результатами моделирования, даже для очень плотных сетей, где ожидается, что теория среднего поля будет достаточно точной.

Приближение эффективной среды было применено для оценки электропроводности диаграммы Вороного. Приближение эффективной среды в приложении к сетям [15–17] позволяет заменить регулярную сеть, ребрам которой приписывается случайное распределение электропроводностей, однородной регулярной сетью с одинаковыми электропроводностями ребер g_m . Топологически диаграммы Вороного близки к шестиугольной решетке (соты); для таких сетей со случайным распределением электропроводностей по ребрам (соответствующим распределению ребер диаграмм Вороного по длинам) теория эффективной среды дает хорошее приближение зависимости электропроводности от концентрации ребер [18].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-21-00074, <https://rscf.ru/project/23-21-00074/>.

Литература

1. Benda R., Canc`es E., Lebental B.//J. Appl. Phys., v.126, №4. 2019, P. 044306.
2. Tarasevich Y.Y., Eserkepov A.V., Vodolazskaya I.V.//Phys. Rev. E, 105, №4. 2022, P. 044129.
3. Tarasevich Y.Y., Eserkepov A.V., Vodolazskaya I.V.//J. Appl. Phys., v.132, №12. 2022, P. 125105.
4. Tarasevich Y.Y. & Eserkepov A.V.//Phys. Rev. E, v.107, №3. 2023, P. 034105.
5. Tarasevich Y.Y., Eserkepov A.V., Vodolazskaya I.V.//J. Appl. Phys., v.133, №13. 2023, P. 135106.
6. Zeng Z., Wang C., Gao J.//J. Appl. Phys., v.127, №6. 2020, P. 065104.
7. Kim J., Truskett T.M.//Appl. Phys. Lett., v.120, №21. 2022, P. 211108.
8. Esteki K. et al.//Nanoscale, v.15. 2023, P. 10394.
9. Tarasevich Y.Y., Eserkepov A.V., Vodolazskaya I.V.//Phys. Rev. E, v.108, №4. 2023, P. 044143.
10. Forró C. et al.//ACS Nano, v.12, №11. 2018, P. 11080–11087.
11. Kumar A. & Kulkarni G.U.//J. Appl. Phys., v.119, №1. 2016, P. 015102.

12. Kumar A., Vidhyadhiraja N.S., Kulkarni G.U.//J. Appl. Phys., v.122, №4. 2017, P. 045101.
13. Tarasevich Y.Y., Vodolazskaya I.V., Eserkepov A.V.//Phys. Chem. Chem. Phys., v.24, №19. 2022, P. 11812.
14. Tarasevich Y.Y., Vodolazskaya I.V., Eserkepov A.V.//Appl. Phys. Lett., v.123, №26. 2023, P. 263501.
15. Kirkpatrick S.//Rev. Mod. Phys., v.45(№4). 1973, P. 574–588.
16. Joy T. & Strieder W.//J. Phys. C: Solid State Phys., v.11, №21. 1978, L867–L870.
17. Joy T. & Strieder W.//J. Phys. C: Solid State Phys., v.12, №7. 1979, L279–L281.
18. Tarasevich Y.Y., Vodolazskaya I.V., Eserkepov A.V., F.D.A. Aar~ao Reis F.D.A.//arXiv:2403.10241[cond-mat.dis-nn] (2024)

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ И КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В.В. Филатов, М.В. Чумаева, Д.А. Николаев
V.V. Filatov, M.V. Chumaeva, D.A. Nikolaev

ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, Россия

127055, Вадковский пер., 3А

+7 (916) 429-29-18, d.nikolaev@fvvis-techmash.ru

Слайд 1. Название работы.

Слайд 2. В настоящее время одной из важных задач при проектировании систем автоматического управления (САУ) мехатронных и робототехнических систем является создание их соответствующих математических и компьютерных моделей. Компьютерная модель процессов в исполнительном двигателе является одним из основных модулей в мехатронной модели системы управления. В данной работе рассматривается построение математической и компьютерной имитационной моделей исполнительного синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов.

Слайд 3. Блок схема процесса моделирования

Управление синхронным двигателем с возбуждением от постоянных магнитов осуществляется только по цепи якоря, а общий магнитный поток полюса Φ зависит от тока якоря $i_A(t)$. Это обусловлено размагничивающим эффектом магнитного потока реакции якоря. Рабочая точка системы возбуждения (постоянных магнитов индуктора) будет смещаться к его предельной петле гистерезиса, поэтому возникает необходимость учета зависимости магнитного потока в зазоре от размагничивающего действия реакции якоря.

Слайд 4. На базе основных уравнений электромагнитного состояния якорных обмоток и механического равновесия двигателя построена исходная математическая модель трехфазного синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов. Модель связывает величины, по которым ведется управление, с входными управляющими величинами:

$$\begin{aligned}u_A(t) &= R_A i_A(t) + L_A \frac{di_A(t)}{dt} + K_M(i_A)\Omega(t)\cos\theta; \\u_B(t) &= R_B i_B(t) + L_B \frac{di_B(t)}{dt} + K_M(i_B)\Omega(t)\cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right); \\u_C(t) &= R_C i_C(t) + L_C \frac{di_C(t)}{dt} + K_M(i_C)\Omega(t)\cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right); \\M_{\Sigma}(t) - J_{\Sigma} \frac{d\Omega(t)}{dt} - \beta_T \Omega(t) - M_{BH}(t, \Omega, \theta) &= 0.\end{aligned}$$

Слайд 5. Обозначения и названия величин

Слайд 6. Суммарный электромагнитный момент $M_{\Sigma}(t)$ рассчитывается по следующим выражениям:

$$\begin{aligned}M_{\Sigma}(t) &= M_{\Sigma_A}(t) + M_{\Sigma_B}(t) + M_{\Sigma_C}(t); \\M_{\Sigma_A}(t) &= K_M(i_A)i_A(t)\cos\theta;\end{aligned}$$

$$M_{\mathcal{O}_B}(t) = K_M(i_B)i_B(t)\cos(\theta - \frac{2\pi}{3});$$

$$M_{\mathcal{O}_C}(t) = K_M(i_C)i_C(t)\cos(\theta - \frac{4\pi}{3});$$

Слайд 7. При составлении математической модели в качестве координат фазового пространства выбираются переменные состояния: токи в обмотках якоря $i_A(t)$, $i_B(t)$, $i_C(t)$ и угловая скорость вращения ротора $\Omega(t)$. В результате система уравнений принимает вид:

$$\begin{aligned}\frac{di_A(t)}{dt} &= -\frac{R_A}{L_A}i_A(t) - \frac{\cos\theta}{L_A}K_M(i_A)\Omega(t) + \frac{1}{L_A}u_A(t); \\ \frac{di_B(t)}{dt} &= -\frac{R_B}{L_B}i_B(t) - \frac{\cos(\theta - \frac{2\pi}{3})}{L_B}K_M(i_B)\Omega(t) + \frac{1}{L_B}u_B(t); \\ \frac{di_C(t)}{dt} &= -\frac{R_C}{L_C}i_C(t) - \frac{\cos(\theta - \frac{4\pi}{3})}{L_C}K_M(i_C)\Omega(t) + \frac{1}{L_C}u_C(t); \\ \frac{d\Omega(t)}{dt} &= \frac{1}{J_\Sigma}M_{\mathcal{O}_\Sigma}(t) - \frac{\beta_T}{J_\Sigma}\Omega(t) - \frac{1}{J_\Sigma}M_{BH}(t, \Omega, \theta)\end{aligned}$$

Слайд 8. Для построения имитационной компьютерной модели уравнения переводят в интегральную форму:

$$\begin{aligned}i_A(t) &= -\frac{R_A}{L_A}\int i_A(t)dt - \frac{\cos\theta}{L_A}\int [K_M(i_A)\Omega(t)]dt + \frac{1}{L_A}\int u_A(t)dt; \\ i_B(t) &= -\frac{R_B}{L_B}\int i_B(t)dt - \frac{\cos(\theta - \frac{2\pi}{3})}{L_B}\int [K_M(i_B)\Omega(t)]dt + \frac{1}{L_B}\int u_B(t)dt; \\ i_C(t) &= -\frac{R_C}{L_C}\int i_C(t)dt - \frac{\cos(\theta - \frac{4\pi}{3})}{L_C}\int [K_M(i_C)\Omega(t)]dt + \frac{1}{L_C}\int u_C(t)dt; \\ \Omega(t) &= \frac{1}{J_\Sigma}\int M_{\mathcal{O}_\Sigma}(t)dt - \frac{\beta_T}{J_\Sigma}\int \Omega(t)dt - \frac{1}{J_\Sigma}\int M_{BH}(t, \Omega, \theta)dt\end{aligned}$$

Слайд 9. По уравнениям в интегральной форме составляется структурная блок-схема математической модели.

Слайд 10. Схема разработанной компьютерной имитационной модели в программной среде MultiSim представлена на слайде. Параметризация модели проведена на базе синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов типа ДБМ140-1,6-6-3-Р18.

На входы имитационной модели AR , BR , CR подаются управляющие воздействия $u_A(t)$, $u_B(t)$, $u_C(t)$ соответственно. На входы $M_{BH}R$ и $J_{sum}R$ подаются внешние возмущения $J_{sum}(t)$ и $M_{BH}(t)$, а на выходах ωR , nR , $M_{sum}R$ формируются значения $\Omega(t)$, $n(t)$, $M_{\mathcal{O}_\Sigma}(t)$ соответственно.

Слайд 11. Результаты компьютерного эксперимента на имитационной модели двигателя типа ДБМ140-1,6-6-3-Р18 представлены на слайде. В ходе эксперимента смоделирован пуск двигателя при входном синусоидальном трехфазном напряжении на фазах обмотки якоря 140 В, 50 Гц в режиме холостого хода, последующий наброс нагрузки до $M_{вн} = 1,6$ Нм и работа двигателя в режиме постоянной нагрузки $M_{вн}(t)=1,6$ Нм, сброс нагрузки и выбег в режиме холостого хода.

Результаты компьютерного эксперимента позволяют судить об адекватности разработанной модели.

Слайд 12. Для оценки пульсации момента на валу двигателя выполнен частотный анализ функции $M_{\omega}(t)$. Частота основной гармонической составляющей реакции определяется частотой входных напряжений $u_A(t)$, $u_B(t)$, $u_C(t)$ $f = 50$ Гц. Результаты частотного анализа приведены на слайде.

Слайд 13. Подводя итог, можно сказать, что разработанная модель синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов является открытой, удобной для модификаций под конкретные задачи моделирования и весьма эффективной при построении характеристик исполнительных синхронных двигателей электроприводов.

Слайд 14. Зключительный.

Библиографический список

1. Подураев Ю.В. Основы мехатроники. Учебное пособие для ВУЗов. М.: Машиностроение, 2006. – С. 256.
2. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. В 2-х т. Том 1: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство МЭИ, 2004. – С. 656, ил.
3. Филатов В.В., Чумаева М.В. Моделирование процессов управления двигателем постоянного тока. Вестник МГТУ "Станкин" Научный рецензируемый журнал. №3(7), 2009. – С. 117-123. ИЦ ГОУ ВПО МГТУ "Станкин".
4. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-Век, 2008. – С. 368.
5. Мачулин П.С. Исследование вариантов управления синхронным бесколлекторным двигателем посредством математического моделирования // Омский научный вестник. 2018. №6 (162). – С. 247-252. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-162-247-252.
6. Кузовкин В.А., Филатов В.В. Схемотехническое моделирование электрических устройств в Multisim: учебное пособие / В.А. Кузовкин, В.В. Филатов. - Старый Оскол: ТНТ, 2013. – С. 336. ISBN 978-5-94178-362-5.

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ СУДЕБНО-МЕДИЦИНСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЛИЧНОСТИ ПО ПРИЗНАКАМ ПОХОДКИ

Е.Е. Фомина

Тверской государственный технический университет, Тверь, Россия
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22

e-mail: f-elena2008@yandex.ru

Активное внедрение систем видеонаблюдения в качестве компонента системы безопасности различных объектов позволяет использовать видеоматериалы в следственных мероприятиях для проведения процесса идентификации личности [1]. В частности, одним из видов идентификации является идентификация по признакам походки.

Тема идентификации личности по признакам походки вызывает все больший интерес. В настоящее время предложены методы, основанные на построении нейронных сетей, расчете энергии походки, анализе бинарных силуэтов [2]. Однако большая часть методов базируется на анализе видеоматериала именно при боковой съемке объекта, т.к. боковая съемка позволяет максимально оценить энергию движения. Выполнение данного условия не всегда возможно на практике. Часто для экспертизы предъявляется материал, на котором объект снят анфас, сверху или с других проекций.

В настоящем исследовании предложен метод идентификации по признакам походки, основанный на анализе характеристик цикла шага и качественных признаках походки.

На первом этапе исследования была собрана база данных видеозаписей, на которых добровольцы ходили с разной скоростью по электронной беговой дорожке [3]. Далее разработан программный комплекс для расчета характеристик цикла шага [4, 5], произведена оцифровка шагов 400 индивидов, произведен анализ показателей описательной статистики и выявлены закономерности ходьбы на разных скоростных режимах отдельно для мужчин и женщин, для разных возрастных групп, в зависимости от роста и индекса массы тела. Разработаны алгоритмы прогнозирования антропометрических периметров человека на основе цифровых характеристик шагов с использованием нейронной сети и Random Forest. Предложен метод идентификации индивида по цифровым характеристикам шагов.

На втором этапе исследования предложена система качественных признаков походки (по аналогии со словесным портретом, описывающим лицо). Разработано мобильное приложение для фиксации параметров походки индивида и формирования единой базы данных. В результате анализа видеоматериала сформирована база данных паттернов походки. Произведена статистическая обработка результатов и рассчитаны вероятности встречаемости каждого варианта признака. Предложен метод идентификации по качественным признакам походки.

Литература

1. Смахин Е.В., Щербич С.В. Применение систем видеofиксации в раскрытии и расследовании преступлений / Е.В. Смахин, С.В. Щербич // Алтайский юридический вестник. – 2017. – № 1 (17). – С. 137–141.

2. Соколова А.И., Конушин А.С. Методы идентификации человека по походке в видео / А.И. Соколова, А.С. Конушин // Тр. ИСП РАН. 2019. – Т. 31. – № 1. – С. 69–82.
3. Косухина О.И., Фомина Е.Е., Леонов С.В. База данных характеристик цикла шага. Свидетельство о регистрации базы данных RU 2022623085, 24.11.2022. Заявка № 2022623089 от 16.11.2022.
4. Фомина Е.Е., Леонов С.В. Программный комплекс для идентификации личности по характеристикам цикла шага. Программные продукты и системы. – 2023. – № 2. – С. 303–308.
5. Фомина Е.Е., Леонов С.В., Косухина О.И. Программный комплекс для расчета характеристик цикла шага. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2022682014, 17.11.2022. Заявка № 2022681539 от 11.11.2022.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В КАНАЛАХ ТЕПЛОВЫХ АККУМУЛЯТОРОВ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ КОНТЕЙНЕРАМИ

^{1,2}Хвостов А.А., ¹Панов С.Ю., ¹Косухин С.А., ¹Ряжских А.В., ¹Богер А.А.

¹Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия

²Воронежский государственный университет инженерных технологий,
Воронеж, Россия

khvtol1974@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрена математическая модель системы с тепловым аккумулятором, включающим цилиндрические контейнеры с веществом фазового перехода (ВФП), омываемые жидким теплоносителем в ламинарном режиме. Математическая модель описывает изменение температурных, скоростных полей, поля давления и границы раздела фаз как в потоке теплоносителя, так и в контейнере с ВФП. Решение уравнений модели осуществлено численно методом конечных элементов в среде ComsolMultiphysicsTM. Предлагаемая модель позволяет осуществлять энергетические расчеты, оценивать динамические характеристики теплообменных систем, подбирать рациональные гидродинамические режимы работы и компоновку теплоаккумулирующих элементов.

Ключевые слова: математическое моделирование, тепловые аккумуляторы, материалы с фазовым переходом

Внедрение энергосберегающих технологий привело к созданию класса тепловых аккумуляторов на основе элементов с фазовым переходом (ВФП) [1]. Часть их конструкций реализована в виде изолированных контейнеров (сфер, цилиндров, кольцевых каналов и т.д.), наполненных ВФП [2,3]. Эффективность теплового аккумулятора напрямую зависит от интенсивности теплообмена между контейнером с ВФП и теплоносителем. Поэтому анализ гидродинамики и теплопереноса в сопряженных системах, включающих контейнеры с ВФП и поток теплоносителя представляет практический и научный интерес.

Рассмотрена проточная теплоизолированная система с ламинарным потоком теплоносителя вокруг цилиндров с ВФП. Ввиду существенного превышения длины цилиндра над его диаметром рассмотрено 2D сечение области, нормальное оси цилиндра (рис. 1). Не учтены: действие массовых сил, тепловая инерционность разделяющей стенки, изменение объема при изменении плотности, теплообмен с окружающей средой, конвективный перенос тепла в ВФП; плотности, теплопроводности, а также теплоемкость теплоносителя не зависят от температуры.

На рис. 1 представлена расчетная схема, включающая в себя домен с потоком теплоносителя D_1 высотой h и длиной L , домен с ВФП D_2 диаметром d , стенки канала Γ_1 , вход в канал Γ_2 , выход из канала Γ_3 и границы между доменами Γ_4 .

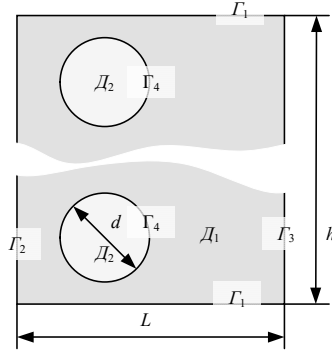


Рис. 1. Расчётная схема

С учётом принятых допущений сформулирована начально-краевая задача

$$\left\{ \begin{array}{l} D_1 \rightarrow \frac{\partial \bar{u}_h}{\partial t} + \rho_h (\bar{u}_h \cdot \nabla) \bar{u}_h = \nabla \cdot (-P_h \bar{I} + \bar{K}); \\ \bar{K} = \mu_h [\nabla \bar{u}_h + (\nabla \bar{u}_h)^T]; \\ \nabla \cdot (\rho_h \bar{u}_h) = 0; \\ \rho_h c_{p,h} \frac{\partial T_h}{\partial t} + \rho_h c_{p,h} \bar{u}_h \cdot \nabla T_h = \nabla \cdot \lambda_h \nabla T_h; \\ D_2 \rightarrow \rho_c c_{p,c} \frac{\partial T_c}{\partial t} = \nabla \cdot \lambda_c \nabla T_c, \end{array} \right. \quad (1)$$

где t – время, с; T_h, T_c – температуры ВФП и теплоносителя, К; ρ_h, ρ_c – плотность ВФП и теплоносителя, кг/м³; $c_{p,h}, c_{p,c}$ – изобарная удельная теплоёмкость ВФП и теплоносителя, Дж/(кг·К); λ_h, λ_c – теплопроводность ВФП и теплоносителя, Вт/(м·К), $\bar{u}_h$ – скорость потока теплоносителя, м/с; $\bar{K}$ – тензор вязких напряжений в потоке теплоносителя, Па; μ_h – динамическая вязкость теплоносителя, Па·с.

Для расчета фазового перехода использован метод сквозного счета [4] с общим уравнением сохранения энергии для обеих фаз. Поглощение (выделение) теплоты при фазовом переходе учтено через эффективную теплоемкость [5]

$$c_{p,c} = \frac{1}{\rho_c} (\rho_{c,1} \theta_1 c_{p,c,1} + \rho_{c,2} \theta_2 c_{p,c,2}) + L \frac{d\alpha_m}{dT_c}, \quad (2)$$

где L – скрытая теплота кристаллизации (плавления), Дж/кг; θ_1, θ_2 – объемные доли фаз

$$\theta_1 + \theta_2 = 1, \quad (3)$$

эффективные плотности и теплопроводность ВФП [6]

$$\rho_c = \theta_1 \rho_{c,1} + \theta_2 \rho_{c,2}, \quad (4)$$

$$\lambda_c = \theta_1 \lambda_{c,1} + \theta_2 \lambda_{c,2}, \quad (5)$$

где $\rho_{c,1}$, $\rho_{c,1}$ – плотности фаз ВФП, кг/м³, $\lambda_{c,1}$, $\lambda_{c,1}$ – теплопроводности фаз ВФП, Вт/(м·К), α_m – массовая доля,

$$\alpha_m = \frac{1}{2} \frac{\rho_{c,2}\theta_2 - \rho_{c,1}\theta_1}{\rho_c}. \quad (6)$$

Начальные условия $T_h|_{t=0} = T_c|_{t=0} = T_0$, где T_0 – начальная температура системы; $\bar{u}_h = 0$, м/с; $P_h=0$, Па; $\theta_1 = 1$, $\theta_2 = 0$.

Граничные условия на границе D_1 с окружающей средой Γ_1 : $\frac{\partial T_h}{\partial n} = 0$, $\bar{u}_h = 0$; вход в расчетную область Γ_2 : $\bar{u}_h = u_{ex}$, $T_h = T_{ex}$; выход из расчетной области Γ_3 : $P_h=0$, $-\bar{n} \cdot \frac{\lambda_h \partial T}{\partial n} = 0$; на Γ_4 : $T_h = T_c$, $\lambda_h \frac{\partial T_h}{\partial n} = \lambda_c \frac{\partial T_c}{\partial n}$; $\bar{n}$ – вектор, нормальный расчётной поверхности.

Модель (1-6) описывает эволюцию температурных, скоростных полей, поля давления и границы раздела фаз в контейнере с ВФП при его обтекании ламинарным потоком теплоносителя в процессе зарядки (разрядки) теплового аккумулятора.

Решение задачи (1-6) осуществлено численно методом конечных элементов в среде ComsolMultiphysicsTM. Расчётная сетка состояла из 21816 элементов. Использован неявный решатель BDF и метод Ньютона [7, 8]. В качестве модельных сред выбраны тосол (теплоноситель) и тетрадекан (ВФП). Параметры вычислительного эксперимента представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры вычислительного эксперимента

№пп	Название параметра	Обозначение	Значение	Единица измерения
1	Плотность теплоносителя	ρ_h	1080	кг/м ³
2	Плотность ВФП ($\rho_{c,1} = \rho_{c,2}$)	ρ_c	762	кг/м ³
3	Изобарная удельная теплоёмкость теплоносителя	$c_{p,h}$	3450	Дж/(кг·К)
4	Изобарная удельная теплоёмкость ВФП ($c_{p,c,1} = c_{p,c,2}$)	$c_{p,c}$	2193	Дж/(кг·К)
5	Коэффициент теплопроводности теплоносителя	λ_h	0,433	Вт/(м·К)
6	Коэффициент теплопроводности ВФП ($\lambda_{c,1} = \lambda_{c,2}$)	λ_c	0,24	Вт/(м·К)
7	Динамическая вязкость теплоносителя	μ_h	3,71	мПа·с
8	Удельная теплота плавления (кристаллизации) ВФП	L	230	кДж/кг
9	Температура фазового перехода ВФП	T_c^*	279	К

По результатам вычислительного эксперимента рассчитаны нестационарные поля температур теплоносителя и ВФП (рис. 2), поля скоростей и давления теплоносителя, а также положение границы раздела фаз ВФП (рис. 3).

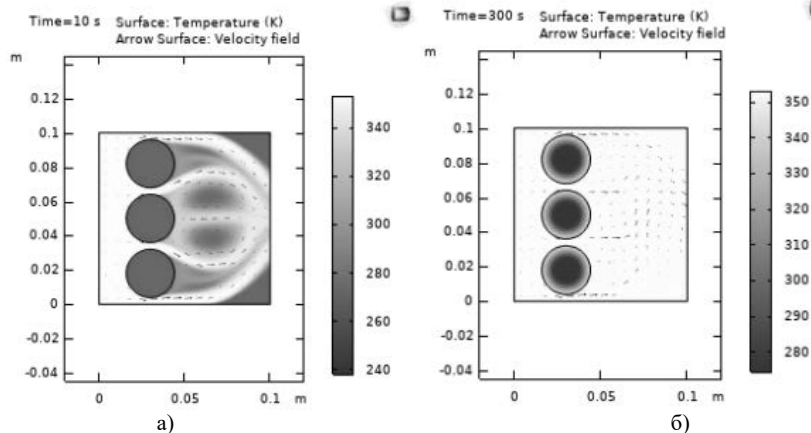


Рис. 2. Поля температуры (цветовая шкала), вектора скорости (стрелки векторного поля) через 10 с (а) и 300 с (б) после подачи на вход потока с температурой $T_{\text{вх}}=353\text{K}$, $d=0,028\text{ м}$, межцилиндровый зазор $0,04\text{ м}$, $u_{\text{вх}}=0,01\text{ м/с}$

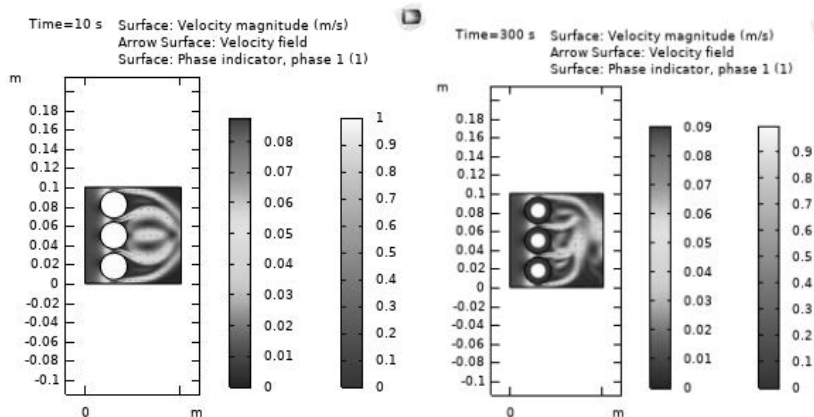


Рис. 3. Поля модуля скорости (цветовая шкала 1), вектора скорости (стрелки векторного поля) и долей фаз (цветовая шкала 2) через 10 с (а) и 300 с (б) после подачи на вход потока с температурой $T_{\text{вх}}=353\text{K}$, $d=0,028\text{ м}$, межцилиндровый зазор $0,04\text{ м}$, $u_{\text{вх}}=0,01\text{ м/с}$

Исследование сеточной сходимости и качественный анализ результатов вычислительного эксперимента показал качественное верное описание теплообменных процессов как в потоке теплоносителя, так и в контейнере с ВФП. Математическая модель позволяет провести энергетические расчеты разрабатываемой конструкции теплового аккумулятора, спрогнозировать его динамические характеристики.

Для теплообменных систем с тепловыми аккумуляторами, находящихся в эксплуатации, модель может быть использована для оценки времени зарядки

аккумулятора, синтеза передаточных функций каналов для систем управления, прогнозирования функциональности теплообменной системы в различных климатических условиях.

Литература

1. Резницкий Л.А. Тепловые аккумуляторы. М., Энергоатомиздат, 1996. 91 с.
2. Бекман Г., Гилли П. Тепловое аккумулирование энергии. – М.: Мир, 1987. 2 272 с.
3. Применение веществ с фазовыми переходами для аккумулирования тепловой энергии / А.В. Бараненко, П.А. Кузнецов, В.Ю. Захарова, А.П. Цой // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2018, том 18, № 6.
4. Самарский, А.А. Вычислительная теплопередача / А.А. Самарский, П.Н. Вабищевич. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 784 с.
5. Bonacina, C., Comini, G., Fasano, F., Primicerio, V., Numerical solution of phase-change problems. International Journal Heat Mass Trans-fer. – 1973. Vol. 16, P. 1825-1832.
6. Yunus A. Çengel, Afshin J. Ghajar Heat and mass transfer: fundamentals & applications, fifth edition 2015 Published by McGraw-Hill Education, 2 Penn Plaza, New York, NY 10121.
7. Нигматулин, Р. И. Динамика многофазных сред. Часть 1 / Р. И. Нигматулин – М.: Наука, 1987 – 464 с.
8. Abidi, A.; Ahmadi, A.; Enayati, M.; Sajadi, S.M.; Yarmand, H.; Ahmed, A.; Cheraghian, G. A Review of the Methods of Modeling Multi-Phase Flows within Different Microchannels Shapes and Their Applications. Micromachines 2021, 12, 1113.

Системы функций и их применение

Н.Н.Холщевникова
МГТУ “Станкин”, Москва, Россия
127055, Вадковский переулок, За
Тел.(8495)370-75-78, e-mail:
Kholshchevnikova@gmail.com

Тригонометрическая система

В 1744г. в письме Х.Гольдбаху Л.Эйлер помимо других результатов привел пример

$$x/2 + \sin x + \frac{1}{2} \sin 2x + \frac{1}{3} \sin 3x + \dots = \frac{1}{2}\pi.$$

Этот ряд явился первым в истории математики разложением рациональной функции $\pi/2 - x/2$ в ряд Фурье на $(0, 2\pi)$.

В начале 19 века Дж.Фурье вновь нашел формулы коэффициентов разложений в тригонометрические ряды, которые носят теперь его имя. Фурье успешно применил тригонометрические ряды к решению уравнений математической физики.

С этого времени разложение именно в тригонометрические ряды Фурье являлось преимущественным аппаратом в математике и ее приложениях в течении почти двух столетий.

Система Хаара

Следующая известная система функций - система Хаара. Эта система возникла при решении задачи, которую поставил Д.Гильберт своему ученику А.Хаару. Довольно долгое время казалось, что тригонометрический ряд Фурье непрерывной периодической функции всюду к ней сходится. Однако первый пример, который показал, что это не так был построен Дю-Буа-Реймоном в 1876г.

Гильберт предложил Хаару построить систему функций, при разложении по которой, ряд Фурье непрерывной функции сходил бы к ней всюду. В своей диссертации в 1909г. Хаар построил такую систему функций на отрезке $[0, 1]$, но сами функции оказались кусочно постоянными разрывными функциями. Функции системы Хаара $\{\chi_n(x)\}_{n=1}^{\infty}$, $x \in [0, 1]$ определяются следующим образом: $\chi_1(x) = 1$, а функции с номерами $2^k < n \leq 2^{k+1}$, $k = 0, 1, \dots$, определяются формулами

$$\chi_n(x) = \begin{cases} 2^{k/2}, & \text{если } x \in [i/2^k, (2i-1)/2^{k+1}); \\ -2^{k/2}, & \text{если } x \in [(2i-1)/2^{k+1}, (i+1)/2^k); \\ 0, & \text{если } x \in [0, 1] \setminus [i/2^k, (i+1)/2^k), \end{cases}$$

в точке $x = 1$ значение $\chi_n(1)$ определяется по непрерывности.

Как установил Шаудер в 1928г. система Хаара является базисом в пространствах $L^p[0, 1]$, $1 \leq p < \infty$. Систематическое изучение системы Хаара в СССР было начато П.Л.Ульяновым и его учениками.

Долгое время теоретические исследования системы Хаара не находили значительного практического применения. Новый всплеск интереса к этой системе возник во второй половине 20-го века. В связи с развитием вычислительной техники система Хаара стала применяться в вычислительной математике. Она используется при исследовании случайных процессов, в устройствах логического действия, при разработке цифровых фильтров.

Система Уолша

Система Уолша была введена Дж.Уолшем в 1923г. Функции системы Уолша определены на полуинтервале $[0, 1)$ и являются кусочно постоянными. Функции систем Уолша и Хаара выражаются друг через друга (если систему Хаара рассмотреть на полуинтервале $[0, 1)$). Они рассматриваются в разных нумерациях, но наиболее распространенной является нумерация Пэли. Положим $w_0(x) = 1$, для $x \in [0, 1)$. Для определения функций нам надо вспомнить двоичные разложения чисел. Если $x \in [0, 1)$, то x можно представить в виде суммы ряда

$$x = \sum_{k=0}^{\infty} x_k / 2^{k+1}, \quad x_k = 0, 1$$

При этом для двоично-рациональных чисел берем разложение с конечным числом единиц. Натуральные номера n также представим в двоичном разложении $n = \sum_{i=0}^k \varepsilon_i 2^i$ при где $\varepsilon_k = 1$ и $\varepsilon_i = 0$ при $i = 0, 1, \dots, k-1$. Здесь суммы состоят из конечного числа слагаемых, т.е. начиная с некоторого номера $k = k(n)$ числа $\varepsilon_k = 0$.

Функции системы Уолша определяются формулой

$$w_n(x) = (-1)^{\sum_{k=0}^{\infty} \varepsilon_k x_k}, n = 0, 1, 2, \dots$$

Для целых неотрицательных чисел и для чисел из $[0,1)$ определяется операция "сложения" $\oplus$. Пусть $n = \sum_{k=0}^{\infty} \varepsilon_k 2^k$ и $m = \sum_{k=0}^{\infty} \eta_k 2^k$. Тогда по определению

$$n \oplus m = \sum_{k=0}^{\infty} \zeta_k 2^k,$$

где $\zeta_k = \varepsilon_k + \eta_k \pmod{2}$ (сумма по модулю 2).

Тогда справедлива формула

$$w_n(x)w_m(x) = w_{n \oplus m}(x).$$

Многие свойства системы Уолша и тригонометрической системы аналогичны. Обе системы являются системами характеров коммутативных компактных групп. Система Уолша применяется в цифровой обработке информации, построении цифровых фильтров.

Системы всплесков

В середине 80-х начале 90-х годов XX века началось бурное развитие теории и приложений специальных систем функций и преобразований, названных всплесками (или вейвлетами от английского "wavelets". Хотя сначала этот термин возник во Франции как "ondelette"). Теория всплесков вначале была развита как средство частотно-временного анализа в нефтеразведке Ж.Морле и А.Гроссманом, затем ее использовали в анализе речи, в кодировании сигналов, в изучении мультифрактальных физических объектов, в компьютерной графике. Классические результаты в теории всплесков получены в эти годы Й.Мейером, И.Добеши, С.Малла, П.Ж.Лемарье, и другими. Первые работы по всплескам в России появились в 1992г. Вниманию математиков России к всплескам способствовали лекции по всплескам С.Б.Стечкина.

А в конце 20-го века оказалось, что система Хаара, распространенная на прямую, является примером системы всплесков (вейвлетов), интерес

к которым и к их применению возник лавинообразно и продолжается по сей день. Если математическим аппаратом, применяемом в 20-м веке при передаче сигналов в телевидении было косинус-преобразование Фурье, то с приходом цветного телевидения это стало всплеск-преобразование.

В настоящее время всплески применяются в теории и практике обработки сигналов, сжатии изображений, в компьютерной графике, распознавании речевых сигналов, в теоретической физике и в математике. Если раньше анализ и передача сигналов основывались на преобразовании Фурье, то сейчас цифровые технологии опираются на всплеск-преобразования. Так на всплесках основан международный стандарт сжатия информации JPEG-2000. Технология JPEG- 2000 была выбрана в качестве стандарта кодирования видео для цифрового кино в 2004 году.

Список литературы.

1.Б.С.Кашин, А.А.Саакян. Ортогональные ряды. - М.:Изд-во АФЦ, 1999.

2.Б.И.Голубов, А.В.Ефимов. Ряды и преобразования Уолша: Теория и применения. - М.:Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987.

3.И.Добеши. Десять лекций по вейвлетам.– Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001.

4.С. Малла. Вейвлеты в обработке сигналов. - Москва. Мир. 2005.

5.Н.Н.Холщевникова. Всплески: теория и применение. Электронное пособие. МГТУ "Станкин 2012.

КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ НА ЛИНИИ РОСТА ДЕНДРИТА В ПЕРЕОХЛАЖДЕННОМ РАСПЛАВЕ ЧИСТОГО ВЕЩЕСТВА

О. Н. Шабловский, Д. Г. Кроль

Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого,
Республика Беларусь, 246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.

E-mail: shablovsky-on@yandex.ru

Аннотация. Изучены предвестники морфологической неустойчивости макроскопической формы линии роста дендрита в переохлажденном расплаве.

Ключевые слова: кристаллизация, рост дендрита, граница твердое тело-жидкость, морфологический переход.

Введение. Проблема роста кристалла из переохлажденного расплава чистого вещества имеет следующий важный аспект: морфологические свойства фронта кристаллизации и возникновение боковых ветвей дендрита. Современное состояние теоретических и экспериментальных исследований дендритообразования представлено в статьях [1–5].

Цель данной работы: проанализировать устойчивость / неустойчивость начального состояния дендрита и определить взаимосвязи между пространственно-временными параметрами его вершины.

Уравнение роста дендрита. Рассмотрим двухмерный плоский случай. Фазовую границу кристаллизации (ФГК) моделируем плоской линией сильного разрыва $x - F(y, t) = 0$. Средняя кривизна этой границы равна $K = (\partial^2 F / \partial y^2) / G^3$, $G = (1 + (\partial F / \partial y)^2)^{1/2}$. Здесь координата x направлена вдоль оси симметрии в сторону твердой фазы; y – поперечная декартова координата. Для дальнейших рассуждений важное значение имеет угол θ , который образует нормаль $\mathbf{n}$ границы с осью x : $\cos \theta = 1/G$. ФГК перемещается со скоростью N справа налево ($N = N\mathbf{n}$, $N < 0$), и на ее вершине $\partial F / \partial y = 0$, $\cos \theta = 1$. Угол заострения линии роста равен $\theta_1 = (\pi/2) - \theta$, рисунок 1.

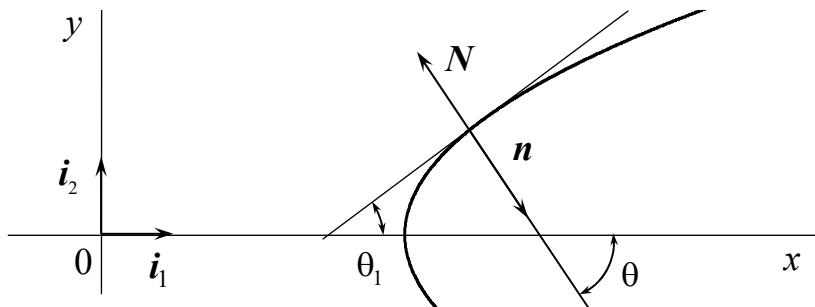


Рис. 1. Угол θ_1 заострения линии роста

На ФГК имеем следующие три условия.

$$\text{I. Баланс энергии: } q_j = N(c_j T_j - c_* T_*) + NT_c(c_* - c_j) - Q, \quad Q = L \left(N + \gamma_j \frac{\partial N}{\partial t} \right).$$

Здесь звездочкой отмечены параметры расплава перед ФГК; индекс j указывает, что значение функции определено на правой стороне сильного разрыва, в твердой фазе; c – объемная теплоемкость; q_j – нормальная к границе составляющая вектора теплового потока; расплав находится в однородном отрелаксировавшем состоянии: $q_* \equiv 0$, $T_* \equiv \text{const}$.

II. Известная кинетическая связь $|N| = \mu(T_e - T_j)$, $T_e = T_c[1 - (UK/L)]$, определяющая нормальный механизм роста из расплава. Здесь T_e – температура равновесия между твердой и жидкой фазами.

III. Отклонение температуры кристалла T_j от равновесного значения T_c постулируем в следующей форме [6]: $(T_c - T_j) = (\cos\theta)^\delta B$, $\delta > 0$, где $B \equiv \text{const}$ либо $B = B(t)$, $t \geq 0$. Параметр δ характеризует неоднородность переохлаждения на ФГК. Для аналитических расчетов наиболее удобны целые нечетные значения δ . Данная связь означает, что проявления неравновесных свойств температуры T_j в основном локализованы в окрестности вершины $\theta = 0$. Величина $B = T_c - T_j(\theta = 0)$ – это переохлаждение на вершине дендрита. Чем больше δ , тем отчетливее проявляется переход температуры T_j к равновесному значению T_c . Изучим вариант $\delta = 3$ для плоской фазовой границы. Уравнение роста $N \equiv (\partial F / \partial t) / G = -\mu(T_e - T_j)$ с учетом записанных выше соотношений принимает вид:

$$\partial^2 F / \partial y^2 = \alpha B + \phi(\partial F / \partial t)[1 + (\partial F / \partial y)^2], \quad \alpha = L / (UT_c), \quad \phi = \alpha / \mu. \quad (1)$$

Возмущенное состояние вершины дендрита. Построим на основе (1) плоский стационарный контур, скорость перемещения которого не зависит от времени:

$$\begin{aligned} F(y, t) &= A_1 t + A_2(y), \quad A_1 \equiv \text{const} < 0, \\ A_2(y) &= \frac{1}{a^2} \ln \left(\frac{1+E}{2} \right) - \frac{b}{a} y, \quad E = \exp(2aby), \quad \frac{dA_2(y)}{dy} \equiv A(y) = \frac{b(E-1)}{a(E+1)}, \\ a &= (-\phi A_1)^{1/2} > 0, \quad b = (\alpha B + \phi A_1)^{1/2} > 0, \quad -\mu B < A_1 < 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Это решение удовлетворяет условиям на оси симметрии $y = 0$: $A_2 = 0$, $dA_2 / dy = 0$.

Выполнив линеаризацию $F(y, t) = A_1 t + A_2(y) + f(y, t)$, где $f(y, t)$ – малое возмущение стационарного контура, получаем на основе (1), (2) уравнение

$$\frac{\partial^2 f}{\partial y^2} = \phi(1 + A^2) \frac{\partial f}{\partial t} + 2A_1 \phi A \frac{\partial f}{\partial y}.$$

Решение строим в виде

$$f(y, t) = [B_2(y) \sin kt + D_2(y) \cos kt] \exp(rt), \quad t \geq 0; \quad r < 0, \quad k \geq 0, \quad y \geq 0, \quad (3)$$

$$\frac{1}{\phi} \frac{d^2 B_2}{dy^2} = (1 + A^2)(B_2 r - D_2 k) + 2A_1 A \frac{dB_2}{dy}, \quad (4)$$

$$\frac{1}{\phi} \frac{d^2 D_2}{dy^2} = (1 + A^2)(B_2 k + D_2 r) + 2A_1 A \frac{dD_2}{dy}. \quad (5)$$

Начальные условия: $y = 0$, $B_2 = B_2^0$, $D_2 = D_2^0$, $(dB_2/dy) = B_2^1$, $(dD_2/dy) = D_2^1$.

В работе получено аналитическое решение системы (4), (5), позволившее рассмотреть возмущенное состояние (3) в окрестности вершины дендрита. На основе этого решения выполнено вычислительное моделирование колебаний и волн, сопровождающих эволюцию ФГК. Приведем некоторые результаты для никеля.

Корреляция «частота колебаний - параметр затухания». Рассмотрим следующие параметры начального состояния возмущенного носика дендрита: возмущение угла заострения $\delta\theta_1 = (\partial f / \partial y)_{y=0} = D_2^1$; возмущение кривизны $\delta K = (\partial^2 f / \partial y^2)_{y=0} = \phi(kB_2^0 + rD_2^0)$; возмущение угловой скорости касательной к линии роста $\delta\omega = (\partial^2 f / \partial y \partial t)_{y=0} = kB_2^1 + rD_2^1$; возмущение углового ускорения касательной к линии роста $\delta\epsilon = (\partial^3 f / \partial y \partial t^2)_{y=0} = 2krB_2^1 + (r^2 - k^2)D_2^1$. На рисунках 2, 3 для никеля на плоскости (r, k) построены изолинии перечисленных четырех возмущений.

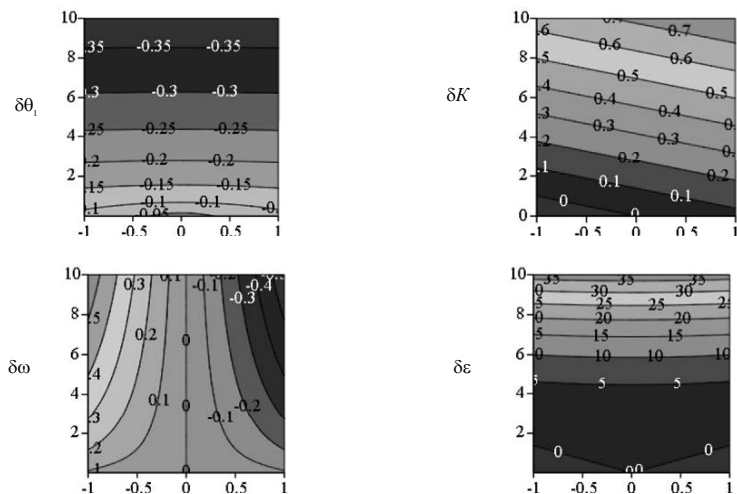


Рис. 2. Никель. Изолинии – на плоскости (r, k) - параметров начального состояния носика дендрита. Входные параметры: $\mu = 9,53 \text{ м/(К} \cdot \text{с)}$, $N = 5,3 \text{ м/с}$,

$$\alpha = 6.842 \cdot 10^5 (\text{К} \cdot \text{м})^{-1}, \phi = 7.18 \cdot 10^4 \text{ с/(м}^2\text{)}, D_2^0 = 0,1, B_2^0 = 0,1$$

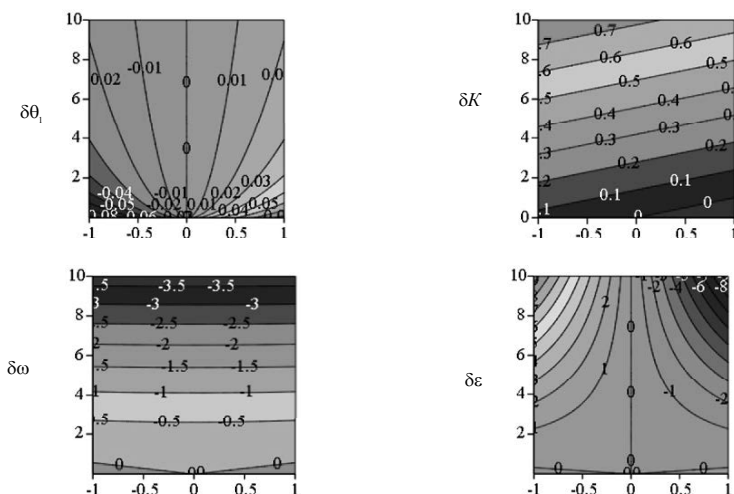
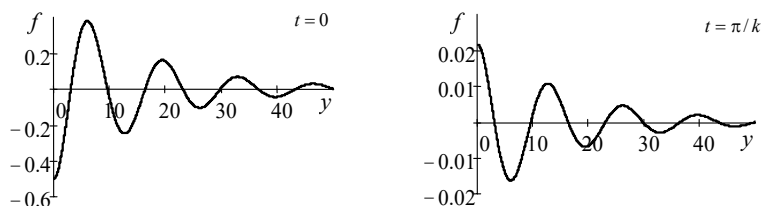


Рис. 3. Никель. Изолинии – на плоскости (r, k) – параметров начального состояния носика дендрита. Входные параметры: $\mu = 9,53 \text{ м/(К} \cdot \text{с)}$, $N = 5,3 \text{ м/с}$, $\alpha = 6.842 \cdot 10^5 \text{ (К} \cdot \text{м)}^{-1}$, $\phi = 7.18 \cdot 10^4 \text{ с/(м}^2\text{)}$, $D_2^0 = -0,1$, $B_2^0 = 0,1$

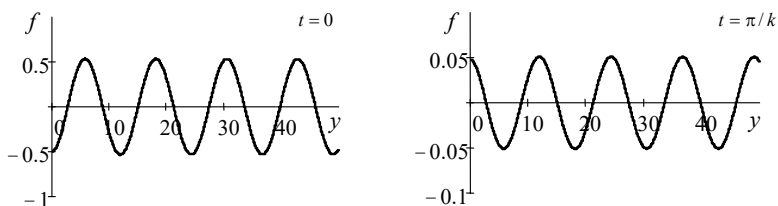
Расчеты выполнены при переохлаждении расплава $\Delta T = 166 \text{ К}$ при различающихся друг от друга начальных состояний носика (параметр D_2^0). Знак номера изолинии указывает направление эволюции возмущения. Структуры изолиний $\delta\omega = \text{const}$ и $\delta\epsilon = \text{const}$ весьма чувствительно реагируют на изменение знака параметра D_2^0 .

Пространственно-периодическая неоднородность линии роста. Изучение волнового режима (3)-(5) позволило определить свойства кривизны и скорости линии роста для аperiodического и периодического по времени возмущений вершины дендрита, рис.4. При фиксированных значениях параметра затухания r частота k колебаний по времени принципиальным образом влияет на характер поведения возмущения $f(y, t)$ по отношению к координате y . А именно: наблюдается последовательная смена режимов «периодический процесс затухания» - «гармонические колебания» - «резонансная неустойчивость».

$$\text{А) } r = -0,2, k = 0,2, D_2^0 = -0,5, B_2^0 = 0,5$$



$$\text{Б) } r = -0.2, k = 0.2674, D_2^0 = -0.5, B_2^0 = 0.5$$



$$\text{В) } r = -0.2, k = 0.34, D_2^0 = -0.5, B_2^0 = 0.5$$

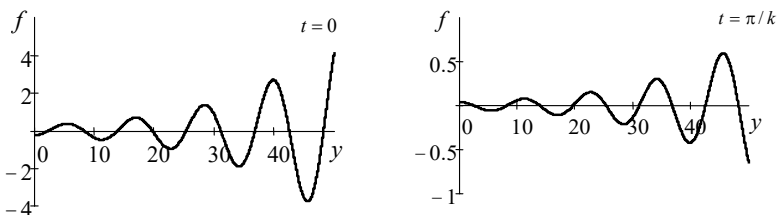


Рис. 4. Никель. Затухающий периодический (А), гармонический (Б) и неустойчивый по резонансному типу (В) режимы возмущения линии роста

Закключение. Изучено уравнение роста кристалла, содержащее информацию об отклонении температуры фазовой границы от ее равновесного значения и учитывающее неоднородность переохлаждения вдоль линии роста. Получены соотношения устойчивости начального состояния вершины дендрита, характеризующие взаимосвязь между режимом эволюции во времени линии роста и морфологическими свойствами возмущенной вершины. Вычислены скорости волн возмущения. Представлена структура изолиний параметров начального состояния носика дендрита. На вершине дендрита рассмотрены аperiodический и периодический по времени режимы возмущения скорости и кривизны ФГК. Обнаружено, что при росте частоты колебаний по времени происходит последовательная смена режимов возмущения по отношению к поперечной координате: «периодический процесс затухания» – «гармонические колебания» – «неустойчивость по резонансному типу». Даны оценки скорости волны, бегущих вдоль линии роста и возбуждающих боковую ветвь дендрита. Представлены результаты численных расчетов для чистого расплава никеля. Данная работа является продолжением исследования [7, 8].

Литература

1. Brener, E.A. Pattern selection in two-dimensional dendritic growth / E.A. Brener, V.I. Mel'nikov // *Advances in Physics*. – 1991. – Vol. 40. – №1. – P. 53–97.
2. Veenendaal, E. Simulation of crystal shape evolution in two dimensions / E. Veenendaal, A.J. Nijdam, J. Suchtelen // *Journal of Crystal Growth*. – 2002. – Vol. 235. – P. 603–618.

3. Mullis, A.M. Deterministic side-branching during thermal dendritic growth / A.M. Mullis // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 84. – 012071. – P. 1–9.
4. Glicksman, M.E. Capillary-mediated interface perturbations: Deterministic pattern formation / M.E. Glicksman // Journal of Crystal Growth. – 2016. – Vol. 450. – P. 119–139.
5. Шабловский, О.Н. Форма поверхности роста и предвестники ветвления дендрита в переохлажденном расплаве / О.Н. Шабловский, Д.Г. Кроль // Успехи прикладной физики. – 2018. – №4. – С. 316–24.
6. Шабловский, О.Н. Морфологические свойства линии роста двумерного дендрита в переохлажденном расплаве / О.Н. Шабловский // Прикладная физика. – 2012. – №4. – С. 40–46.
7. Шабловский, О.Н. Пространственно-временные неоднородности на фазовой границе высокоскоростной кристаллизации переохлажденного расплава / О.Н. Шабловский, Д.Г. Кроль // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные наук. – 2023. – №1. – С. 56–64.
8. Шабловский, О.Н. Параметры возмущенного состояния вершины дендрита в глубоко переохлажденных расплавах никеля и меди / О.Н. Шабловский, Д.Г. Кроль // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные наук. – 2024. – №1. – С. 60–68.

ОБНАРУЖЕНИЕ ОБЪЕКТОВ В ИЗОБРАЖЕНИЯХ ИНФРАКРАСНОГО СПЕКТРА С ПОМОЩЬЮ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Е.Ю. Щетинин

Финансовый Университет при Правительстве РФ, Москва

111123, Ленинградский пр.49

Tel.: (+7 499)972-42-55, e-mail: riviera-molto@mail.ru

TITLE OF PAPER ON METHODS OF OBJECT DETECTION IN INFRARED SPECTRUM IMAGES OBTAINED BY UNMANNED AERIAL VEHICLES

Shchetinin E.Yu.

Financial University, 111123, Moscow, Russia

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) нашли широкое применение в различных областях мониторинга, разведки, дистанционного контроля. Для успешного решения этих задач БПЛА оборудованы мобильными системами компьютерного зрения и ЭВМ. Получаемые с их помощью снимки видимого диапазона могут быть недостаточно качественными из-за погодных условий или низкой освещенности. Таким образом снимки инфракрасного спектра являются предпочтительным выходом. В статье представлена нейросетевая модель обнаружения малых объектов на изображениях инфракрасного спектра, полученных с помощью БПЛА. В основу архитектуры модели положена модель глубокого обучения YOLO5 и состоит из базового и промежуточного блоков, а также включает блок прогноза. Базовый блок создан на основе нейросетевой модели CSPDarknet-53 и предназначен для извлечения карт признаков из изображений на входе модели. Для описания промежуточного модуля предложено использовать нейронную сеть BI-FPN, формирующую пирамиду карт признаков входных изображений. В модуль прогноза предложено включить трансформер ViT, что позволило повысить точность распознавания, сохранив оптимальное количество параметров модели и вычислительные требования для мобильных систем машинного зрения. Проведенные численные эксперименты на наборе изображений в инфракрасном диапазоне HIT-UAV показали преимущества предложенной модели над такими моделями, как ResNet, Faster RCNN, DPNetV3. Компьютерные эксперименты показали, что модель способна обрабатывать изображения с точностью более 90%.

О ВЛИЯНИИ СЛАБЫХ ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

М.Н.Шипко^{1,*}, Т.П. Каминская² М.А. Степович³, Е.С. Савченко⁴, А.В. Стулов⁵

¹*153003, Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, ИГЭУ им. В.И. Ленина,
тел. (+7-910)668-75-65, эл. почта michael-1946@mail.ru

²119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ им. М.В. Ломоносова, д. 1, строение 2,
физический факультет, эл. почта ktp53@mail.ru

³248023, Калуга, ул. Степана Разина, д. 26, КГУ им. К.Э. Циолковского,
эл. почта m.stepovich@mail.ru

⁴119049, Москва Ленинский проспект, д. 4, МИСИС, эл. почта savchenkoelena@ya.ru
600016, Владимир, ул. Большая Нижегородская, д. 94, ⁵ООО «НПК «Автоприбор»,
эл. почта alxstl@mail.ru

Аннотация. Исследовано влияние импульсов слабого магнитного поля на аморфные сплавы, полученные методом спиннингования. Для фольги $\text{Fe}_{73}(\text{SiBNb})_{27}$ с добавкой 1 % Cu, обработанной импульсами слабого магнитного поля (10...100 кА/м) низкой частоты (10...20 Гц), обнаружен магнитный контраст: в результате воздействия импульсами слабого магнитного поля в исследуемом материале возникает доменная структура. Характер доменной структуры зависит от параметров магнитоимпульсной обработки. Полученные результаты указывают на возможность использования магнитоимпульсной обработки аморфных сплавов для управления их магнитными свойствами.

Ключевые слова: аморфные сплавы, слабое импульсное магнитное поле, доменная структура.

Введение

Качество значительного числа электротехнических устройств, работающих в гигагерцовом диапазоне, обеспечивается уровнем электромагнитных свойств ленточных аморфных сплавов, используемых в качестве магнитопроводов [1-3]. Высокий уровень магнитных свойств таких сплавов, их динамические характеристики, уровень удельных магнитных потерь во многом зависят от вида доменной структуры, ширины доменов, типа доменных границ, намагниченности насыщения.

Среди электротехнических сплавов особый интерес представляют аморфные материалы, полученные методом сверхбыстрого охлаждения при распылении расплава на вращающемся медном барабане. Ранее для таких материалов нами установлено, что с ростом напряжённости электрического поля возможно инициирование взрывной электронной эмиссии, которая обусловлена наличием на поверхности наночастиц оксидов с более высоким удельным сопротивлением [4]. Не менее важным является и изучение возможного влияния на структуру и свойства таких материалов различных внешних, в том числе и слабых внешних электромагнитных воздействий [5, 6]. В качестве примера на рис. 1 приведены петли магнитного гистерезиса аморфного сплава $\text{Al}_{85}\text{Fe}_7\text{Ni}_5\text{La}_3$, полученные нами до и после магнитоимпульсной обработки (МИО) [7].

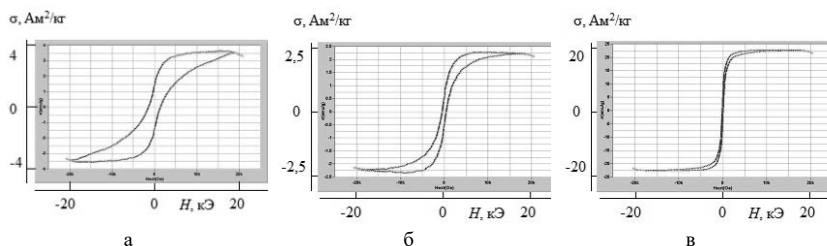


Рис. 1. Петли магнитного гистерезиса аморфного сплава $\text{Al}_{85}\text{Fe}_7\text{Ni}_5\text{La}_3$, полученные с использованием вибрационного магнитометра, в исходном состоянии (а) и после магнитоимпульсной обработки 10 (б) и 30 (в) импульсами [7].

В результате МИО аморфной фольги сплава $\text{Al}_{85}\text{Fe}_7\text{Ni}_5\text{La}_3$ происходит уменьшение магнитоупругой энергии [8] и, как следствие, снижение уровня наведенной анизотропии, что отчетливо прослеживается на изменении формы и параметров соответствующих петель магнитного гистерезиса.

Несмотря на тот факт, что до сих пор отсутствует полное понимание взаимосвязи доменной структуры с высокочастотными свойствами аморфных сплавов, определение такой связи для указанных материалов является принципиальным. А в силу того, что эксплуатационные характеристики таких сплавов во многом определяются локальными свойствами, изучение влияния слабых внешних электромагнитных полей на их магнитные свойства с нанометровым разрешением (см. [9-11] и литературу там же) является весьма перспективным, что и составляет предмет рассмотрения настоящей работы. В качестве объекта исследований выбраны аморфные сплавы $\text{Fe}_{73}(\text{SiBNb})_{27}$ и такие же сплавы с добавкой 1% Cu.

Материалы и методы

Изучены образцы аморфной электротехнической стали (фольги), которые представляли собой ленту толщиной около 100 мкм, шириной 45 мм. Фольга была получена методом сверхбыстрого охлаждения при распылении расплава на вращающемся медном барабане. Исследовались неотожжённые аморфные сплавы состава $\text{Fe}_{73}(\text{SiBNb})_{27}$ и такие же сплавы с добавкой 1% Cu, влияющей на процесс кластеризации в процессе последующего термического отжига [12].

Для магнитоимпульсной обработки (МИО) использовались импульсы магнитного поля амплитудой $(5-8) \cdot 10^3 \text{ A} \cdot \text{м}^{-2}$, длительностью (0,1-0,5) с с интервалом между импульсами (1-2) с; количество импульсов составляло 10-40 – см. [4, 11, 13] и литературу там же.

Локальные свойства поверхности фольги исследовались по стандартной двухпроходной методике [14, 15] с использованием сканирующего зондового микроскопа SMENA-A, платформа «Solver» (NT-MDT, РФ, г. Зеленоград, Москва).

Магнитные параметры фольги измеряли по стандартной методике на вибрационном магнитометре VSM250 в магнитном поле 20 кЭ.

Результаты и обсуждение

Сторона фольги, не прилегающая к медному барабану, т.н. свободная поверхность, имела ровную и блестящую на вид поверхность. Другая поверхность

образцов, прилежавшая к медному барабану, т.н. контактная поверхность, имела шероховатую, характерную для всех быстрозакалённых образцов, структуру, вследствие чего визуально эта поверхность фольги казалась матовой. Отметим, что характер свободной поверхности аморфных сплавов состава $\text{Fe}_{73}(\text{SiBNb})_{27}$ и сплавов с добавкой 1% Cu при сканировании методами сканирующей зондовой микроскопии участков от 50х50 мкм и более, имели во многом одинаковую структуру, и далее для таких материалов имеющиеся различия в составах отмечаться не будут. А имеющиеся неровности на контактной поверхности фольги провести её изучение методами сканирующей зондовой микроскопии не позволили. Исследования аморфной фольги $\text{Fe}_{73}(\text{SiBNb})_{27}$ и сплавов с добавкой 1% Cu до МИО наличия магнитного контраста не выявило.

После МИО фольги аморфных сплавов состава $\text{Fe}_{73}(\text{SiBNb})_{27}$ с добавкой 1% Cu был выявлен магнитный контраст. Так, на рис. 1 представлены результаты таких исследований после воздействия импульсами слабого магнитного поля.

При воздействии 20 импульсами чёткой доменной структуры выявлено не было. А при воздействии 30 импульсами были выявлены преимущественно крупные полукруглые домены шириной 20-30 мкм, которые могут быть частью динамических концентрических кольцевых доменов с частично наложенными на них фингерпринтными, либо спиральными доменами (рис. 2в). Наблюдалось также дробление (расхождение) концентрических доменов на фингерпринтные в некоторых местах поверхности фольги (рис. 2г).

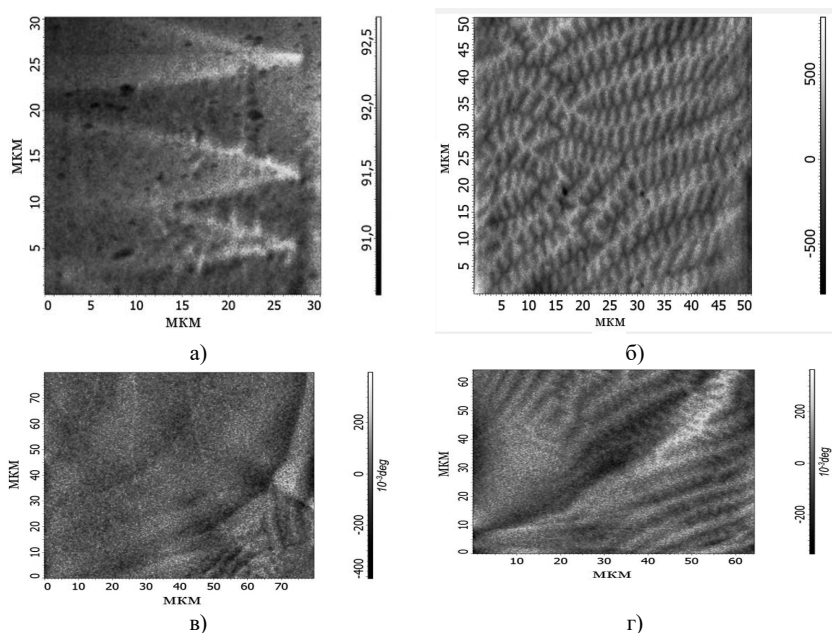


Рис. 2. Различные участки свободной поверхности ленточного аморфного сплава $\text{Fe}_{73}(\text{SiBNb})_{27}$ с добавкой 1% Cu, полученные методом магнитной зондовой микроскопии, после МИО: а – 40 импульсами; б – 10 импульсами, в, г – 30 импульсами.

Обнаруженные особенности в изменении доменной структуры аморфных сплавов после их МИО коррелируют с изменением их магнитных свойств. Наиболее заметные изменения наблюдались для магнитных параметров, связанных с магнитной анизотропией сплавов: коэрцитивной силой и коэффициентом прямоугольности петли магнитного гистерезиса. А на изображениях, полученных в сканирующем зондовом микроскопе, отчетливо проявляется упорядоченное распределение областей сжатия, обеспечивающихся особенностями локализации атомов меди. В результате доменная структура демонстрирует магнитную анизотропию, что приводит к затруднению движения доменных границ, проявляющихся на кривой намагничивания. Однако МИО сплава способствует снижению анизотропии, связанной с уменьшением внутренних напряжений и напряжений, обусловленных состоянием поверхности. В результате после МИО сплава наблюдается значительное (до 17%) уменьшение коэрцитивной силы и появление при малых длительностях обработки специфической доменной структуры, напоминающей структуру fingerprints. Наличие такой доменной структуры усложняет процесс намагничивания, однако увеличение длительности МИО сплава способствует снятию напряжений.

Заключение

Добавка 1% меди в аморфный сплав $\text{Fe}_{73}(\text{SiBNb})_{27}$ вносит определенный вклад в развитие химической и топологической неоднородности сплава. На изображениях, полученных в сканирующем зондовом микроскопе, отчетливо проявляется упорядоченное распределение областей сжатия, обеспечивающихся особенностями локализации атомов меди. В результате доменная структура демонстрирует магнитную анизотропию, что приводит к затруднению движения доменных границ. МИО такого сплава способствует снижению анизотропии, связанной с уменьшением внутренних напряжений и напряжений, обусловленных состоянием поверхности. В результате после МИО сплава при малых длительностях обработки наблюдается появление специфической доменной структуры, напоминающей структуру fingerprints. Предполагается, что наличие такой доменной структуры может усложнять процесс намагничивания, а увеличение длительности МИО сплава может способствовать снятию напряжений.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и Правительства Калужской области № 23-21-10069, <https://rscf.ru/project/23-21-10069/>.

Литература

1. Глезер А.М., Молотилев Б.В. Структура и механические свойства аморфных сплавов. – М., Металлургия, 1992. 207 с.
2. Стародубцев Ю.Н., Белозеров В.Я. Магнитные свойства аморфных и нанокристаллических сплавов. – Екатеринбург, Издательство Уральского университета, 2002. 376 с.
3. Стогней О.В. Физика аморфных металлических сплавов. Учебное пособие. – Воронеж, 2007. 139 с.
4. Шипко М.Н., Тихонов А.И., Степович М.А., Вирус А.А., Каминская Т.П., Коровушкин В.В., Савченко Е.С., Еремин И.В. Влияние магнитоимпульсной обработки на микроструктуру и магнитные свойства аморфной электротехнической

- стали // Известия РАН. Серия физическая. 2018. Т. 82. № 8. С. 1090-1095. DOI: 10.1134/S0367676518080379.
5. Постников В.В. Фазовые и структурные превращения в диамагнитных материалах после воздействия слабых магнитных полей. Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. – Воронеж, Воронежский государственный университет, 2004. 338 с.
 6. Волчков И.С. Воздействие слабых магнитных полей на реальную структуру и свойства полупроводниковых кристаллов CdTe(Cl) и CdTe(Cl, Fe). Дис. ... канд. физ.-мат. наук. – М., Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН, Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук, 2020, 139 с.
 7. Viryus A.A., Kaminskaya T.P., Shipko M.N., Bakhteeva N.D., Korovushkin V.V., Savchenko A.G., Stepovich M.A., Savchenko E.S. and Todorova E.V. Microscopic research of amorphous alloys AlFeNiLa exposed to magnetic pulse processing // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 848. – Art. No. 012085. (5 p.). ISSN 17578981, 1757899X. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/848/1/012085>.
 8. Yamamoto R., Matsuoka H., Doyama M. Structural Relaxation of the Dense Random Packing Model for Amorphous Iron // Phys. Stat. Sol. (a). 1978. Vol. 45. Issue 1. P. 305-314. <https://doi.org/10.1515/9783112480700-036>.
 9. Шипко М.Н., Степович М.А., Сибирев А.Л., Тихонов А.И., Савченко Е.В., Каминская Т.П. Влияние магнитоимпульсной обработки на состояние поверхности, эмиссионные и магнитные свойства аморфных магнитных сплавов // Известия РАН. Серия физическая, 2021, т. 85, № 11, с. 1528-1531. DOI: 10.31857/S0367676521110351.
 10. Альшиц В.И., Даринская Е.В., Колдаева М.В., Петржик Е.А. Магнитопластический эффект: основные свойства и физические механизмы. // Кристаллография, 2003, т. 48, № 5, с. 826-854.
 11. Каминская Т.П., Коровушкин В.В., Попов В.В., Шипко М.Н., Степович М.А. Атомная силовая микроскопия сплавов Fe₃(SiAl), подвергнутых магнитоимпульсной обработке // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2014, № 12, с.26-30. DOI: 10.7868/S0207352814120117.
 12. Gupta P. Gupta A., Shukla A. Ganguli Tapas, Sinha A.K., Principi G., Maddalena A. Structural evolution and the kinetics of Cu clustering in the amorphous phase of Fe-Cu-Nb-Si-B alloy // J. Appl. Phys., 2011, vol. 110, issue 3, art. no. 033537. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3622325>.
 13. Шипко М.Н., Каминская Т.П., Степович М.А. Вирюс А.А., Тихонов А.И. О влиянии магнитоимпульсной обработки на структуру поверхности и магнитные свойства ленточных аморфных сплавов Fe(Ni, Cu)(SiB). // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2023, № 2, с. 17–22. DOI: 10.31857/S1028096023020103, EDN: DSUDDZ.
 14. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. Учебное пособие для студентов старших курсов высших учебных заведений. – Нижний Новгород, Институт физики микроструктур РАН, 2004. 114 с.
 15. Meyer Ernst, Hug Hans Josef, Bennewitz Roland. Scanning Probe Microscopy. The Lab on a Tip. –Berlin, Heidelberg: Springer, 2004. 210 p.

НОВОЕ О ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ТРАЕКТОРИЯХ ЧАСТИЦ: «НЕЛИНЕЙНЫЙ ТРЕУГОЛЬНИК ПАСКАЛЯ» И «МЕТЛА ЮРКИНА»

А. В. Юркин

К.ф.-м.н., бывший старший научный сотрудник Института общей физики РАН,
пенсионер. Россия, Московская область, 142290, Пущино, Д-20, -56.

Тел: 8(985)388-75-90, e-mail: alv11yurkin@rambler.ru

В этой работе мы исследуем почти забытую тему о движении частиц. Более 2000 лет назад проблема о движении частиц (атомов) была поднята еще в Древней Греции Эпикуром [1], а затем в Древнем Риме Лукрецием [2]. В Новое время этой проблемой занимался Декарт [3].

Описание мало-углового рассеяния света, основанного на рассмотрении цепей Маркова, дано в книге [4].

Мы снабдили широкоапертурный лазер [5], многолепестковым зеркалом [6], в котором полупрозрачные пластины наклонены на малые углы к оси лазера и развернуты вокруг оси.

В работе [7] была предложена новая система лучей не обязательно для лазерного резонатора. Позже профессор В. Михалевич назовет эту наглядную геометрическую модель «Метла Юркина».

В данной работе представлена новая классификация траекторий движения условно крупных, средних и мелких частиц в реальной рассеивающей среде.

В основе нашей работы лежит главный принцип геометрического подхода, представленный еще Феликсом Клейном: «Как известно, все пространственные измерения сводятся к двум основным задачам: *к определению расстояния между двумя точками и к определению угла между двумя пересекающимися прямыми...*» [8].

В данной работе, под термином «прямолинейное» движение частицы, понимается квазипрямолинейное или почти прямолинейное движение частицы. Траектория такой частицы прямолинейна, но допускаются отклонения при движении на малые углы δ , при которых $\sin \delta \approx \delta$, или углы $k\delta$, при которых $\sin k\delta \approx k\delta$, где k — действительное число. Под термином «нелинейная траектория» длины L , понимается криволинейная или прямолинейная траектория, состоящая из многих прямолинейных участков (лучей) одинаковой или различной длины l .

1. «Прямолинейное» движение частиц различных размеров с постоянной скоростью в реальной среде

На Рис. 1 показаны траектории движения частиц различных размеров с постоянной скоростью:

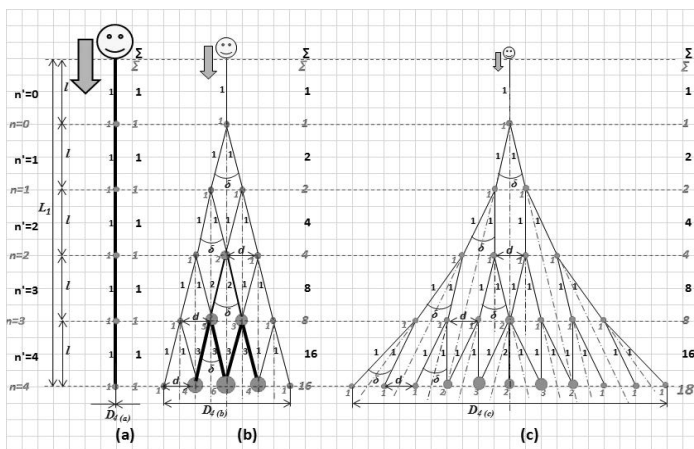


Рис. 1. Траектории движения частиц различных размеров с постоянной скоростью. Прямолинейное движение крупной частицы с постоянной скоростью (а), «прямолинейное» движение частицы средних размеров с постоянной скоростью (b), «прямолинейное» движение малой частицы с постоянной скоростью (с). Некоторые точки ветвления лучей накладываются друг на друга. Точки ветвления показаны красными кружочками разного диаметра в соответствии с их весовыми коэффициентами (показаны красными числами). Некоторые лучи тоже накладываются друг на друга. Лучи показаны черными линиями разной толщины в соответствии с их весовыми коэффициентами (показаны черными цифрами). Малые углы δ ветвления (бифуркации) лучей везде приблизительно одинаковые. Длины l лучей везде приблизительно одинаковые. Расстояния d между точками ветвления лучей везде приблизительно одинаковые, n - номера итераций для точек ветвления, n' - номера итераций для лучей.

Нам пришлось вводить разные обозначения итераций для самих лучей n' и точек ветвления лучей n , так как они сдвинуты друг относительно друга на длину l . Автор просит у читателя извинения за столь сложный рисунок. В дальнейшем, вместо n и n' , мы будем обозначать в тексте номер итерации просто как n .

Для удобства читателя, показана сетка в программе MS Excel. Для всего рисунка (для всех итераций) каждая ячейка сетки имеет одинаковые размеры: высота строки 16, ширина столбца 2.

1.1. На Рис. 1а изображено обычное прямолинейное движение крупной частицы с постоянной скоростью в соответствии с первым законом Ньютона. Расщепления траекторий не происходит.

1.2. На Рис. 1b изображено «прямолинейное» движение частицы средних размеров с постоянной скоростью, по принципу прямолинейного треугольника Паскаля [9]. После каждой итерации n траектории расщепляются надвое на малый угол δ . Боковые грани этого треугольника Паскаля являются прямыми линиями. Осями симметрии для всех элементов (расщепляющихся траекторий) этого треугольника являются вертикали.

1.3. На Рис. 1с изображено «прямолинейное» движение малой частицы с постоянной скоростью, по принципу «Нелинейного треугольника Метлы Юркина». Боковые грани этого треугольника Метлы Юркина являются кривыми линиями,

вогнутыми внутрь. После каждой итерации n , траектории расщепляются надвое на малый угол δ . Осями симметрии для всех элементов (расщепляющихся траекторий) при итерации $n + 1$ этого треугольника являются продолжение предыдущего элемента (траектория до расщепления) при итерации n .

2. «Прямолинейное» движение частиц различных размеров с замедлением в реальной среде

На Рис. 2 показаны траектории движения частиц различных размеров с замедлением:

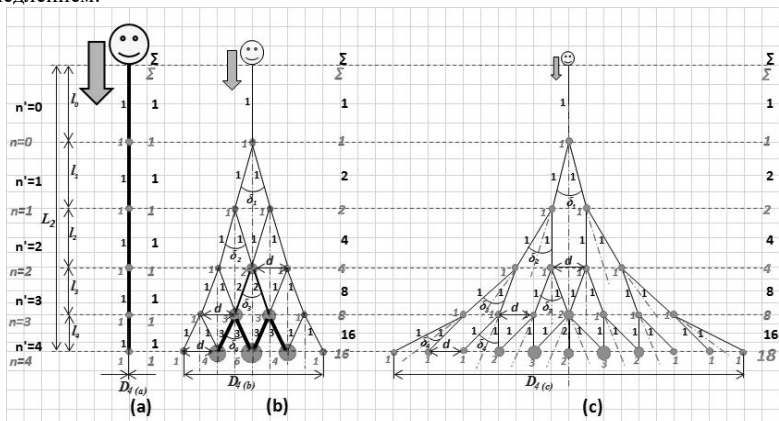


Рис. 2. Траектории движения частиц различных размеров с замедлением. Этот рисунок во многом аналогичен Рис. 1. Для удобства читателя, показана сетка в программе MS Excel. Для итерации $n = 0$ высота стоки 16, для итерации $n = 1$ высота стоки 14, для итерации $n = 2$ высота стоки 12, для итерации $n = 3$ высота стоки 10, для итерации $n = 4$ высота стоки 8. Ширина столбцов для всех итераций 2.

Рисунок, изображенный на Рис. 1, автоматически превращается в рисунок, изображенный на Рис. 2 при введении вышеописанных параметров высоты строк в программе MS Excel.

2.1. На Рис. 2а изображено обычное прямолинейное движение крупной частицы с замедлением. Для упрощения схемы на Figure 2a движение частицы подчиняется линейному закону замедления. Расщепление траектории не происходит. Можно отобразить на аналогичной схеме замедление, которое подчиняется не только линейному, но и квадратичному, кубическому и т. п. законам.

2.2. На Рис. 2b изображено «прямолинейное» движение частицы средних размеров с замедлением, по принципу «Нелинейного треугольника Паскаля». Боковые грани этого треугольника Паскаля вогнуты внутрь. После каждой итерации n траектории расщепляются надвое на малые углы δ_n . Осями симметрии для всех элементов этого треугольника являются вертикали. Можно отобразить на аналогичной схеме замедление, которое подчинится не только линейному, но и другим законам.

2.3. На Рис. 2с изображено «прямолинейное» движение малой частицы с замедлением, по принципу «Нелинейного треугольника Метлы Юркина». Боковые грани этого треугольника Метлы Юркина являются кривыми линиями, вогнутыми внутрь больше, чем на Рис. 1с. После каждой итерации n , траектории расщепляются надвое на малый угол δ_n . Осями симметрии для всех элементов (расщепляющихся

траекторий) при итерации $n + 1$ этого треугольника являются продолжение предыдущего элемента (траектория до расщепления) при итерации n . Можно отобразить на аналогичной схеме замедление, которое подчиняется не только линейному, но и другим законам.

3. «Прямолинейное» движение частиц различных размеров с ускорением в реальной среде

На Рис. 3 показаны траектории движения частиц различных размеров с ускорением:

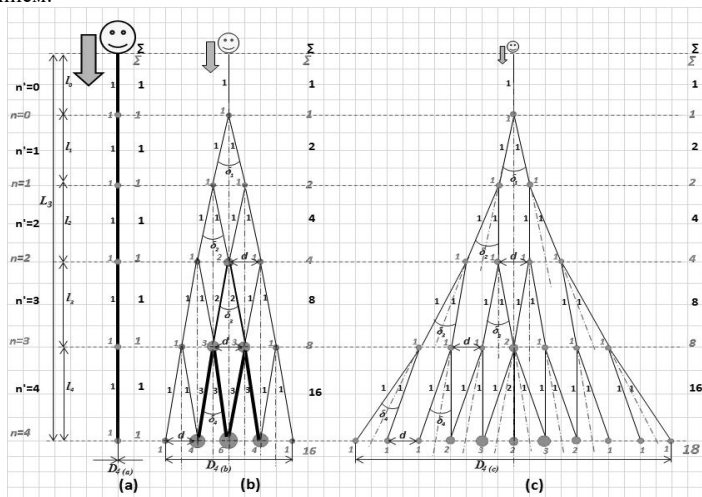


Рис. 3. Траектории движения частиц различных размеров с ускорением. Этот рисунок во многом аналогичен Рис. 1 и 2.

Для удобства читателя, показана сетка в программе MS Excel. Для итерации $n = 0$ высота стоки 16, для итерации $n = 1$ высота стоки 18, для итерации $n = 2$ высота стоки 20, для итерации $n = 3$ высота стоки 22, для итерации $n = 4$ высота стоки 24. Ширина столбцов для всех итераций 2.

Рисунок, изображенный на Рис. 1 или на Рис. 2, автоматически превращается в рисунок, изображенный на Рис. 3 при введении вышеописанных параметров высоты строк в программе MS Excel.

3.1. На Рис. 3а изображено обычное прямолинейное движение крупной частицы с ускорением. Для упрощения схемы на Рис. 3а движение частицы подчиняется линейному закону ускорения. Расщепление траектории не происходит. Можно отобразить на аналогичной схеме ускорение, которое подчиняется не только линейному, но и другим законам [10].

3.2. На Рис. 2б изображено «прямолинейное» движение частицы средних размеров с ускорением, по принципу «Нелинейного треугольника Паскаля». Боковые грани этого треугольника Паскаля выгнуты наружу. После каждой итерации n траектории расщепляются надвое на малые углы δ_n . Осями симметрии для всех элементов этого треугольника являются вертикали. Можно отобразить на аналогичной схеме ускорение, которое подчиняется не только линейному, но и другим законам.

3.3. На Рис. 3с изображено «прямолинейное» движение малой частицы с ускорением, по принципу «Нелинейного треугольника Метлы Юркина». Боковые грани

этого треугольника Метлы Юркина, являются кривыми линиями, вогнутыми внутрь, но меньше, чем на Figure 2с и Figure 1с. После каждой итерации n , траектории расщепляются надвое на малый угол δ_n . Осями симметрии для всех элементов (расщепляющихся траекторий) при итерации $n + 1$ этого треугольника являются продолжение предыдущего элемента (траектория до расщепления) при итерации n . Можно отобразить на аналогичной схеме ускорение, которое подчиняется не только линейному, но и другим законам.

В новой классификации траекторий мы свели движение частиц к 9 основным случаям. Мы надеемся, что наши исследования помогут решить проблему получения Управляемого Термоядерного Синтеза [10,11] в стеллараторах и токамаках. Мы также надеемся, что наши наглядные геометрические модели помогут лучше понять процессы в ускорителях и коллайдерах частиц, а также в других областях науки и техники, например, в космологии [12] или в биологии [13].

Литература

1. Дынник М (1955). Материалисты Древней Греции. Эпикур. (Москва, Госиздат) Стр. 181 – 191.
2. Голин Г, Филонович С (1989). Классики физической науки. (С древнейших времен до начала XX в.) (Москва, Высшая школа) Стр. 14.
3. Декарт Р (1989). Мир, или трактат о свете. Глава 7. О законах природы этого мира. (Москва, Мысль) Т. 1. Стр. 199 – 206.
4. Рытов С (1976). Введение в статистическую радиофизику. Часть 1. Параграф 30. (Москва, Наука) Стр.192 – 197.
5. Ананьев Ю (1990). Оптические резонаторы и лазерные пучки. (Москва, Наука) Стр. 204.
6. Юркин А (1990). Зеркало лазерного резонатора Юркина. Патент 1777656 СССР, приоритет от 26.06.90, БИ No 43, 202 (1992)
7. Yurkin A (1995). System of rays in lasers and a new feasibility of light coherence control. *Optics Communications*. 114. Pp. 393–398
8. Клейн Ф (1956). О так называемой неевклидовой геометрии. В книге Об основаниях геометрии (Москва, Госиздат) Стр. 258
9. Колмогоров А, Журбенко, Прохоров А (1995). Введение в теорию вероятности. (Москва, Наука)
10. Орир Дж (1981). Физика. (Москва, Мир) Т.1. Стр. 32, 70. Т.2. Стр. 544. 568
11. Сивухин Д (1989). Атомная и ядерная физика. Часть 2 Ядерная физика. (Москва, Наука) Стр. 288, 354, 369
12. Yurkin A (2019). Linear and Nonlinear Random Walks in 1d, 2d and 3d Space. *Global J Astrol Applied Phys*. 2019; v. 1, No 1: 1001.
13. Tozzi A, Yurkin A, Peters J (2021). A Geometric Milieu Inside the Brain. *Foundations of Science*. <https://doi.org/10.1007/s10699-021-09798-x> onlineservice@springernature.com.

МЕТОД ГОМОТОПНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ВОЛНОВОГО УРАВНЕНИЯ С НЕЛОКАЛЬНЫМИ МЛАДШИМИ ЧЛЕНАМИ

О.Э. Яремко, К.Р. Забабурин

МГТУ “СТАНКИН”, Москва, Россия
127055, Вадковский переулок, 3а

Тел.: (+7 499)972-42-55, e-mail: yareмки8@gmail.com

zababurinkir@gmail.com

Аннотация. Идея гомотопного анализа при решении многоточечных задач Коши для уравнений математической физики реализована методом операторов преобразования. Решение задачи Коши с нелокальными членами представляется суммой ряда, слагаемые которого есть решения модельных задач Коши, взятые с определенными весами. Нелокальная задача Коши погружается в однопараметрическое или многопараметрическое семейство краевых задач. Это семейство в предельных случаях содержит в себе задачу Коши для уравнения с нелокальными членами. Найдено решение задач Коши для уравнения колебаний струны с нелокальным членом. Получена новая формула для решения уравнения Клейна-Гордона.

Ключевые слова. Нелокальные задачи Коши, гомотопный анализ, оператор преобразования Пуассона, уравнение Клейна-Гордона.

Математические модели, возникающие при исследовании ряда прикладных задач, приводят к необходимости решения нелокальной краевой задачи для уравнений математической физики. Одним из источников задач с нелокальными членами для уравнений в частных производных были работы А.В. Лыкова [6], посвященные моделированию процессов тепломассообмена. Метод гомотопического анализа [3] представляет собой полуаналитический метод решения уравнений в обыкновенных или частных производных. Метод гомотопического анализа использует концепцию гомотопии из топологии для создания решения сходящегося ряда. Это становится возможным благодаря использованию гомотопического ряда Маклорена. Метод гомотопного анализа [3] удобен для построения операторов преобразования [2, 5]. Метод операторов преобразования дополненный идеями гомотопического анализа применяется к решению уравнения колебаний струны с нелокальным членом.

Рассмотрим однопараметрическое семейство задач Коши на действительной оси

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \beta au(x+h, t), \quad x \in R^1, \quad 0 < t < T, \\ u(x, 0) &= u_0(x), \quad x \in R^1, \\ u'_t(x, 0) &= u_1(x), \quad x \in R^1,\end{aligned}\tag{1}$$

где параметр $\beta \in [0, 1]$. При $\beta = 0$ получаем задачу Коши для уравнения колебаний струны, а при $\beta = 1$ получаем задачу Коши для функционально-дифференциального уравнения с нелокальными младшими членами. Концепция гомотопного анализа предполагает поиск решения задачи (1) в виде суммы ряда Тейлора по степеням параметра β

$$u(x, t) = \sum_{j=0}^{\infty} u_j(x, t) \beta^j.$$

Подставим ряд в функционально-дифференциальное уравнение (1) и приравняем коэффициенты при одинаковых степенях β . В результате имеем последовательность неоднородных задач Коши для уравнения колебаний струны

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + a u_{j-1}(x+h, t), x \in R^1, 0 < t < T, j=1, 2, \dots \\ u_j(x, 0) &= 0, x \in R^1, u'_x(x, 0) = 0, x \in R^1. \end{aligned} \quad (2)$$

Обозначим через $u_0(x, t)$ невозмущенное решение задачи (1) т.е. при $a = 0$. Функция $u_0(x, t)$ находится по формуле Даламбера

$$u_0(x, t) = \frac{u_0(x+t) + u_0(x-t)}{2} + \int_0^t \frac{u_1(x+\tau) + u_1(x-\tau)}{2} d\tau.$$

Методом математической индукции доказывается, что решения системы задач Коши (11) связаны рекуррентными формулами

$$u_j(x, t) = \frac{at}{2^j} \int_0^t u_{j-1}(x+h, \tau) d\tau, j=1, 2, 3, \dots$$

Из приведенной рекуррентной формулы следует явное выражение для слагаемого $u_j(x, t)$ через $u_0(x, t)$

$$u_j(x, t) = \frac{a^j t}{2^j j!} \int_0^t \frac{(t^2 - \tau^2)^{j-1}}{(j-1)!} u_0(x+hj, \tau) d\tau, j=1, 2, 3, \dots$$

Следовательно, при $\beta = 1$ получим формулу для решения задачи Коши (1)

$$u(x, t) = u_0(x, t) + \sum_{j=1}^{\infty} \frac{a^j t}{2^j j!} \int_0^t \frac{(t^2 - \tau^2)^{j-1}}{(j-1)!} u_0(x+hj, \tau) d\tau. \quad (3)$$

Следствия:

- при $h = 0$ получаем новую формулу для решения линейного уравнения Клейна-Гордона [4],
- решение задачи Коши (1) в терминах операторов преобразования Пуассона P_{ν} из [1] имеет вид:

$$u(x, t) = u_0(\tau, x) + \sum_{j=1}^{\infty} \frac{a^j t^{2j} (2j-1)!}{2^{2j} j! (j-1)!^2} P_{\nu-\frac{1}{2}} [u_0(x+hj, t)],$$

при этом оператор Сонина $P_{\nu-\frac{1}{2}}[f]$ действует по переменной t :

$$P_\nu[f] = \frac{1}{\Gamma(\nu+1)2^\nu t^{2\nu}} \int_0^t (t^2 - \tau^2)^{\nu-\frac{1}{2}} f(\tau) d\tau,$$

- решения в виде бесконечного ряда, содержащее произвольную функцию $u_0(x)$ пространственной переменной x :

$$u(x, t) = \sum_{j=0}^{\infty} \frac{t^{2j}}{(2j)!} \sum_{m=0}^{m=j} \binom{j}{m} a^m u_0(x + hm).$$

Литература

1. Carroll R. Transmutation Theory and Applications. North Holland, 1986.
2. Gilbert R., Begehr H. Transformations, Transmutations and Kernel Functions. Vol. 1,2.– Longman, Pitman, 1992.
3. Liao, S.J. Beyond Perturbation: Introduction to the Homotopy Analysis Method, Boca Raton: Chapman and Hall/ CRC Press, 2003.
4. Polyanin, A. D., Handbook of Linear Partial Differential Equations for Engineers and Scientists, Chapman & Hall/CRC, 2002.
5. Yaremko O.E. Transformation operator and boundary value problems, Differential Equation, Vol.40, N0.8, 2004, pp.1149–1160.
6. Лыков А. В. Тепломассообмен: (Справочник). 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ДИСПЕРСНОЙ СРЕДЫ НА АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

М.Р. Палванов

ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН, Москва, Россия
127055, Вадковский переулок, 3а
e-mail: m.palvanov@stankin.ru

Аннотация

В данной работе рассмотрено влияние структуры дисперсной среды на её акустические характеристики. Проанализированы ключевые структурные параметры, такие как размер, форма, концентрация и пространственное распределение частиц дисперсной фазы. Показано, что изменения в структуре среды существенно влияют на скорость распространения звука, уровень затухания акустических волн и характер их рассеяния. Особое внимание уделено рассмотрению механизмов взаимодействия звуковых волн с неоднородностями и агрегатами частиц. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации методов акустической диагностики дисперсных систем и разработки новых технологических решений в области контроля сложных материалов.

Ключевые слова: дисперсная среда, акустические характеристики, структура среды, звуковые волны, рассеяние звука, затухание, скорость звука, агрегирование частиц, резонансные эффекты, неоднородности.

Изучение распространения звуковых волн в дисперсных средах представляет собой важную задачу современной акустики и материаловедения. Дисперсные среды состоят из двух или более фаз, одна из которых равномерно или неравномерно распределена в другой. Характеристики этих сред во многом определяются их внутренней структурой, включая размеры, форму, концентрацию частиц и их пространственное распределение. Понимание влияния структуры дисперсной среды на акустические свойства необходимо для разработки новых методов диагностики, проектирования материалов с заданными свойствами и анализа процессов в природных и технических системах.

Акустические свойства дисперсных сред существенно отличаются от свойств сплошных однородных материалов. В частности, такие среды могут обладать повышенным затуханием, изменённой скоростью распространения звука и особыми механизмами рассеяния и поглощения звуковой энергии.

Основными характеристиками, определяющими акустические свойства дисперсной среды, являются:

- *Размер частиц:* мелкие частицы вызывают рассеяние звука в режиме Рэлея, крупные — в режиме геометрической акустики.
- *Форма частиц:* отклонение от сферической формы приводит к анизотропии акустических свойств.
- *Концентрация:* с ростом объёмной доли дисперсной фазы увеличивается затухание и изменяется скорость звука.
- *Агрегирование:* образование кластеров или агломератов меняет характер рассеяния и поглощения звука.
- *Распределение частиц:* наличие упорядоченных или случайных структур влияет на дисперию акустических волн.

Для описания распространения звука в дисперсной среде применяются различные модели, в зависимости от концентрации и размеров частиц. При низких концентрациях можно использовать приближённые формулы эффективной среды.

Например, эффективная скорость звука c_{eff} в среде может быть приближённо выражена через скорости звука в фазах c_1 и c_2 , а также их объёмные доли ϕ :

$$\frac{1}{c_{eff}^2} = \frac{\phi}{c_2^2} + \frac{1-\phi}{c_1^2}.$$

Потери звуковой энергии на рассеяние в режиме Рэлея можно описать зависимостью:

$$\alpha_{scat} = \phi a^3 \omega^4,$$

где α_{scat} – коэффициент затухания на рассеяние, a – радиус частиц, ω – угловая частота звуковой волны.

При более высоких концентрациях требуется учитывать коллективные эффекты взаимодействия волн, возникающие нелинейности и возможные резонансные явления.

Изменение структуры приводит к вариациям эффективной массы и упругости среды, что непосредственно влияет на скорость распространения звука. При увеличении концентрации тяжёлых включений скорость звука обычно уменьшается.

Основными механизмами затухания являются:

- вязкое поглощение на границах фаз;
- теплопроводность между фазами;
- рассеяние на неоднородностях.

Чем больше неоднородностей и их размеры ближе к длине волны, тем выше уровень затухания. В некоторых случаях затухание описывается законом:

$$\alpha \sim f^n.$$

где α — коэффициент затухания, f — частота, n — показатель, зависящий от механизма взаимодействия (обычно $1 \leq n \leq 2$).

При высоких амплитудах звуковых волн или вблизи резонансных частот возможны нелинейные явления, включая:

- усиление затухания;
- появление гармоник;
- образование акустических солитонов.

Структура среды (например, наличие крупных агрегатов) может способствовать развитию критических эффектов, приводящих к резкому изменению акустических характеристик.

Заключение

Структура дисперсной среды оказывает определяющее влияние на её акустические свойства. Изменяя размеры, форму, концентрацию и пространственное распределение частиц, можно целенаправленно изменять скорость распространения звука, уровень затухания и характер рассеяния звуковых волн. Теоретическое и экспериментальное изучение этих эффектов позволяет создавать материалы с заданными акустическими характеристиками и развивать методы неразрушающего контроля в различных отраслях науки и техники.

Список литературы

1. Гусев В.Г., Жарков Д.В. «Расчёт поверхностных акустических волн в системах с вязкой жидкостью и твёрдым полупространством» // Акустический журнал. Т. 68, № 6, 2022 г. – Режим доступа: URL: <https://sciencejournals.ru/view->

- [article/?a=Akust2206004Gusev&j=akust&n=6&v=68&y=2022](https://cyberleninka.ru/article/?a=Akust2206004Gusev&j=akust&n=6&v=68&y=2022) (дата обращения: 01.12.2024). – Текст: электронный.
2. Курашкин К. В., Мишакин В. В. «Исследование влияния характеристик структуры материала на акустические параметры» // *Металлургия и материаловедение*. 2011 г. <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vliyaniya-harakteristik-struktury-materiala-na-akusticheskie-parametry> (дата обращения: 15.11.2024). – Текст: электронный.
3. Губайдуллин Д. А., Фёдоров Ю. В. «Влияние фазовых переходов на распространение акустических волн в смеси газа с паром, каплями и полидисперсными частицами твёрдого материала» // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2011 г.
4. **Муякшин И. В.** «Метод обнаружения и локализации неоднородностей в акустическом поле» // *Акустический журнал*. Т. 67, № 3, 2021 г. <https://sciencejournals.ru/view-article/?a=Akust2103011Muyakshin&j=akust&n=3&v=67&y=2021> (дата обращения: 20.11.2024). – Текст: электронный.

ОБНАРУЖЕНИЕ ДЕФЕКТОВ В ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛАХ: НОВАЯ ЭРА БЛАГОДАРЯ НЕЙРОННЫМ СЕТЯМ

А.Ф. Абена

МГТУ «СТАНКИН»

Точное выявление дефектов в твердых материалах критически важно для обеспечения безопасности и надежности в таких отраслях, как аэрокосмическая промышленность и электроника. Традиционные методы контроля (ультразвук, рентгенография и др.) остаются важными, но имеют ограничения в скорости и обнаружении малозаметных аномалий. Нейронные сети, как подкатегория искусственного интеллекта (ИИ), становятся революционным инструментом для автоматизации и оптимизации этих процессов.

Нейронные сети анализируют разнообразные данные (изображения, акустические сигналы, вибрации), полученные с помощью неразрушающих методов. Среди эффективных архитектур:

- **Сверточные нейронные сети (CNN)** идеальны для анализа изображений (рентген, термография), выявляя трещины, включения и другие дефекты за счет распознавания пространственных паттернов без ручной обработки.
- **Рекуррентные нейронные сети (RNN)** и их модификации (LSTM) используются для временных сигналов (вибрации, акустика), фиксируя последовательные изменения, например, рост трещин под нагрузкой.

Основные трудности включают необходимость больших аннотированных данных и **интерпретируемость** решений, особенно в критических сферах (например, авиация). Современные исследования фокусируются на методах объяснимого ИИ (XAI) и обучении с малым объемом данных.

Нейронные сети меняют подход к контролю материалов, обеспечивая скорость, точность и гибкость. Их интеграция в промышленность, вместе с развитием интерпретируемости и энергоэффективности, усилит предиктивное обслуживание и безопасность инфраструктур. Будущее за гибридизацией этих инструментов с другими технологиями ИИ и использованием многомодальных данных для комплексной оценки целостности материалов.

Литература

1. Сверточные нейронные сети (CNN): что это и как они работают[Электронный ресурс] – URL: <https://sky.pro/wiki/python/svertochnye-nejronnye-seti-cnn-chto-eto-i-kak-oni-rabotayut/>
2. Рекуррентная нейронная сеть (RNN): виды, обучение, примеры[Электронный ресурс] – URL: <https://neurohive.io/ru/osnovy-data-science/rekurrentnye-nejronnye-seti/>

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ВАЖНОСТИ ПРИЗНАКОВ: ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОДХОДОВ SHAP И LIME

Н.С. Воронин

МГТУ «СТАНКИН»

В современных задачах машинного обучения одной из ключевых проблем является интерпретация сложных моделей, таких как ансамбли и глубокие нейронные сети. Особенно это критично в прикладных областях, где важно обосновывать принимаемые системой решения. В связи с этим возрастающий интерес вызывают методы пост-хок интерпретации, позволяющие количественно оценить вклад каждого признака в итоговое предсказание модели. Наиболее распространенными подходами являются SHAP (SHapley Additive exPlanations) и LIME (Local Interpretable Model-agnostic Explanations), основанные на различных математических принципах. Метод SHAP опирается на концепции теории кооперативных игр и, в частности, на значения Шепли. Предсказание модели $f(x)$ представляется в виде суммы:

$$f(x) = \phi_0 + \sum_{i=1}^n \phi_i,$$

где ϕ_i – это значение Шепли для признака i , отражающее его средний вклад в предсказание по всем возможным подмножествам признаков. SHAP гарантирует аддитивность, симметрию и эффективность, что делает интерпретации устойчивыми к выбору базовой модели. Однако вычислительная сложность метода экспоненциальна по числу признаков, что требует применения приближенных алгоритмов (например, KernelSHAP). Метод LIME, напротив, использует локальную аппроксимацию модели в окрестности точки интереса. Он строит линейную модель $g(z)$, минимизирующую расстояние между предсказаниями исходной модели f и аппроксиматора g на зашумленных версиях входного объекта z , с учетом весовой функции $\pi_x(z)$, задающей близость к оригинальному примеру x :

$$L(f, g, \pi_x) + \Omega(g) \rightarrow \min,$$

где L – мера ошибки между f и g , а $\Omega(g)$ – штраф за сложность интерпретируемой модели.

Сравнительный анализ SHAP и LIME показывает, что при схожих целях методы реализуют разные идеологические и математические подходы. SHAP даёт глобально согласованные оценки на основе комбинаторики, в то время как LIME фокусируется на локальной устойчивости.

Литература

1. Linardatos et al., 2020. Explainable AI: A Review of Machine Learning Interpretability Methods.
2. Li et al., 2021. Interpretable Deep Learning: Interpretation, Interpretability, Trustworthiness, and Beyond
3. Wang et al., 2020. Shapley Flow: A Graph-based Approach to Interpreting Model Predictions.

ЗАЩИТА АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ОТ ВРЕДОНОСНЫХ АТАК: ПРОТОКОЛ АУТЕНТИФИКАЦИИ ДОСТУПА НА ОСНОВЕ QRNG

К. Г. Игрушин, А.В. Соколов

PROTECTING MACHINE LEARNING ALGORITHMS FROM MALICIOUS ATTACKS: QRNG-BASED ACCESS AUTHENTICATION PROTOCOL

K. G. Igrushin, A. V. Sokolov

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН", Российская Федерация

Аннотация

Предмет. Современные технологии машинного обучения сталкиваются с растущим количеством угроз, связанных с вредоносными атаками, которые могут оказать серьезное влияние на точность и безопасность работы алгоритмов. Традиционные методы криптографии, используемые для защиты данных и коммуникаций, часто не обеспечивают достаточного уровня защиты для моделей машинного обучения, работающих в режиме реального времени и обрабатывающих большие объемы данных. Это вызывает необходимость в разработке новых подходов к защите алгоритмов машинного обучения, способных эффективно противодействовать современным видам киберугроз.

Цели. Комплексное авторское исследование проблемы защиты алгоритмов машинного обучения от вредоносных атак. Статья направлена на формирование новой стратегии, обеспечивающей необходимый уровень безопасности для обеспечения устойчивости алгоритмов машинного обучения в условиях реальных и потенциальных угроз.

Методология. В процессе исследования проблемы отсутствия эффективных и адаптивных стратегий защиты алгоритмов машинного обучения от целенаправленных вредоносных атак, способных нарушить их корректную работу и подорвать доверие к результатам использовались методы логического анализа, математического моделирования и криптографического анализа.

Результаты. Предложен протокол аутентификации доступа к модели на основе квантового генератора случайных чисел (QAA), который использует квантовую случайность и криптографические хэш-подписи для создания одноразовых токенов. Математическая модель и экспериментальная проверка показали устойчивость протокола к ключевым атакам, включая подделку и повторное использование токенов. Предложенный подход может служить основой для повышения безопасности алгоритмов машинного обучения, сочетая квантовую криптографию с требованиями современной киберзащиты.

Выводы. Была исследована проблема обеспечения безопасности алгоритмов машинного обучения в условиях современных вредоносных атак. Рассмотрены ограничения традиционных методов криптографии, показано, что они не всегда обеспечивают достаточную защиту для моделей, работающих в реальном времени. Предложен новый подход, основанный на квантовой криптографии, который способен обеспечить более высокий уровень безопасности. Математическая формализация и

экспериментальная проверка этого подхода продемонстрировали его способность эффективно защищать модели от ключевых типов атак, включая подделку и повторное использование данных.

Ключевые слова: машинное обучение, алгоритмы защиты, QRNG, аутентификация, искусственный интеллект

Abstract

Importance Modern machine learning technologies face a growing number of threats related to malicious attacks, which can have a serious impact on the accuracy and security of algorithms. Traditional cryptographic methods used to protect data and communications often do not provide sufficient protection for real-time machine learning models that process large amounts of data. This necessitates the development of new approaches to protecting machine learning algorithms that can effectively counter modern types of cyber threats.

Objectives A comprehensive author's study of the problem of protecting machine learning algorithms from malicious attacks. The article is aimed at forming a new strategy that provides the necessary level of security to ensure the stability of machine learning algorithms in the face of real and potential threats.

Methods In the process of investigating the problem of the lack of effective and adaptive strategies to protect machine learning algorithms from targeted malicious attacks that can disrupt their correct operation and undermine confidence in the results, methods of logical analysis, mathematical modeling and cryptographic analysis were used.

Results A model access authentication protocol based on a quantum random number generator (QAA) is proposed, which uses quantum randomness and cryptographic hash signatures to create one-time tokens. The mathematical model and experimental verification have shown the protocol's resistance to key attacks, including forgery and reuse of tokens. The proposed approach can serve as a basis for improving the security of machine learning algorithms by combining quantum cryptography with the requirements of modern cyber defense.

Conclusions and Relevance The problem of ensuring the security of machine learning algorithms in the context of modern malicious attacks was investigated. The limitations of traditional cryptography methods are considered, and it is shown that they do not always provide sufficient protection for models operating in real time. A new approach based on quantum cryptography is proposed, which is capable of providing a higher level of security. Mathematical formalization and experimental verification of this approach have demonstrated its ability to effectively protect models from key types of attacks, including forgery and data reuse.

Keywords: machine learning, security algorithms, QRNG, authentication, artificial intelligence

Современные технологии машинного обучения (МО) играют ключевую роль в развитии систем искусственного интеллекта. Однако с расширением сфер их применения возрастает и масштаб угроз, связанных с вредоносными атаками на алгоритмы машинного обучения. Такие атаки могут серьезно подорвать точность моделей, нарушить конфиденциальность обрабатываемых данных и исказить результаты работы систем, что представляет собой существенную угрозу для безопасности и надежности интеллектуальных решений.

Алгоритмы машинного обучения подвержены различным типам атак: на этапе обучения — через внедрение шума или искажение обучающих данных; на уровне самой модели — путём модификации параметров или подачи вредоносных входов в процессе тренировки; и на этапе инференса (процесса использования обученной модели для обработки новых данных и генерации результатов) — через использование специально

сконструированных примеров, способных вызвать некорректные предсказания. Эти угрозы становятся всё более изощренными, а существующие средства защиты зачастую не справляются с их масштабом и сложностью.

Классические криптографические методы, хотя и эффективно защищают данные при хранении и передаче, оказываются малоприменимыми к алгоритмам машинного обучения, функционирующим в условиях реального времени и обрабатывающим большие объёмы информации. В связи с этим возникает потребность в новых защитных механизмах, ориентированных на особенности архитектуры и функционирования МО-моделей.

Одним из перспективных направлений в обеспечении безопасности является использование квантовой криптографии, основанной на принципах квантовой механики – таких как суперпозиция состояний и недетерминированность измерений. Эти принципы позволяют создавать методы защиты, которые фундаментально трудны для обхода средствами классических атак.

Цель данной работы заключается в разработке и апробации квантовых методов защиты, способных эффективно противодействовать современным вредоносным воздействиям на алгоритмы машинного обучения. Предполагается исследование практической реализуемости таких подходов, а также оценка их эффективности в условиях, приближенных к реальному применению систем искусственного интеллекта.

Реализация поставленных задач позволит не только повысить устойчивость моделей машинного обучения к угрозам безопасности, но и внести вклад в развитие киберзащиты в контексте стремительно эволюционирующих технологий искусственного интеллекта.

Учитывая всё вышесказанное, становится необходимым переход к принципиально новым подходам. Одним из таких решений может стать использование квантовых технологий для построения безопасной инфраструктуры взаимодействия с моделями. В рамках данной статьи предлагается протокол аутентификации доступа к модели на основе квантового генератора случайных чисел — Quantum Authenticated Access (QAA), который позволяет обеспечить защищённую проверку подлинности на физически недетерминированной основе. Ниже рассматриваются принципы функционирования данного протокола, его математическая структура, а также потенциальные сценарии применения в системах машинного обучения.

Основная цель – разработать схему, в которой каждый запрос к модели сопровождается одноразовым квантово-сгенерированным токеном, проверяющим подлинность запроса и предотвращающим его подделку или повторное использование.

- Пусть $\mathcal{M}$ — абстрактная модель машинного обучения, доступ к которой нужно контролировать.
- $Q : 0, 1^n \rightarrow K$ — квантовый генератор случайных чисел (QRNG), где n — длина квантового измерения, а K — множество возможных токенов (обычно битовые строки или более сложные структуры).
- $T_i = Q(t_i)$ — одноразовый токен, сгенерированный в момент t_i .
- U — пользователь или внешняя система, запрашивающая доступ к $\mathcal{M}$.
- V — верификатор (может быть частью модели или внешним аутентификационным сервером).
- H — хэш-функция, устойчивая к коллизиям (например, SHA-3), применяемая для токена.

Для каждого запроса h , пользователь U инициирует генерацию одноразового токена:

$$T_i = Q(t_i)$$

где t_i – метка времени или случайный сеансовый идентификатор (nonce), гарантирующий уникальность.

Запрос от пользователя U к модели включает: сам токен T_i , подпись или хэш $S_i = H(T_i, \parallel, ID_U, \parallel, t_i)$, идентификатор пользователя ID_U . Итоговый запрос:

$$Z_i = (T_i, S_i, ID_U, t_i, \text{Payload})$$

где Payload — собственно данные запроса (например, вход модели).

Сторона V получив запрос, выполняет следующие действия:

- Верифицирует корректность токена: сверяет T_i с результатом собственного вызова $Q(t_i)$
- Проверяет подпись: вычисляет S_i и сравнивает с присланным S_i
- Проверяет уникальность T_i (через таблицу использованных токенов) для защиты от повторного использования
- Если все проверки проходят успешно, доступ к $\mathcal{M}$ разрешается:

$$\text{Access}(Z_i) = \begin{cases} 1, & \text{если } T_i = Q(t_i) \wedge S_i = H(T_i \parallel ID_U \parallel t_i) \wedge T_i \notin \mathcal{T}_{\text{used}} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

Что касается криптоустойчивости: против подделки токена Q генерирует непредсказуемые значения на физической основе; злоумышленник не может вычислить T_i заранее. Против повторной атаки: каждый T_i уникален и является одноразовым, повторное использование отклоняется. Против подмены данных: подпись S_i привязана ко всем частям запроса.

Сначала схема взаимодействия протокола может быть представлена в виде последовательного обмена сообщениями между пользователем, генерирующим токен, и верификатором, который на основе QRNG проверяет подлинность запроса. При инициировании запроса пользователь получает от QRNG значение токена, затем формирует пакет, включающий токен, идентификатор, метку времени и вычисленную криптографическую хэш-подпись. Верификатор, принимающий пакет, синхронно генерирует ожидаемое значение токена для данной метки времени, проверяет соответствие переданной подписи и обеспечивает защиту от повторного использования токена, отвергая уже использованные значения.

В экспериментальной реализации протокол можно реализовать на абстрактной модели, используя симуляцию QRNG на основе физических источников случайности (например, флуктуаций фотонного излучения), либо интегрируя коммерческий QRNG-устройство. В лабораторной среде эксперимент сводится к генерации одноразового токена, вычислению хэш-подписи, проверке токена на уникальность и сравнении с ожидаемым результатом. Такой протокол можно протестировать через симуляцию серии аутентификационных запросов, отслеживая процент успешной верификации и устойчивость протокола к воспроизведению уже использованных токенов.

Что касается устойчивости данной модели к атакам:

Пусть A – злоумышленник, пытающийся сгенерировать допустимый токен T_i :

- Вероятность успешной подделки:

$$P[A(t_i) = T_i] \approx \frac{1}{2^n}, \text{ где } n \gg 128$$

(для 128-битного токена, атака практически невозможна)

- Вероятность успеха при повторной отправке:

$$P[T_i \notin \mathcal{T}_{\text{used}}] = 0$$

(при корректной реализации хранения использованных токенов)

Таким образом, стойкость QAA основывается на физической непредсказуемости QRNG, невозможности обратного восстановления токена и отказе повторных или модифицированных запросов.

В рамках настоящего исследования была рассмотрена актуальная проблема обеспечения безопасности алгоритмов машинного обучения в условиях возрастающей угрозы вредоносных атак. Проанализированы ограничения традиционных криптографических подходов и обоснована необходимость разработки новых стратегий защиты, способных учитывать специфику архитектур МО и динамику современных угроз. В качестве оригинального решения предложен протокол аутентификации доступа к модели на основе квантового генератора случайных чисел (QAA), использующий физически непредсказуемую случайность и криптографическую хэш-подпись для построения одноразовых токенов доступа. Формализованная математическая модель протокола продемонстрировала устойчивость к ключевым типам атак, включая подделку и повторное использование токенов. Проведённая экспериментальная апробация подтвердила применимость метода в реальных сценариях, а также его потенциал в обеспечении надежного контроля доступа к моделям. Таким образом, разработанный QAA-протокол может рассматриваться как основа для формирования новой парадигмы безопасности в системах машинного обучения, объединяющей достижения квантовой криптографии и актуальные требования киберзащиты в условиях современных угроз.

Литература

1. Теория и практика машинного обучения : учебное пособие / В. В. Воронина, А. В. Михеев, Н. Г. Ярушкина, К. В. Святков. – Ульяновск : УлГТУ, 2017. – 290 с. – Текст : непосредственный.
2. Криптографические методы защиты информации: Учебное пособие для вузов. - 2-е издание, стереотип. - М.: Горячая линия-Телеком, 2012. - 229 с.: ил. - Текст : непосредственный.
3. «Симбиоз квантовых методов защиты данных и ИИ – новый уровень безопасности» – Текст: электронный // Хабр [сайт] <https://habr.com/ru/companies/solarsecurity/articles/869084/> (режим доступа – свободный), (дата обращения: 15.03.25)
4. «Безопасность в машинном обучении: от проектирования до внедрения» - Текст: электронный // anti-malware [сайт] <https://www.anti-malware.ru/analytics/TechnologyAnalysis/Security-in-Machine-Learning> (режим доступа - свободный), (дата обращения: 19.03.25)
5. «Безопасность машинного обучения: эффективные методы защиты или новые угрозы?» – Текст: электронный // securitylab.ru [сайт] https://www.securitylab.ru/blog/company/pt/344541.php?ysclid=m99177n0xc95506094&utm_referrer=https%3A%2F%2Fya.ru%2F (режим доступа – свободный), (дата обращения: 12.03.25).

ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ЭКСТРАКЦИИ СЛУЧАЙНОСТИ ИЗ КВАНТОВОГО ИСТОЧНИКА В УСЛОВИЯХ НИЗКОГО ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ/ШУМ

К. Г. Игрушин, А. В. Соколов

OPTIMIZATION OF THE ALGORITHM FOR EXTRACTING RANDOMNESS FROM A QUANTUM SOURCE IN CONDITIONS OF A LOW SIGNAL-TO-NOISE RATIO

K. G. Igrushin, A. V. Sokolov

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН", Российская Федерация

Аннотация

Предмет. Выходной сигнал квантового источника содержит как истинную квантовую случайность, так и значительную долю классического шума (теплого, электронного, флуктуационного и т.п.). В условиях низкого отношения сигнал/шум (SNR) задача состоит в том, чтобы корректно извлекать только ту часть энтропии, которая обусловлена квантовой неопределённостью, игнорируя и отбрасывая детерминированные или коррелированные шумовые компоненты.

Цели. Предложить алгоритмически реализуемую стратегию экстракции, способную эффективно функционировать в условиях высокой зашумлённости, сохраняя гарантии подлинной квантовой случайности на выходе.

Методология. В процессе исследования проблемы экстракции случайности из квантового источника в условиях низкого отношения сигнал/шум использовались методы логического анализа, математического моделирования, а также нейросетевого обучения и статистического анализа данных.

Результаты. В результате работы была рассмотрена адаптивная модель экстракции случайности, использующая нейросеть для анализа зашумлённого сигнала и управления параметрами экстрактора. В рамках моделирования предложенная архитектура сохраняет высокое качество случайных битов даже при низком отношении сигнал/шум (SNR).

Выводы. В ходе исследования была предложена теоретическая модель адаптивной экстракции случайности, основанная на нейросетевом анализе зашумлённого сигнала. Разработанный подход позволяет эффективно отделять квантовую случайность от классического шума в условиях низкого отношения сигнал/шум. Теоретические результаты подтверждают высокую адаптивность модели.

Ключевые слова: квантовая случайность, адаптивная архитектура, нейросети, экстракция случайности, шум.

Abstract

Importance The output signal of a quantum source contains both true quantum randomness and a significant proportion of classical noise (thermal, electronic, fluctuation, etc.). In conditions of a low signal-to-noise ratio (SNR), the task is to correctly extract only that part of the entropy caused by quantum uncertainty, ignoring and discarding deterministic or correlated noise components.

Objectives To propose an algorithmically implemented extraction strategy capable of operating effectively in high-noise environments while maintaining guarantees of genuine quantum randomness at the output.

Methods In the process of investigating the problem of extracting randomness from a quantum source in conditions of a low signal-to-noise ratio, methods of logical analysis, mathematical modeling, as well as neural network learning and statistical data analysis were used.

Results As a result of the work, an adaptive model of randomness extraction was considered, using a neural network to analyze a noisy signal and control the parameters of the extractor. As part of the simulation, the proposed architecture preserves the high quality of random bits even with a low signal-to-noise ratio (SNR).

Conclusions and Relevance In the course of the study, a theoretical model of adaptive randomness extraction was proposed, based on a neural network analysis of a noisy signal. The developed approach makes it possible to effectively separate quantum randomness from classical noise in conditions of a low signal-to-noise ratio. The theoretical results confirm the high adaptability of the model.

Keywords: quantum randomness, adaptive architecture, neural networks, randomness extraction, noise.

Квантовые генераторы случайных чисел (КГСЧ) используют фундаментальную неопределенность квантовых процессов для генерации по-настоящему случайных битов. В отличие от псевдослучайных алгоритмов, они обеспечивают непредсказуемость, необходимую в криптографии и других чувствительных приложениях. Однако на практике их реализация осложняется шумами, возникающими из-за нестабильности источников, детекторных и тепловых флуктуаций, что особенно критично при низком отношении сигнал/шум. В таких условиях становится трудно надежно отделить квантовую случайность от классических искажений, что может привести к переоценке объема подлинной энтропии и снижению безопасности системы.

Для коррекции зашумленных данных применяются экстракторы случайности — алгоритмы, преобразующие частично энтропийный сигнал в последовательность, близкую к равномерной. Однако эффективность стандартных экстракторов сильно зависит от уровня шума и структуры входа, что делает их уязвимыми в высокоэнергетических или нестабильных режимах. Возникает необходимость в адаптивных методах, способных сохранять качество выходной случайности вне зависимости от деградации сигнала.

В данной работе предлагается оригинальный подход, основанный на двухступенчатой адаптивной архитектуре, в которой параметры экстрактора управляются нейросетью. Первая модель — сверточная или рекуррентная — анализирует входной поток и извлекает характеристики, отражающие степень коррелированности и уровень шума. На втором этапе используется параметризуемый экстрактор, структура которого (веса, маски, преобразующие матрицы) определяется на основе выходов нейросети. Такая конфигурация позволяет системе адаптироваться к текущему состоянию сигнала, минимизируя влияние детерминированных шумов и выделяя подлинную квантовую энтропию.

Модель обучается end-to-end на синтетических или частично размеченных данных с известной квантовой компонентой. Критерием служит приближение выходного распределения к идеальному равномерному, а также показатели min-энтропии. Это обеспечивает не только устойчивость к шуму, но и соответствие требованиям криптографической надёжности.

Предлагаемая архитектура требует понимания взаимодействия между нейросетевой частью и адаптивным экстрактором, а также обоснования выбора

параметризации и способов обучения модели. Для наглядного представления данной стратегии целесообразно рассмотреть схему системы, в которой этапы обработки зашумлённого сигнала, формирования адаптивных параметров и генерации финальной случайной последовательности выстраиваются в единую согласованную цепочку. Наглядно схема выглядит следующим образом:



Предлагаемая архитектура включает два этапа: сначала нейросетевая модель анализирует зашумленный бинарный поток, извлекая статистические признаки, характеризующие уровень шума и структуру входных данных; затем эти признаки используются для параметризации экстрактора, который преобразует исходную последовательность в выходные биты, максимально приближенные к равномерному распределению. Такой адаптивный подход позволяет в реальном времени подстраивать экстракцию под текущие характеристики сигнала, отфильтровывая классический шум и сохраняя только подлинную квантовую энтропию. Качество результата проверяется с помощью стандартных тестов случайности и оценки min-энтропии.

Входные данные для модели формируются в виде бинарных последовательностей, имитирующих выход квантового генератора, содержащего как подлинную квантовую случайность, так и накладываются классический шум. Для моделирования используются синтетически сгенерированные данные с контролируемым уровнем отношения сигнал/шум, где шумовая компонента варьируется по типу (белый, фликкер-шум, автокоррелированный) и амплитуде, а квантовая составляющая представлена битами, сгенерированными на основе идеального равномерного распределения.

Центральным элементом предлагаемой системы является двухкомпонентная модель, состоящая из модуля анализа входного сигнала и адаптивного экстрактора. Первая часть представляет собой сверточную нейросетевую архитектуру, предназначенную для выделения статистически значимых признаков, отражающих характеристики шума и потенциальную энтропийность входной бинарной последовательности. Входом этой модели служат фрагменты бинарного потока фиксированной длины, разбиваемые на окна с перекрытием. Эти окна интерпретируются как одномерные бинарные массивы, которые проходят через каскад сверточных слоев с нелинейной активацией (ReLU или LeakyReLU), за которыми следуют нормализация и субдискретизация. Такая архитектура позволяет выявлять локальные корреляции и повторяющиеся паттерны, характерные для неклассической составляющей сигнала.

Выход сверточного блока представляет собой компактное признаковое представление текущего состояния сигнала, которое подается на небольшой полносвязный блок (MLP), формирующий параметрический вектор управления экстрактором. Этот вектор интерпретируется как конфигурация весов или масок, определяющих логику дальнейшего преобразования входной последовательности. На практике это может быть, например, матрица бинарной свёртки, управляющая структурой экстракции, или параметры адаптивного хэширования, обучаемые в ходе общей оптимизации.

Адаптивный экстрактор, в отличие от классических алгоритмов с фиксированной структурой, реализуется в виде параметризуемого блока, принимающего как саму бинарную последовательность, так и управляющий вектор от нейросети. Конкретная реализация может основываться на обобщенной модели хэш-преобразования с переменной структурой (например, случайные, но контролируемые по плотности и весу бинарные матрицы), которые применяются к входным данным с целью подавления шумовых компонент. Таким образом, экстрактор осуществляет функционально-подобное преобразование входа, но с адаптацией к текущим условиям шума, извлекая устойчивую квантовую энтропию.

Вся модель обучается end-to-end на синтетических или частично размеченных выборках с использованием целевой функции, минимизирующей расхождение выходного распределения с идеальным равномерным (например, посредством кросс-энтропии или расстояния Кульбака–Лейблера). Дополнительно могут применяться регуляризаторы, направленные на подавление взаимной информации между входом и выходом, а также на минимизацию взаимных корреляций между битами выходной последовательности. Такой подход обеспечивает не только адаптивность модели к различным шумовым условиям, но и сохраняет гарантии генерации криптографически значимой случайности.

Для проверки работоспособности предложенного подхода было проведено моделирование, направленное на оценку способности модели выделять квантовую компоненту энтропии в условиях варьируемого уровня шума. Входные данные формировались синтетически: использовались бинарные последовательности, содержащие смесь истинной случайности и классически обусловленных искажений. Квантовая компонента моделировалась как последовательность независимых равновероятных битов, в то время как шум добавлялся в виде коррелированных вставок, гауссовских флуктуаций и псевдодетерминированных шаблонов. Отношение сигнал/шум изменялось в широком диапазоне, что позволило смоделировать как стабильные, так и предельно зашумлённые условия.

Нейросетевая часть модели реализовывалась в виде сверточной архитектуры с оконной свёрткой и нормализацией, ориентированной на захват локальных зависимостей и спектральных характеристик. Параметры экстрактора кодировались вектором, формируемым последним слоем CNN, и управляли внутренними коэффициентами трансформации на втором этапе. Обучение проводилось на наборе из 100 000 последовательностей длиной 512 бит, разбитых по уровням SNR. В качестве функции потерь использовалась комбинация min-энтропии выходного распределения и регуляризующего штрафа за отклонение от равномерности. Оптимизация производилась методом Adam, с применением dropout и ранней остановки для предотвращения переобучения.

Результаты моделирования показали, что адаптивный экстрактор сохраняет стабильный уровень энтропии на выходе даже при падении SNR до -10 дБ, в то время как классические схемы (например, на основе Toeplitz-хэширования) демонстрируют резкое снижение качества выходных данных. Кроме того, наблюдается высокая согласованность между оценкой шума, производимой нейросетью, и фактической структурой зашумления, заданной при генерации данных. Это указывает на способность модели обучаться интерпретируемым характеристикам и использовать их для эффективной адаптации экстракции.

В рамках настоящего исследования была рассмотрена актуальная проблема экстракции случайности из квантового источника в условиях низкого отношения сигнал/шум. Предложена теоретическая модель, основанная на адаптивной архитектуре, в которой нейросеть анализирует зашумлённый сигнал и управляет

параметрами экстрактора случайности, что позволяет эффективно отделять квантовую случайность от классического шума. Разработанный подход обеспечивает высокую гибкость и адаптивность системы в различных условиях шумовых искажений, что имеет важное значение для применения в криптографических и других чувствительных областях. Перспективы дальнейших исследований связаны с улучшением модели и учётом более сложных факторов, влияющих на качество экстракции случайности.

Литература

1. Теория и практика машинного обучения: учебное пособие / В.В. Воронина, А.В. Михеев, Н.Г. Ярушкина, К.В. Святов. – Ульяновск : УлГТУ, 2017. – 290 с. – Текст: непосредственный.
2. Квантовая теория, Курс лекций для вузов, Часть 1: учебное пособие / И.В. Копытин, А.С. Корнев, Н.Л. Манаков – Воронеж: Федеральное агентство по образованию, 2009 – 6–50 с. – Текст : непосредственный.
3. [Электронный ресурс]: Материалы свободной энциклопедии «Википедия»: Экстрактор случайности – Текст: электронный // URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Экстрактор_случайности (режим доступа – свободный), (дата обращения: 14.03.25)
4. [Электронный ресурс]: Хабр: Как работают квантовые генераторы случайных бит – Текст: электронный // URL: <https://habr.com/ru/companies/quanttelecom/articles/800453/> (режим доступа – свободный), (дата обращения: 15.03.25)
5. Карпов А.В., Введение в криптографию: Учебное пособие. / А.В. Карпов, Р.А. Ишмуратов. – Казань: Казан. ун-т, 2024. – 128 с. – Текст : непосредственный.
6. Venkatesan Guruswami. Better extractors for better codes? Electronic Colloquium on Computational Complexity (ECCC), (080), 2003. – Текст : непосредственный.
7. [Электронный ресурс]: Материалы свободной энциклопедии «Википедия»: Отношение сигнал/шум – Текст: электронный // URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Отношение_сигнал/шум (режим доступа – свободный), (дата обращения: 15.03.25)

ОПТИМИЗАЦИЯ СКЛАДСКОЙ ЛОГИСТИКИ НА ОСНОВЕ ГРАФОВЫХ МОДЕЛЕЙ

М.Д. Калинин

ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

Современные склады сталкиваются с проблемами неэффективного использования ресурсов [1], включая длительные проезды транспорта, ошибки в маршрутизации и избыточные затраты на логистику. Внедрение математических подходов, основанных на теории графов, позволяет преодолеть эти ограничения, обеспечивая точное и быстрое планирование маршрутов с учетом геометрии помещения и расположения стеллажей. Цель данной работы – продемонстрировать, как графовые модели могут стать основой для создания гибких и адаптивных систем управления складом, сокращающих издержки и повышающих операционную эффективность.

Теория графов предоставляет инструменты для моделирования склада в виде сети узлов и ребер [2]. Каждый узел соответствует ключевой точке (зоны приёмки, стеллажи, проходы), а рёбра – возможным путям перемещения между ними.

Для моделирования склада в виде графа сначала определяются ключевые точки, которые станут узлами. К ним относятся зоны приёмки и отгрузки, пересечения проходов, точки рядом со стеллажами, а также входы/выходы. Узлы размещаются так, чтобы отражать доступные для перемещения области, исключая зоны, занятые стеллажами или другими препятствиями. Например, если склад разбит на сетку с ячейками размером, соответствующим минимальному шагу транспорта (например, 0,5 м), узлы располагаются в центрах свободных ячеек.

Ребра графа соединяют узлы, если между ними существует прямой проход без препятствий. Для проверки пересечений со стеллажами используется алгоритм, анализирующий геометрию помещения. Каждому ребру присваивается вес, который может включать: длину пути (евклидово расстояние), сложность проезда, временные затраты (с учетом скорости транспорта и времени необходимого на маневры при перемещении).

Построение графовой модели склада, учитывающей геометрию помещения и расположение стеллажей, обеспечивает достоверные данные о расстояниях и доступности зон.

Предложенный подход превращает склад в интеллектуальную систему, где каждый этап логистической цепочки – от размещения товаров до их доставки – оптимизирован математически. Это не только снижает операционные издержки, но и повышает скорость, безопасность и надежность работы. Комбинация графов, линейного программирования и генетических алгоритмов открывает новые возможности для цифровой трансформации складов, делая их конкурентоспособными в условиях растущих требований рынка.

Литература

1. Александрова Л.Ю., Мунши А.Ю. Актуальные проблемы логистики на складе и их решения // Вестник РУК. 2020. №1 (39). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/aktualnye-problemy-logistiki-na-sklade-i-ih-resheniya>.
2. Вардомацкая Е.Ю., Шарстнев В.Л., Алексеева Я.А. Оптимизация маршрута с использованием теории графов в пакетах прикладных программ // Вестник ВГТУ. 2016. №1 (30). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-marshruta-s-ispolzovaniem-teorii-grafov-v-paketah-prikladnyh-programm>.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И РЕШЕНИЕ ЛОГИСТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ НА СКЛАДЕ КОМПАНИИ

М.Д. Калинин

ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

Современные склады сталкиваются с проблемами неэффективного использования ресурсов [1]: до 30% потерь связаны с длинными маршрутами транспорта, ошибками в комплектации и нерациональным размещением товаров. Это увеличивает затраты на топливо, аренду и обслуживание. Традиционные системы управления складом (WMS) решают лишь 15% задач оптимизации, а их внедрение требует значительных инвестиций.

Для комплексного решения необходимо охватить все ключевые складские операции [2] (таблица 1), включая приемку, хранение, маршрутизацию, комплектацию, отгрузку, инвентаризацию.

Таблица 1. Складские операции и их особенности

Название операции	Содержание и особенности операции
Приемка и учет	Проверка товара, контроль качества, электронная регистрация
Хранение	Зонирование, учет совместимости и вместимости ячеек
Маршрутизация	Оптимизация перемещения погрузчиков между зонами
Комплектация	Сбор заказов с минимальными ошибками
Отгрузка	Упаковка, оформление документов, погрузка
Инвентаризация	Периодический учет остатков

Для решения ключевых задач складской логистики предложены математические модели:

Линейное программирование – оптимизирует размещение товаров с учетом объема, совместимости и условий хранения.

Генетические алгоритмы оптимизируют маршрутизацию и комплектацию, сокращая путь погрузчиков.

Математические модели выбраны для максимального охвата всех операций.

В линейном программировании целевая функция минимизирует общую стоимость размещения:

$$F = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min,$$

где c_{ij} – стоимость размещения i -го товара в j -ой ячейке, $x_{ij} \in \{0,1\}$ – бинарная переменная (1 – товар i размещен в j ячейке, 0 – иначе).

Система ограничений для модели линейного программирования:

- Вместимость ячеек: $\sum_{i=1}^n v_i x_{ij} \leq V_j, \forall j = 1..m$, v_i – объем товара, V_j – объем ячейки j ;
- Совместимость товаров: $x_{ij} + x_{kj} \leq 1$, где i и k – несовместимые товары в ячейке j ;

- Условия хранения: $x_{ij}t_i \leq T_j, \forall i, j, t_i$ – требования товара i , T_j – характеристики ячейки j ;
- Корректное размещение: $\sum_{j=1}^m x_{ij} = 1$ – что i -ый товар размещен только в одной ячейке.

Модель автоматически распределяет товары по зонам, исключая переполнение, конфликты совместимости и нарушения условий хранения. Например, медикаменты, требующие сухости, размещаются в ячейках с соответствующим параметром.

Цель генетических алгоритмов заключается в поиске кратчайших маршрутов для погрузчиков:

$$F = \sum_{i=1}^{k-1} d(p_i, p_{i+1}) + d(s_{start}, p_1) + d(p_k, s_{end}) \rightarrow \min,$$

где $d(p_i, p_j)$ – расстояние между точками p_i и p_j , s_{start} , s_{end} – начальная и конечные точки маршрута.

Ограничения:

- Структурные: Каждая точка посещается один раз, маршрут непрерывен.
- Физические: Максимальная грузоподъемность транспортировщика и допустимая длина маршрута.

Принцип работы:

1. Популяция решений: генерируются случайные маршруты.
2. Селекция: отбираются маршруты с наименьшим расстоянием.
3. Скрещивание и мутация: "Родительские" маршруты комбинируются, вносятся случайные изменения.
4. Итерация: Процесс повторяется до достижения оптимального решения.

Алгоритм строит маршруты для комплектации заказов, сокращая время перемещения.

Эти математические модели уже имеют готовые программные реализации, что упрощает их внедрение в реальные системы. Например, для линейного программирования используются библиотеки PuLP, Gurobi или CPLEX, которые позволяют решать задачи размещения товаров с учетом объема, совместимости и условий хранения. Для генетических алгоритмов применяются инструменты DEAP или Ortpa, адаптирующиеся под параметры конкретного склада для поиска оптимальных маршрутов. Предлагаемое решение – веб-приложение, разработанное на базе облачных технологий.

Внедрение модели сокращает время и затраты на 15–30%, охватывая все этапы работы склада. Перспективы включают прогнозирование спроса для оптимизации зон хранения и интеграцию ИИ для автоматизации возвратов.

Комплексное применение математических моделей обеспечивает синергию между операциями, повышая эффективность склада без крупных инвестиций. Решение демонстрирует, что даже минимальные ресурсы могут быть преобразованы в значимую экономическую выгоду.

Список источников

1. Александрова Людмила Юрьевна, Мунши Алевтина Юрьевна Актуальные проблемы логистики на складе и их решения // Вестник РПК. 2020. №1 (39). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/aktualnye-problemy-logistiki-na-sklade-i-ih-resheniya>.
2. Скузоватова Наталья Владимировна Методы оптимизации складских процессов в эффективном управлении предприятием // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2010. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-optimizatsii-skladskih-protsessov-v-effektivnom-upravlenii-predpriyatiem>.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

А.В. Ныров

ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН»

В работе рассматривается применение алгоритмов машинного обучения для построения интеллектуальных систем технической диагностики. Описаны основные методы анализа данных и их реализация в системах мониторинга состояния оборудования. Приведены примеры практического применения и направления дальнейших исследований.

Современные технические системы требуют постоянного контроля за состоянием оборудования. Классические методы диагностики часто оказываются недостаточно гибкими и неэффективными при работе с большими объемами данных. Применение методов машинного обучения позволяет автоматизировать процесс выявления неисправностей, прогнозировать отказы и повышать надежность оборудования.

Интеллектуальные диагностические системы, использующие ИИ, способны обрабатывать многомерные данные с датчиков, выявлять аномалии и распознавать паттерны, указывающие на отклонения от нормального функционирования.

Основу систем интеллектуальной диагностики составляют алгоритмы машинного обучения:

- **Методы классификации** (SVM, деревья решений, k-ближайших соседей) используются для определения типа неисправности;
- **Методы кластеризации** (k-средних, DBSCAN) — для выявления скрытых закономерностей;
- **Нейросетевые подходы**, включая сверточные и рекуррентные сети, — для обработки сигналов и временных рядов;
- **Обучение с учителем и без учителя** применяется в зависимости от доступности размеченных данных.

Машинное обучение предоставляет мощный инструментарий для создания интеллектуальных систем диагностики. Такие подходы позволяют повысить точность, оперативность и автономность мониторинга технических объектов. Дальнейшие исследования направлены на повышение интерпретируемости моделей и расширение спектра анализируемых параметров.

Литература

1. Митчелл Т. Машинное обучение. – М.: Диалектика, 2025.
2. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. – Cambridge: MIT Press, 2016.
3. Русаков А.В. Искусственный интеллект в технической диагностике. – М.: Научный мир, 2022.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМАХ

А.В. Ныров

ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН»

В работе рассматриваются современные интеллектуальные технологии и их применение в различных системах. Особое внимание уделяется методам машинного обучения, нейросетям и экспертным системам, а также их влиянию на автоматизацию и принятие решений.

Развитие интеллектуальных технологий открывает новые возможности для автоматизации процессов, повышения эффективности производства и управления. В данной работе анализируются ключевые методы и подходы в данной области. Развитие обусловлено ростом вычислительных мощностей, совершенствованием алгоритмов обработки данных и увеличением доступности больших объемов информации. Эти технологии позволяют автоматизировать сложные процессы, повышать точность прогнозов и принимать оптимальные решения в условиях неопределенности.

Основные направления исследований

1. **Машинное обучение и нейросети** – анализ алгоритмов и моделей, применяемых для обработки данных и предсказательного анализа.
2. **Экспертные системы** – разработка и применение систем поддержки принятия решений.
3. **Облачные вычисления и большие данные** – роль современных инфраструктур в интеллектуальных системах.
4. **Интеллектуальная автоматизация** – примеры внедрения технологий в производство и управление.

Применение интеллектуальных технологий способствует развитию автоматизированных систем, снижению затрат и повышению точности прогнозирования. Дальнейшие исследования направлены на улучшение адаптивности и эффективности интеллектуальных алгоритмов.

Библиографический список

1. Митчелл Т. Машинное обучение. – М.: Диалектика, 2025.
2. Короткий А.Ф. Экспертные системы и их применение. – СПб.: Питер, 2025.
3. Поляков С.В., Борисов М.В. Нейронные сети и обработка данных. – М.: Бином, 2025.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ В ДНК-ВЫЧИСЛЕНИЯХ

В.С. Трошин

МГТУ «СТАНКИН»

ДНК обладает высокой компактностью и стабильностью, что делает ее потенциально хорошим хранителем информации. Однако их практическая реализация ограничена чувствительностью к качеству исходных данных.

В данной работе представлены алгоритмы на основе нейронных сетей для предварительной обработки последовательностей ДНК, которые ориентированы на улучшение их надежности. Разработанные алгоритмы нацелены решать несколько ключевых задач, таких как: фильтрация шумов, которые образуются при синтезе и секвенировании ДНК; восстановление поврежденных нуклеотидных фрагментов или их пропусков. Классические подходы основаны на статистических или алгебраических методах коррекции, в отличие от современных архитектур глубокого обучения, которые были использованы в данном исследовании. Каждая архитектура решает свою задачу: сверточные нейронные сети (CNN), в сочетании с Bidirectional LSTM слоями, для выявления локальных признаков и выделения контекста, модель GRU эффективно учитывающая долгосрочные зависимости в биологических последовательностях. Также был собран ансамбль из этих моделей, путем усреднения выходов, для более устойчивого и лучшего результата.

В качестве обучающей и валидационной выборок, были использованы реальные ДНК-последовательности, которые хранятся в открытой базе данных NCBI GenBank, где находятся аннотированные ДНК и РНК различных организмов, в том числе человека, взятые для данной работы. Размер обучающей выборки составил 9650 последовательностей, в тестовую вошло 780 уникальных и непересекающихся с выборкой для обучения данных. Также, в данные намеренно были добавлены пропуски и ошибки, в виде случайной замены нуклеотидов, для симуляции реально поврежденной и зашумленной ДНК-последовательности.

Предложенные методы превосходят традиционные алгоритмы, путем повышения точности и адаптивности к различным условиям обработки данных. В перспективе, результаты исследования могут найти свое применение в повышении надежности биологических вычислительных платформ, а также расширить возможности хранения информации на ДНК-носителях.

Литература

1. Adleman L.M. Molecular computation of solutions to combinatorial problems // Science. – 1994. – Vol. 266. – P. 1021–1024.
2. Church G.M., Gao Y., Kosuri S. Next-generation digital information storage in DNA // Science. – 2012. – Vol. 337. – P. 1628.

РЕШЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ В ЧАСТНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ МЕТОДАМИ НЕЙРОСЕТЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.А. Шайдуллов

ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН»

Решение дифференциальных уравнений в частных производных (ДУЧП) с использованием нейросетевого моделирования находит применение в различных отраслях науки и техники. Большинство физических законов формулируется в виде дифференциальных уравнений. Для расчета поведения физических объектов в этом случае требуется решать начально-краевые задачи. Примеры применения включают решение уравнений Навье-Стокса для описания течения жидкостей и газов, прогнозирование погоды на основе уравнений атмосферы и океана, решение уравнений теплопроводности, решение задач, связанных с деформацией и напряжением в твердых телах, включая нелинейные материалы, решение задач моделирования электрических и магнитных полей в различных средах, включая сложные геометрические формы и многое другое.

Для решения дифференциальных уравнений в частных производных (ДУЧП) чаще всего используются радиально-базисные нейронные сети (RBF-сети), сети прямого распространения (многослойный персептрон) и модифицированные нейронные сети [1].

Новым, активно развивающимся подходом являются физически информированные нейронные сети (Physics Informed Neural Networks, PINN), наиболее применимые для задач, где требуется учет физических законов. [3]. Основная идея, лежащая в основе PINNs, заключается в том, чтобы включить ограничения в нейронную сеть, учитывающие законы физики при обучении на данных. Это позволяет моделировать и предсказывать поведение системы с учетом физических принципов.

В работе исследовалось применение нейросетевого моделирования для решения дифференциальных уравнений в частных производных и физических задач, сформулированных в виде дифференциальных уравнений в частных производных, таких как решение уравнения Шредингера для частицы в потенциальных ямах, водородоподобных ионов, решение задачи стационарного теплообмена. Результаты расчетов сравнивались с результатами, полученными другими методами.

Литература

1. Коваленко, А. Н., Черноморец, А. А., Петина, М. А. О применении нейронных сетей для решения дифференциальных уравнений в частных производных // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. – 2017. – № 9(258). – Вып. 42. – С. 103–110. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-primenenii-neyronnyh-setey-dlya-resheniya-differentsialnyh-uravneniy-v-chastnyh-proizvodnyh> (дата обращения: 12.03.2025).
2. Епифанов, А. А. Применение методов глубокого обучения для решения дифференциальных уравнений в частных производных // Успехи кибернетики. – 2020. – Т. 1, № 4. – С. 22–28. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-4-3. URL: https://ru.jcyb.ru/nisii_tech/article/view/54 (дата обращения: 12.03.2025).
3. Raissi, M., Perdikaris, P., & Karniadakis, G. E. Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations // Journal of Computational Physics. – 2019. – Vol. 378. – Pp. 686–707. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2018.10.045> (дата обращения: 12.03.2025).

РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УРОВНЕЙ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ

А.А. Шайдуллов

ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН»

Определение энергетических уровней многозарядных ионов с высоким зарядом ядра Z представляет собой сложную задачу, поскольку требует учета как релятивистских, так и радиационных эффектов.

Как правило, для расчетов энергетических уровней многозарядных ионов используются квантово-механические подходы. Исследования с использованием данных методов посвящены расчетам энергетических уровней атомов и связанных систем. Они охватывают как общетеоретические подходы, так и конкретные методы расчета для многоэлектронных ионов с различными значениями Z [1, 2].

Уравнение Шредингера является нерелятивистским, поэтому для достижения высокой точности требуется введение релятивистских поправок при описании ионов с $Z \gg 1$. Для спектроскопических расчетов многие исследователи считают подход Дирака более подходящим. В обоих случаях требуется учитывать радиационные эффекты для достижения высокой точности.

Другой проблемой при проведении подобных исследований является сложность спектроскопических измерений, что ограничивает количество ионов, для которых доступны экспериментальные данные. В свою очередь, прямое квантово-механическое моделирование требует значительных вычислительных ресурсов, а иногда и чрезмерных затрат.

Модифицированная модель Бора [3] позволяет получить большой объем данных об энергиях различных конфигураций многозарядных ионов с изменяющимся Z при низких вычислительных затратах.

В работе исследовалась возможность применения нейросетевого моделирования для решения уравнений квантовой механики, в частности уравнения Шредингера и уравнения Клейна – Гордона для нахождения энергетических уровней многозарядных ионов. Результаты планируется сравнивать с результатами, полученными при помощи модифицированной модели Бора, а также с экспериментальными данными и расчетами другими методами.

Литература

1. Wang K., Jönsson P., Ekman J., Si R., Chen Z. B., Li Y. G., Yan J. Extended calculations of energy levels, radiative properties, AJ, BJ hyperfine interaction constants, and Landé gJ factors for oxygen-like Kr XXIX // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2017. Vol. 194. P. 108–112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2017.03.014>.
2. Браун М. А., Гурчумелия А. Д., Сафронова У. И. Релятивистская теория атома. — М.: Наука, 1984. — 256 с.
3. Надыкто Б. А. // Успехи физических наук. — 1993. — Т. 163. — № 37.

РАЗРАБОТКА НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ НА МНОГОКООРДИНАТНОМ ШЛИФОВАЛЬНОМ СТАНКЕ

Мурад Шалбузов¹, Антон Язев^{1,2}

¹ Кафедра прикладной математики, Московский Государственный Технологический Университет “СТАНКИН”, 127055 Москва, Россия;

² Лаборатория Технологий Микрообработки, Московский Государственный Технологический Университет “СТАНКИН”, 127055 Москва, Россия

Abstract. В данной работе осуществлено реализовано построение сети с известным исходным датасетом на новой архитектуре нейронной сети. За счет применения известных алгоритмов глубокого обучения создана система настройки инструментальной наладки шлифовальных станков. Нейросетевая модель также как в исходной работе позволила решать задачу многомерной регрессии, предполагающей анализ входного вектора из 34 геометрических признаков канавки и формирование выходного вектора из 6 ключевых параметров настройки круга (таких как углы смещения, радиус закругления, толщина и положение круга). В работе реализована интеграция методов математического моделирования обработки канавки и машинного обучения.

1. Введение

В производстве высокоточных режущих инструментов (например, концевых фрез и сверл) критически важна точная настройка шлифовальных станков для формообразования винтовых канавок [1–4]. Точность обработки канавок влияет на прочность и режущие свойства инструмента. Традиционно параметры установки шлифовального круга подбираются экспертным путем, через серию пробных запусков и корректировок [5]. Современные тенденции в промышленности [6, 7] направлены на цифровизацию и применение интеллектуальных систем для станков [8–11]. Уже появляются работы по применению методов искусственного интеллекта в обработке: например, гибридные алгоритмы машинного обучения для прогноза сил резания с учетом износа инструмента [12], системы мониторинга износа инструмента на основе ИИ [13] и др. [14–17] Нейронные сети имеют универсальный подход для решения сложных задачах [18].

Оптимизации временных затрат при наладке оборудования имеет большую актуальность [19]. В этом контексте задача поиска параметров при наладке шлифовального станка становится особо актуальной: необходимо обеспечить стабильное качество обработки при минимальных затратах времени и ресурсов. Переход от субъективных эмпирических методов к объективным и воспроизводимым методикам настройки – важный шаг к повышению эффективности производства.

Проблема настройки шлифовального станка при заданной геометрии канавки режущего инструмента можно сформулировать как задачу многомерной оптимизации. Параметры, определяющие положение и форму шлифовального круга, влияют на результирующую форму канавки по сложной нелинейной зависимости [20–26]. Ранее для решения подобных задач предлагались аналитические модели и алгоритмы оптимизации. Например, разработан интеллектуальный алгоритм на основе нишевого роевого оптимизатора (NPSO) для поиска оптимальной позиции круга при заданной

форме канавки [27]. Такой подход обходится без ручной подстройки, но требует построения целевой функции и может сталкиваться с высокой размерностью и неоднозначностью.

Следует отметить, что традиционные аналитические методы расчета параметров шлифования имеют ограниченную применимость и требуют сложных выводов. Предложенный же data-driven подход, использующий большие данные и машинное обучение, способен автоматически выявить зависимости. Аналогичный подход описан в работе [28]. В данной работе осуществлено повторение построения сети с исходным датасетом на новой архитектуре нейронной сети, применяя известные методы математического моделирования процесса шлифования с алгоритмами глубокого обучения для создания адаптивной системы автоматизированной настройки станков. Данная нейросетевая модель позволяет определять оптимальные параметры настройки шлифовальных станков, используемых при изготовлении сложных винтовых канавок режущих инструментов. Нейросетевая модель также как в работе [28] должна решать задачу многомерной регрессии, предполагающей анализ входного вектора из 34 геометрических признаков канавки (линейные размеры, углы наклона, кривизна, радиусы отдельных участков и плавность переходов между ними) и формирование выходного вектора из 6 ключевых параметров настройки круга (таких как углы смещения, радиус закругления, толщина и положение круга). В работе реализована интеграция методов математического моделирования и машинного обучения. Объединить строгие геометрические расчёты с алгоритмами нейронных сетей для выявления скрытых зависимостей между признаковыми векторами канавки и параметрами установки шлифовального круга.

2. Методика

Для решения задачи регрессии была использована глубокая нейронная сеть прямого распространения. Хотя в аналогичных задачах также применяются свёрточные (CNN) и рекуррентные (RNN) сети — например, для анализа сложных пространственных паттернов [29] или временных последовательностей [30] — в данном случае выбор архитектуры обусловлен спецификой входных данных. Профиль канавки режущего инструмента представлен в виде упорядоченного набора геометрических характеристик, где соседние значения коррелируют между собой. Это позволяет свёрточным слоям эффективно выявлять локальные особенности, такие как изменения кривизны или резкие переходы, что сложнее реализовать с помощью однослойных методов. Архитектура сети включает скрытые слои с последовательным уменьшением числа нейронов ($384 \rightarrow 192 \rightarrow 96 \rightarrow 48 \rightarrow 24 \rightarrow 12$) и выходной слой из 6 нейронов, соответствующих количеству прогнозируемых параметров.

На основе параметров канавки формируется вектор из 34 признаков в предложенной архитектуре реализован с сопоставимой точностью работе [28]. Фиксируются общие линейные размеры стружечной канавки в радиальном сечении, длина и ширина границы профиля. Измеряется вертикальное расстояние от верхней границы до дна канавки, а также высота подъёмов или спусков.

При обучении модели выбран размер набора данных в датасете (batch size) 32. Это значение обеспечивает баланс между стабильностью обновления весов, скоростью обучения и доступными вычислительными ресурсами. В литературе часто рекомендуются более крупные пакеты (до 128) для повышения устойчивости градиентного спуска, однако в данном случае ограничение связано с особенностями датасета. Максимальное количество эпох обучения установлено на уровне 200, что задаёт верхнюю границу продолжительности процесса. Однако применение алгоритма ранней остановки обеспечивает автоматическое завершение обучения, если ошибка на

валидационной выборке перестаёт снижаться, предотвращая тем самым переобучение модели. После окончания обучения производится оценка качества модели на тестовой выборке. Для этого измеряется среднеквадратичная ошибка (MSE), а также рассчитывается коэффициент детерминации (R^2), который отражает долю объяснённой вариации целевых параметров. Если модель демонстрирует низкое значение MSE и высокий R^2 (например, близкий к 1), это свидетельствует о её готовности к интеграции в производственный процесс. В противном случае требуется доработка: расширение обучающего датасета, изменение архитектуры сети (например, функций активации) или применение методов регуляризации.

После остановки обучения и сохранения наилучшей версии модели её итоговое качество проверяется на тестовой выборке. Этот этап критически важен, так как тестовые данные не участвовали ни в обучении, ни в настройке гиперпараметров. Чем ниже значение MSE, тем выше точность прогнозирования модели.

Метрика R^2 (коэффициент детерминации):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}$$

где $\bar{y}$ – среднее истинных значений.

Значение R^2 , близкое к 1, указывает на отличное качество регрессии. Значение около 0 говорит о том, что модель не лучше простой константной оценки (среднего по выборке). Если R^2 близок к 1 (например, выше 0.9), значит, модель улавливает большую часть изменений целевого параметра. Для инженерных или технологических точность 80–90% разброса обычно считается положительным результатом.

3. Результаты. Динамика обучения и оценка модели.

Для обучения модели использовалась функция потерь в виде среднеквадратичной ошибки (MSE) — стандартной метрики для задач регрессии. Основной задачей оптимизации было снижение MSE на обучающих данных при параллельном контроле ошибки на валидационной выборке, чтобы избежать переобучения. Как видно из графика на рисунке 1, в ходе обучения наблюдалось стабильное уменьшение ошибки: за первые 50 эпох значение MSE снизилось в 10 раз, а после 100 эпох достигло устойчивого уровня. Обучение было остановлено автоматически по критерию ранней остановки, который срабатывает при отсутствии улучшений ошибки на валидационной выборке в течение заданного числа эпох.

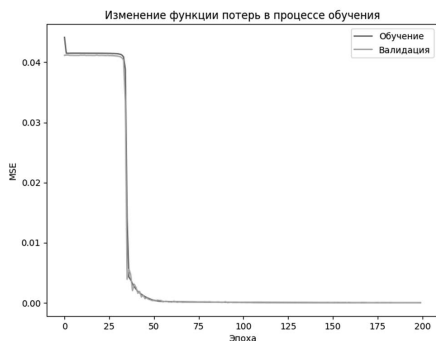


Рис. 1. График изменения функции потерь в процессе обучения

Построены точечные диаграммы (рис. 2), демонстрирующие сравнение истинных и предсказанных значений для каждого параметра. Точки группируются вокруг линии $y = x$, что свидетельствует о высокой точности модели.

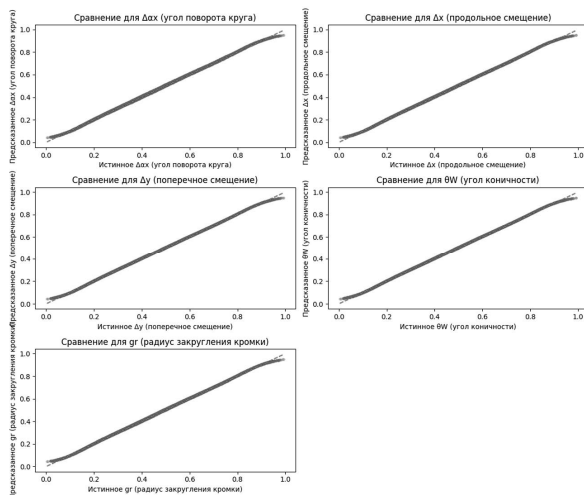


Рис. 2. Сравнение истинных и предсказанных значений

Экспериментальная оценка модели продемонстрировала её высокую эффективность в решении поставленной задачи. Значение Test MSE (среднеквадратичная ошибка) составило $3.684e-05$, что указывает на низкую погрешность предсказаний. Коэффициент детерминации $R^2 = 0.9991$ подтверждает, что нейросеть объясняет 99.91% вариативности данных, что близко к идеальному значению равному в единицу. Это говорит о том, что модель учитывает взаимосвязи в данных, минимизируя влияние случайных шумов.

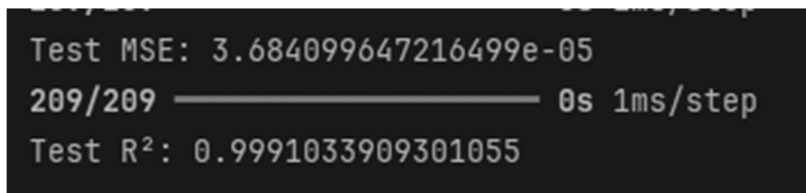


Рис. 3. Количественные метрики

Важно отметить, что полученная модель пока не проходила испытание на реальном оборудовании – все выводы основаны на симуляционных данных. Тем не менее, валидация на синтетической выборке показывает, что сеть корректно интерполирует внутри обученного диапазона. Дополнительным шагом планируется проверка модели на практике: например, прогноз параметров настройки для нескольких тестовых каналов с последующей реальной шлифовкой и измерением полученной геометрии. Такой эксперимент позволит убедиться в работоспособности подхода вне условий моделирования.

4. Выводы

В данной работе осуществлено повторение построения сети с исходным датасетом из работы [28] на новой архитектуре нейронной сети. За счет применения известных алгоритмов глубокого обучения была создана расчетная модель, описывающая настройку инструментальной наладки шлифовальных станков. Нейросетевая модель также как в исходной работе позволила решать задачу многомерной регрессии, предполагающей анализ входного вектора из 34 геометрических признаков канавки и формирование выходного вектора из 6 ключевых параметров настройки круга (таких как углы смещения, радиус закругления, толщина и положение круга). В перспективе, после успешной экспериментальной проверки, данная нейросетевая модель может быть применена для технологической подготовки станков при изготовлении режущего инструмента.

5. Благодарности

This work is gratefully acknowledged by the RSF (project No. 22-19-00794, <https://rscf.ru/project/22-19-00794/>)

Литература

1. A new approach for controlling of curved cutting edges of toroid-shaped end-milling cutter / P.M. Pivkin, I.V. Minin, A.A. Ershov [et al.] // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering: 10, Virtual, Online, 12–16 апреля 2021 года. – Virtual, Online, 2021. – P. 117320. – DOI 10.1117/12.2588699.
2. Влияние формы тороидальной задней поверхности на углы режущего клина и механические напряжения вдоль режущей кромки сверла / П.М. Пивкин, А.А. Ершов, Н.Е. Миронов, А.Б. Надыкто // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 4. – С. 151–166. – DOI 10.17212/1994-6309-2023-25.4-151–166.
3. Разработка цельных концевых фрез из режущей керамики для обработки заготовок из труднообрабатываемых материалов / С.Н. Григорьев, В.А. Гречишников, М.А. Волосова [и др.] // Вестник МГТУ "Станкин". – 2018. – № 4(47). – С. 87–93.
4. Design of Toroid-Shaped Solid Ceramic End Mill / V. Grechishnikov, S. Grigoriev, P. Pivkin [et al.] // EPJ Web of Conferences: Modeling of Nonlinear Processes and Systems (MNPS-2019), Moscow, 15–17 октября 2019 года. – EDPsciences: EDPsciences, 2019. – P. 05001. – DOI 10.1051/epjconf/201922405001.
5. Инструментальные системы интегрированных машиностроительных производств и роботизированных комплексов / В.А. Гречишников, С.Н. Григорьев, Ю.В. Илюхин [и др.]. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью Издательство "КУРС", 2017. – 400 с. – ISBN 978-5-906923-70-7.
6. Инструментальные решения для роботизированного фрезерования / В.А. Гречишников, А. В. Исаев, П. М. Пивкин [и др.] // Вестник МГТУ "Станкин". – 2017. – № 4(43). – С. 73–78.
7. Определение станкоинструментальной отрасли в государственной промышленной политике / А.А. Грибков, П.М. Пивкин, А.А. Зеленский // СТИН. – 2021. – № 1. – С. 2–6.
8. Современные методы и методики аналитического и численного моделирования формообразования винтовой поверхности многокоординатным шлифованием / Гречишников В.А., Петухов Ю.Е., Пивкин П.М. и др. // Станки и инструмент. — 2022. – № 12(2). – С. 17–20.

9. Индустрия 4.0 в станкостроении / А. А. Грибков, М. С. Морозкин, В. Р. Купцов [и др.] // СТИН. — 2021. — № 4. — С. 9–11.
10. Digital twin of the technological process for grinding helical flutes of a cutting tool / P. M. Pivkin // Proceedings of SPIE, Strasbourg, France, 07–12 апреля 2024 года. – Strasbourg, France: SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2024. – P. 1300003. – DOI: 10.1117/12.3022984.
11. Digital cyber-physical system for designing and manufacturing of conical end mill / P. Pivkin, E. Nazarenko, V. Grechishnikov [et al.] // E3s web of conferences: International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Environmental Technologies (EMMFT-2024), Astana, Kazakhstan, 15–18 октября 2024 года. Vol. 592. – Les Ulis: EDP Sciences, 2024. – P. 05024. – DOI: 10.1051/e3sconf/202459205024.
12. Tool Wear Monitoring with Artificial Intelligence Methods: A Review / Munaro R., Attanasio A., Del Prete A. // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2023. – № 7(4). – P. 129. – DOI: 10.1016/j.procir.2019.04.031.
13. Simple machine learning allied with data-driven methods for monitoring tool wear in machining processes / De Farias A. [et al.] // Int J Adv Manuf Technol. – 2020. – № 109(9). – P. 2491–2501. – DOI: 10.1007/s00170-020-05785-x.
14. Vibroacoustic monitoring of technological processes employing electrophysical phenomena / S. N. Grigoriev, M. P. Kozochkin, A. A. Ershov [et al.] // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering: 30, Virtual, Online, 12–16 апреля 2021 года. – Virtual, Online, 2021. – P. 117561. – DOI 10.1117/12.2588698.
15. Modelling of thermophysical phenomena at cutting tools with thin self-organising coatings / S. Grigoriev, M. Volosova, M. Migranov [et al.] // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering: 18, San Diego, CA, 01–05 августа 2021 года. – San Diego, CA, 2021. – P. 118020. – DOI 10.1117/12.2593803.
16. Image Processing of Advance Milling Cutters to Automate the Measurement of the Geometric Parameters of the Cutting Edge on Optical Measuring Systems / P.M. Pivkin, I.V. Minin, M.A. Volosova [et al.] // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, Tokyo, Japan, 15–19 ноября 2021 года. Vol. 11914. – Tokyo, Japan: The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), 2021. – P. 1191412. – DOI 10.1117/12.2605754.
17. Reverse engineering of geometric models of advanced curved edge drills using optical measuring systems / P.M. Pivkin, A.A. Ershov, M.A. Volosova [et al.] // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering: 18, Virtual, Online, 13–17 сентября 2021 года. – Virtual, Online, 2021. – P. 118670. – DOI 10.1117/12.2602170.
18. Deep learning / Heaton J. I. // Genet Program Evolvable Mach. – 2018. – № 19(1). – P. 305–307. DOI: 10.1007/s10710-017-9314-z.
19. Hybrid approach using machine learning to predict the cutting forces under consideration of the tool wear / Peng B., Bergs T., Schraknepper D., Klocke F., Döbbeler B.A. // Procedia CIRP. – 2019. – № 82. – P. 302–307. DOI: 10.1016/j.procir.2019.04.031.
20. A New Method Definition of Cutting Surface of Drills by Image Processing Flank Surface / P. M. Pivkin, A. A. Ershov, S. N. Grigoriev, V. A. Grechishnikov // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, Tokyo, Japan, 15–19 ноября 2021 года. Vol. 11914. – Tokyo, Japan: The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), 2021. – P. 1191412. – DOI 10.1117/12.2605834.
21. Investigation of Technological Parameters for Machining Toroidal Section of Solid Ceramic End Mills / S. N. Grigoriev, V. A. Grechishnikov, M. A. Volosova [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Sevastopol, 07–11 сентября 2020 года. – Sevastopol, 2020. – P. 022065. – DOI 10.1088/1757-899X/971/2/022065.

22. A new method for the precise determination of rational geometric parameters of the helical groove and cutting part of high-performance tri-flute / P.M. Pivkin, A.A. Ershov, V.A. Grechishnikov, A.B. Nadykto // *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*: 3, Virtual, Online, 21–25 сентября 2020 года. – Virtual, Online, 2020. – P. 1154014. – DOI 10.1117/12.2574392.
23. Определение параметров инструмента в технологических системах обработки резанием / P.M. Хусаинов, А.Н. Головкин, С.М. Петров [и др.] // *СТИН*. – 2016. – № 10. – С. 17–20.
24. Pivkin, P. A new approach to edge modeling on the toroidal production surface of milling cutter / P. Pivkin // *The Samarskii readings (in memory of academician A.A. Samarskii)*, 22–25 декабря 2021 года. – Общество с ограниченной ответственностью Издательство «Янус-К», 2022. – P. 40–44.
25. Методика контроля точности кромок многолезвийных фрез с фасонной производящей поверхностью / П.М. Пивкин, В.А. Гречишников, А.А. Ершов [и др.] // *СТИН*. – 2022. – № S12-2. – С. 13–16.
26. A new method and practical recommendations for measuring geometric accuracy, linear and angular measurements of helical surfaces of end mill for HSM / P.M. Pivkin, A.M. Yazev, A.A. Ershov [et al.] // *Proceedings of SPIE: Optics, Photonics, and Digital Technologies for Imaging Applications VIII*, Strasbourg, France, 09–11 апреля 2024 года. – Strasbourg, France: SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2024. – P. 129981R. – DOI 10.1117/12.3022861.
27. An intelligent wheel position searching algorithm for cutting tool grooves with diverse machining precision requirements / Li G., Zhou H., Jing X., Tian G., Li L. // *Int. J. Machine Tools and Manufacture*. – 2017. – № 122. – P. 149–160. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2017.07.003
28. Big data-oriented wheel position and geometry calculation for cutting tool groove manufacturing based on AI algorithms / Li G., Liu Z., Lu J., Zhou H., Sun L. // *Int. J. Advanced Manufacturing Technology*. — 2022. — № 119. — P. 6717–6728. DOI: 10.21203/rs.3.rs-1029477/v1.
29. CC-CNN: A cross connected convolutional neural network using feature level fusion for facial expression recognition / Kadimi N.K.T., Kartheek M.N., Prasad M.V.N.K. // *Multimedia Tools and Applications*. – 2023. № 82. – P. 27619–27645. DOI: 10.1007/s11042-023-16433-3.
30. A Critical Review of Recurrent Neural Networks for Sequence Learning / Lipton Z.C. // *arXiv*. – 2015.
31. Efficient Traffic Sign Recognition Using Cross-Connected Convolution Neural Networks Under Compressive Sensing Domain / Xiong J., Ye L., Jiang D., [et al.] // *Mobile Networks and Applications*. – 2021. – Vol. 26. – P. 990–1002.

КОНТЕКСТНОЕ ПОНИМАНИЕ ТЕКСТА: ПОЧЕМУ BERT ПРЕВОСХОДИТ ТРАДИЦИОННЫЕ RNN/LSTM В АНАЛИЗЕ ЭМОЦИЙ

Л.О. Шарипков

ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

Анализ эмоциональной окраски текстов становится всё более важным для бизнеса, особенно в таких сферах, как клиентский сервис, маркетинг и управление репутацией. Традиционные модели, такие как RNN и LSTM, долгое время использовались для этих задач, но они имеют ограничения в точности анализа сложных эмоциональных сигналов, таких как сарказм или скрытое недовольство. Это снижает их эффективность в ситуациях, где требуется глубокое понимание контекста.

RNN и LSTM обрабатывают текст последовательно, что приводит к потере контекста при анализе длинных реплик. Они ориентируются на ключевые слова, а не на общий смысл текста, и не учитывают будущий контекст. Например, саркастическая фраза клиента может быть ошибочно классифицирована как положительная из-за наличия таких слов, как «спасибо» или «здорово помог».

Модель BERT значительно превосходит традиционные подходы благодаря своей способности анализировать текст целиком. Она учитывает предшествующий и последующий контексты, что особенно важно для задач анализа эмоций. Механизм внимания (Self-Attention) позволяет учитывать все элементы текста одновременно, включая эмоциональные противоречия. Кроме того, предобучение на больших объёмах данных делает BERT более точной при работе со сложными случаями, такими как сарказм и скрытые эмоции.

На практике эффективность BERT подтверждается результатами бенчмарка SemEval-2018. В задачах анализа эмоций в коротких текстах, насыщенных иронией и нестандартными формулировками, BERT показал значительно более высокую точность по сравнению с RNN и LSTM.

Выводы и рекомендации:

- Для задач с высокими требованиями к точности (например, управление репутацией) BERT является оптимальным выбором.
- Для менее критичных задач можно использовать RNN/LSTM, чтобы сбалансировать точность и вычислительные затраты.
- Выбор модели должен основываться на приоритетах: максимальная точность или экономическая эффективность.

СОДЕРЖАНИЕ

Авторы и названия

	Стр.
MEMORY OF NAJDAN ALEKSIC – PHYSICS AND MATHEMATICS	5
A. Arinstein	
IMITATION MODELING: THE BEHAVIOR ANALYSIS OF THE MIXTURE OF TWO OPPOSITELY CHARGED POLYELECTROLYTES WITH THE HELP OF A MACROSCOPIC MECHANICAL SYSTEM.....	6
S.T. Belyakin	
IONIC HOZHKIN-HASLEY MODEL OF THE III GENERATION IN A DISTRIBUTED EXCITIBLE MEDIUM FOR DESCRIBING A REACTION-DIFFUSION SYSTEM	7
N.M. Kuznetsova	
USIC NOTE RECORDING SYSTEMS AS STEGANOGRAPHIC CONTAINERS IN THE TASK OF ENSURING CONFIDENTIALITY OF ENTERPRISE INFORMATION RESOURCES	12
N.M. Kuznetsova, T.V. Karlova, A.Yu. Bekmeshov, A.S. Sheptunov, A.E. Tikhomirov	
PROTECTION OF INFORMATION RESOURCES OF THE ENTERPRISE BASED ON MODELING OF THE DATA SECURITY MANAGEMENT SYSTEM OF INTELLIGENCE-INTENSIVE PRODUCTS	15
V.D. Lakhno	
NANOBIOELECTRONICS AND QUANTUM CALCULATIONS	18
P.M. Lima and T. Sequeira	
NUMERICAL APPROXIMATION OF TWO-DIMENSIONAL STOCHASTIC NEURAL FIELD EQUATIONS WITH FINITE TRANSMISSION SPEED.....	19
Пхью Вэй Линн Phyo Wai Linn	
MODELING OF PHASE TRANSITIONS OF THE FIRST KIND IN DISPERSED MEDIA USING THE MODIFICATION OF THE HOSHEN- KOPELMAN ALGORITHM	20
A.I. Makars, N.V. Eliseeva	
APPLICATION OF SINGULAR VALUE DECOMPOSITION IN NEURAL MACHINE TRANSLATION OPTIMIZATION	22
M. Mosquera Mena, F. R. Freire Carrera	
MATHEMATICAL MODEL AND CONTROL OF AN INVERTED PENDULUM.	25
M. Mosquera Mena, F.R. Freire Carrera	
MATHEMATICAL MODEL OF AN INVERTED PENDULUM WITH TWO DEGREES OF ROTATION	40
E.I. Nikulin	
ON EXISTENCE AND ASYMPTOTIC STABILITY OF TWO-DIMENSIONAL PERIODIC SOLUTIONS WITH AN INTERNAL TRANSITION LAYER IN A PROBLEM WITH A FINITE ADVECTION	42
A.V. Shapovalov, A.E. Kulagin, S.A. Siniukov	
SEMICLASSICALLY LOCALIZED STATES IN SOME OPEN SYSTEMS WITH NONLOCAL INTERACTION	43
Ivan Stepanyan, Safa Hameed	
A COMPARATIVE OF FEEDFORWARD ANN EVOLUTIONARY MODEL IMPLEMENTATION TO ADDRESS THE RECOGNITION PROBLEM.....	45

O.V. Stikhova THE ENERGY SYSTEMS INDUSTRIAL PRODUCTION FACTOR DERIVATIVES MATHEMATICAL ESTIMATION MODEL	52
E.N. Terentiev, F.V. Shugaev, N.E. Shilin-Terentyev IMAGES OF GRAVITATIONAL WAVES FROM ACCRETION DISKS OF BLACK HOLES AND NEUTRON STARS EXPLOSIONS.....	53
E.N. Terentiev, F.V. Shugaev, N.E. Shilin-Terentyev GRAVITATIONAL LENSING + TELESCOPE + MATHEMATICAL MICROSCOPE IN THE STUDY OF THE INTERACTION OF THE QUINUPLET OF STARS, THE STRUCTURE OF NEUTRON STARS AND QUASARS	58
E.N. Terentiev, R.D. Gagarin, E.D. Balaban, D.R. Romanov, I.A. Shatscov RESULTS OF APPLICATION OF GRADIENT MORPHOLOGY METHODS.....	63
E.N. Terentiev, F.V. Shugaev, N.E. Shilin-Terentyev DIFFICULT TO INTERPRET OBJECTS OF TYPE 2 AND 3 CIVILIZATIONS	68
S.D. Traytak METHOD OF FRACTIONAL DERIVATIVES: APPLICATION TO THE SUBDIFFUSION-CONTROLLED REACTIONS IN THE COMB-LIKE STRUCTURES.....	73
G.D. Volkova, T.B. Tyurbeeva AN APPROACH TO MODELING THE LIFE CYCLE OF TECHNICAL SYSTEMS	76
А.Ф. Абена ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ.....	79
Е.Н. Аристова, Н.И. Караваева МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ С НЕПОДВИЖНЫМ ВЕЩЕСТВОМ ПРИ ПОМОЩИ БИКОМПАКТНЫХ СХЕМ	80
О.Д. Бибииков, О.Р. Волкова РАЗРЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ВИНЕРА-ХОПФА ПОСРЕДСТВАМ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛИНОМОВ ЭРМИТА И СИНТЕЗА ВХОДНОГО СИГНАЛА С СООТВЕТСТВУЮЩИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ	83
Е.А. Бувевич, О.Э. Яремко ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ ОБСЛУЖИВАНИЯ С РАЗДЕЛЕНИЕМ ПРОЦЕССОРА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СУПЕРСКАЛЯРНОГО МИКРОПРОЦЕССОРА.....	88
М.И. Булатов, Н.В. Елисеева ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТАМИ В ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ.....	93
А.В. Быстров, Н.В. Елисеева РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ПОДДЕРЖКИ АУДИТОРНОГО ФОНДА УНИВЕРСИТЕТА	98
Л.Ю. Васильева, Л.А. Уварова, Е.Ю. Романова ОБСУЖДЕНИЕ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И ФУНКЦИЙ БИОНАНОФЕРМЕНТАТИВНЫХ МЕТАЛЛСОДЕРЖАЩИХ КОМПЛЕКСОВ	101

Г.Д. Волкова, Т.Б. Тюрбева ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	105
Н.С. Воронин ПРИМЕНЕНИЕ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ КАРТ КОХОНЕНА ДЛЯ КЛАСТЕРИЗАЦИИ СЛОЖНЫХ ДАННЫХ	108
О.В. Гермидер, В.Н. Попов МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗГИБА ТОНКОЙ НАНОПЛАСТИНЫ В РАМКАХ ТЕОРИИ ГРАДИЕНТА ДЕФОРМАЦИИ ВТОРОГО ПОРЯДКА	109
Владимир Гречишников, Антон Язев, Михаил Прус, Азимжон Мирзомахмудов ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМ КОНИЧЕСКИХ ВИНТОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА	113
Е.А. Девятерикова МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ИДЕНТИФИКАЦИИ И ЦИФРОВИЗАЦИИ ЗАПАХА.....	124
И.Е. Доронин АЛГОРИТМ ПЛАНИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ.....	126
В.С. Дрякина МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА В 2D НАНОСИСТЕМАХ	131
Э.В. Завитаев, О.В.Русаков, Т.Э. Симонова ЛОКАЛЬНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ТОНКОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПРОВОЛОКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОБОБЩЕННОЙ МОДЕЛИ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ.....	135
Э.В. Завитаев, О.В. Русаков, А.И. Уткин, К.Е. Харитонов РАСЧЕТ САМОИНДУКЦИИ ТОНКОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПРОВОЛОКИ ИЗ МЕТАЛЛА	138
Э.В. Завитаев, О.В. Русаков, Т.Э. Симонова, А.И. Уткин ЛОКАЛЬНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ТОНКОГО СЛОЯ В СЛУЧАЕ НЕОДНОРОДНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ	140
Artem Ershov DEVELOPMENT OF A NEW COMPUTATIONAL ALGORITHM FOR CONVERTING THE MOVEMENTS OF A GRINDING WHEEL IN AN INSTRUMENTAL COORDINATE SYSTEM TO THE 4-AXIS KINEMATICS OF A CNC GRINDING MACHINE	144
М.Ю. Ибатуллин ВОЗМОЖНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ БЕСКОНЕЧНОГО СОЦИАЛЬНОГО ГРАФА СОТРУДНИКА	151
И.В. Иванов, О.К. Иванова МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГИГРОМЕТРА НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ.....	153
Г.Н. Иванов, И.В. Кривенко, М.А. Смирнова, С.Р. Испирян ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГИХ СВОЙСТВ ТОРФА ПРИ ПРОМЕРЗАНИИ С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАЗВУКА	156

Г.Н. Иванов, И.В. Кривенко, М.А. Смирнова, С.Р. Испирян ИССЛЕДОВАНИЕ САПРОПЕЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ ТРУБЫ.....	158
И.В. Кайкова, Н.В. Елисеева МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ ОЦЕНКИ ИНДЕКСА ЦИФРОВОЙ ЗРЕЛОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ	159
Н.М. Кузнецова ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НОТНЫХ СИСТЕМ ЗАПИСИ В КАЧЕСТВЕ СТЕГАНОГРАФИЧЕСКИХ КОНТЕЙНЕРОВ В РАМКАХ ЗАДАЧИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОНФИДЕНЦИАЛЬНОСТИ ИНФОРМАЦИОННЫХ РЕСУРСОВ ПРЕДПРИЯТИЯ.....	163
И.И. Колесниченко, Л.М. Балашова МНОГОФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ ПАТОГЕНЕЗА РЕТИНОПАТИИ БОЛЬНЫХ ДИАБЕТИЧЕСКОЙ АНГИОПАТИЕЙ И РЕТИНОПАТИЕЙ.....	166
И.А. Колесников СПЛАЙН-ИНТЕРПОЛЯЦИОННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ	171
М.Д. Коновалов ОБЗОР СИСТЕМ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ О СМЕНЕ ПОЛОСЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМ ПРЕДСКАЗАНИЯ ДВИЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ РЕКУРРЕНТНЫХ СЕТЕЙ	174
И.А. Концевой ВОЛНОВОЙ РЕЖИМ ВОЗМУЩЕНИЯ И МОРФОЛОГИЧЕСКИ УСТОЙЧИВЫЙ РОСТ ДЕНДРИТА В ПЕРЕОХЛАЖДЕННЫХ РАСПЛАВАХ НИКЕЛЯ И МЕДИ.....	182
Г.В. Кошкина, Е.Е. Фомина, У.А. Иванова ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И АВТОРСКОЕ ПРАВО: ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ	187
Л.А. Краснобасва, Л.В. Якушевич ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ КИНКОВ В КОЛЬЦЕВЫХ ДНК	188
Н.М. Кузнецова, Т.В. Карлова, А.Ю. Бекмешов, А.С. Шептунов, А.Э. Тихомиров ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИОННЫХ РЕСУРСОВ ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ДАННЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛОЕМКОЙ ПРОДУКЦИИ....	190
Д.И. Кулизаде, В.С. Скрипоченко, Р.О. Медов ДИСТАНЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ АДДИТИВНЫМИ СИСТЕМАМИ.....	193
А.В. Куницина, Л.А. Уварова, А.С. Мягков МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА В СИСТЕМЕ НАНОТРУБОК.....	195
Т.А. Ла ВЫВОД УРАВНЕНИЯ «ФУНКЦИЯ ТОКА И ВИХРЬ» ДЛЯ СТЕПЕННОЙ ЖИДКОСТИ ПРИ МАЛЫХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА	196
Л.И. Лапушкина О ПРОБЛЕМАХ ВНЕДРЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ОБРАЗОВАНИИ.....	201

Н.Т. Левашова, Е.А. Генералов, А.Э. Сидорова, А.Н. Гольцов ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОСТИ МОДУЛЬНОГО ТИПА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ КУЛЬТУРЫ ОПУХОЛЕВЫХ КЛЕТОК IN-VITRO.....	203
А.А. Лобко, О.Р. Волкова ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ПРОЦЕССА ФРЕЗЕРОВАНИЯ В ЗАДАЧАХ ОПТИМИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ	206
А.И. Лоскутов ВЛИЯНИЕ ЕСТЕСТВЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПОВЕРХНОСТИ СЛЮДЫ НА БИОСОПРЯЖЕНИЮ И ВТОРИЧНУЮ СТРУКТУРУ ПЕПТИДНОГО КОМПОЗИТА С НАНОЧАСТИЦАМИ ЗОЛОТА.....	211
А.О. Луценко, А.Э. Сидорова МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕЛКОВЫХ СУПЕРСПИРАЛЕЙ ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ХИРАЛЬНОСТИ.....	216
А.И. Макарс, Н.В. Елисеева ПРИМЕНЕНИЕ СИНГУЛЯРНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ В ОПТИМИЗАЦИИ НЕЙРОННОГО МАШИННОГО ПЕРЕВОДА.....	219
А.М. Мандель, В.Б. Ошурко, С.Г. Веселко, Е.Е. Карпова, А.А. Шарц КВАНТОВАЯ ТОЧКА КАК МОДЕЛЬ ВНУТРЕННЕГО ПРОСТРАНСТВА ЧАСТИЦЫ И ВИРТУАЛЬНЫЙ УРОВЕНЬ КАК РЕЛЯТИВИСТСКИЙ АРТЕФАКТ В УРАВНЕНИИ ШРЕДИНГЕРА.....	223
П.В. Москалев, А. Г. Буховец ОБ ОПТИМАЛЬНОМ ОБЪЕМЕ ВЫБОРКИ ПРИ ОЦЕНКЕ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ РАНДОМИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ИТЕРИРОВАННЫХ ФУНКЦИЙ	228
Т.Ю. Махина, Т.В. Рыжкова ОБ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОЕКТНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АНАЛИЗА ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ.....	232
А.Р. Махмудов, А.О. Орлов ДВИЖЕНИЕ ФРОНТА В ЗАДАЧЕ РЕАКЦИЯ-ДИФФУЗИЯ В СЛУЧАЕ БАЛАНСА РЕАКЦИИ И ДИФФУЗИИ	233
П.В. Москалев, А.С. Мягков О СВЯЗИ ПЕРЕХОДНЫХ ФУНКЦИЙ С ОЦЕНКАМИ МОЩНОСТИ СТЯГИВАЮЩИХ КЛАСТЕРОВ НА БЕТА-ВЗВЕШЕННЫХ КВАДРАТНЫХ РЕШЕТКАХ С (1, 0)-ОКРЕСТНОСТЬЮ	235
П.В. Москалев, В.Ф. Селиванов, А.С. Мягков, А.А. Краснов О ПЕРКОЛЯЦИОННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ РАСХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРИСТОГО ТИТАНА	240
А.С. Мягков, Л.А. Уварова, П.В. Москалев ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ СИМВОЛЬНОЙ РЕГРЕССИИ В ПЕРКОЛЯЦИОННЫХ ЗАДАЧАХ	244
К.М. Назаренко, Н.А. Коробов, П.Н. Марков, Е.С. Назаренко, А.Б. Надыкто МЕТОД ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО РАЗЛИЧЕНИЯ ИЗОМЕРОВ МОЛЕКУЛЯРНЫХ СТРУКТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТРИЦ РАССТОЯНИЙ.....	249

К.Э. Никитина-Кошкина, Г.В. Кошкина, Е.Е. Фомина, Н.А. Стукалова СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ МЕТОДА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА	254
В.К. Нуриев, Е.М. Красикова АНАЛИЗ РЕНТГЕН-СНИМКОВ ГРУДНОЙ КЛЕТКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ АППАРАТА ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ	256
В.Б. Ошурко, А.Ф. Бункин, С.М. Першин, И.И. Демилханов НЕЛИНЕЙНАЯ ОПТИКА ВИРУСОВ: О ВОЗМОЖНОСТИ ВЫСОКОИЗБИРАТЕЛЬНОГО IN VIVO ВОЗБУЖДЕНИЯ ДАННОГО ВИРУСА	260
А.Р. Преображенская МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА СИГНАЛОВ В БИОНЕЙРОННОЙ СЕТИ НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ГАМИЛЬТОНОВЫХ УРАВНЕНИЙ	261
С.В. Петухов ВРОЖДЕННЫЙ КОЛЛЕКТИВИЗМ ЧАСТЕЙ В ОРГАНИЗМЕ, ГЕШТАЛТ- АРХЕТИПЫ ВЕРОЯТНОСТЕЙ В ГЕНОМНЫХ ДНК И ЦИКЛИЧЕСКИЕ КОДЫ ГРЕЯ	263
Petr Pivkin ON SHAPED SURFACES WITH CONSTANT GEOMETRIC CHARACTERISTICS AT THE BOUNDARY OF A NONLINEAR GENERATRIX	269
О.Е. Пыркина, А.Ю. Юданов МАРКОВСКАЯ МОДЕЛЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНКАПСУЛИРОВАННОГО ЗНАНИЯ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ФИНАНСОВЫМ ИНСТИТУТОМ	280
Н.Г. Рогозина РАСЧЕТ ИНДЕКСА МОРСА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ОРБИТАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ШРЕДИНГЕРА НА ГРАФЕ-ЗВЕЗДЕ	284
Я.А. Романов УГЛУБЛЕНИЕ ЗНАНИЙ В СФЕРЕ КИБЕРБЕЗОПАСНОСТИ В ПРОЦЕССЕ ШКОЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ	286
Е.Ю. Романова ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМ И ИХ ИЗМЕНЕНИЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ	288
Т.В. Рыжкова ЭНТРОПИЙНАЯ ОЦЕНКА «ПОЛЕЗНОЙ ИНФОРМАЦИИ» О ФИНАНСОВОМ СОСТОЯНИИ ПРЕДПРИЯТИЯ	291
В.Н. Самойлов, А.И. Мусин, П.В. Аристархов АНАЛИТИЧЕСКИЕ И МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ БЛОКИРОВКИ АТОМОВ ПРИ ЭМИССИИ С ПОВЕРХНОСТИ ГРАНИ (001) Au	292
А.Э. Сидорова, Н.Т. Левашова АВТОВОЛНОВАЯ МОДЕЛЬ РАЗВИТИЯ УРБООКОСИСТЕМ КАК СЛОЖНЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ	295
Д.М. Силантьев МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕЗО- И НАНОСИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ КАТАСТРОФ	301

Е.Н. Сосенушкин, Е.А. Яновская, А.С. Желнов К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ ВЫБРАННОГО МАТЕРИАЛА НА ФРАКТАЛЬНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ ПРИ МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ МЕТОДАМИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА	303
Д.О. Стукалов, Н.А. Стукалова, М.А. Смирнова ПОИСК ИНЦИДЕНТНЫХ РЕБЕР ДЛЯ СМЕЖНЫХ ВЕРШИН В РАЗРЕЖЕННОМ ГРАФЕ	307
Д.О. Стукалов, Н.А. Стукалова, Г.В. Кошкина, Л.В. Семилетова, А.А. Гусаров ГЕНЕРАЦИЯ КОНФИГУРАЦИЙ ДЛЯ ТАЙНТ АНАЛИЗА С ПОМОЩЬЮ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ.....	310
Т.А. Сушкевич ЭПОХА М.В. КЕЛДЫША: ОТ "МАТЕМАТИКА – ЦАРИЦА ВСЕХ НАУК" ДО "МАТЕМАТИКА – ПРОИЗВОДИТЕЛЬНАЯ СИЛА" И ЦИФРОВОЙ ЦИВИЛИЗАЦИИ. 300-ЛЕТИЮ АКАДЕМИИ НАУК ПОСВЯЩАЕТСЯ	311
Ю.Ю. Тарасевич, А.В. Есеркенов, И.В. Володзкая ЭФФЕКТИВНАЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СЕТЕЙ НАНОПРОВОДОВ: ПОДХОДЫ СРЕДНЕГО ПОЛЯ, ЭФФЕКТИВНОЙ СРЕДЫ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.....	318
В.В. Филатов, М.В. Чумаева, Д.А. Николаев РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ И КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО синхронного ДВИГАТЕЛЯ	321
Е.Е. Фомина МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ СУДЕБНО-МЕДИЦИНСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЛИЧНОСТИ ПО ПРИЗНАКАМ ПОХОДКИ	324
А.А. Хвостов, С.Ю. Панов, С.А. Косухин, А.В. Рязских, А.А. Богер МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В КАНАЛАХ ТЕПЛОВЫХ АККУМУЛЯТОРОВ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ КОНТЕЙНЕРАМИ	326
Н.Н. Холщевникова СИСТЕМЫ ФУНКЦИЙ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ.....	331
О.Н. Шабловский, Д.Г. Кроль КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ НА ЛИНИИ РОСТА ДЕНДРИТА В ПЕРЕОХЛАЖДЕННОМ РАСПЛАВЕ ЧИСТОГО ВЕЩЕСТВА	335
Е.Ю. Щетинин ОБНАРУЖЕНИЕ ОБЪЕКТОВ В ИЗОБРАЖЕНИЯХ ИНФРАКРАСНОГО СПЕКТРА С ПОМОЩЬЮ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ..	341
М.Н. Шипко, Т.П. Каминская, М.А. Степович, Е.С. Савченко, А.В. Стулов О ВЛИЯНИИ СЛАБЫХ ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ	342
А.В. Юркин НОВОЕ О ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ТРАЕКТОРИЯХ ЧАСТИЦ: «НЕЛИНЕЙНЫЙ ТРЕУГОЛЬНИК ПАСКАЛЯ» И «МЕТЛА ЮРКИНА»	347
О.Э. Яремко, К.Р. Забабурин МЕТОД ГОМОТОПНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ВОЛНОВОГО УРАВНЕНИЯ С НЕЛОКАЛЬНЫМИ МЛАДШИМИ ЧЛЕНАМИ	352

М.Р. Палванов ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ДИСПЕРСНОЙ СРЕДЫ НА АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ.....	355
А.Ф. Абена ОБНАРУЖЕНИЕ ДЕФЕКТОВ В ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛАХ: НОВАЯ ЭРА БЛАГОДАРЯ НЕЙРОННЫМ СЕТЯМ	358
Н.С. Воронин МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ВАЖНОСТИ ПРИЗНАКОВ: ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОДХОДОВ SHAP И LIME	359
К.Г. Игрушин, А.В. Соколов ЗАЩИТА АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ОТ ВРЕДНОСНЫХ АТАК: ПРОТОКОЛ АУТЕНТИФИКАЦИИ ДОСТУПА НА ОСНОВЕ QRNG	360
К.Г. Игрушин, А.В. Соколов ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ЭКСТРАКЦИИ СЛУЧАЙНОСТИ ИЗ КВАНТОВОГО ИСТОЧНИКА В УСЛОВИЯХ НИЗКОГО ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ/ШУМ	365
М.Д. Калинин ОПТИМИЗАЦИЯ СКЛАДСКОЙ ЛОГИСТИКИ НА ОСНОВЕ ГРАФОВЫХ МОДЕЛЕЙ.....	370
М.Д. Калинин МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И РЕШЕНИЕ ЛОГИСТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ НА СКЛАДЕ КОМПАНИИ	371
А.В. Ныров ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ	373
А.В. Ныров ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМАХ....	374
В.С. Трошин РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ В ДНК-ВЫЧИСЛЕНИЯХ	375
А.А. Шайдуллов РЕШЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ В ЧАСТНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ МЕТОДАМИ НЕЙРОСЕТЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	376
А.А. Шайдуллов РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УРОВНЕЙ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ	377
Мурад Шалбузов, Антон Язев РАЗРАБОТКА НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ НА МНОГОКООРДИНАТНОМ ШЛИФОВАЛЬНОМ СТАНКЕ	378
Л.О. Шарипков КОНТЕКСТНОЕ ПОНИМАНИЕ ТЕКСТА: ПОЧЕМУ BERT ПРЕВОСХОДИТ ТРАДИЦИОННЫЕ RNN/LSTM В АНАЛИЗЕ ЭМОЦИЙ	385

Моделирование нелинейных процессов и систем

Материалы 8 международной конференции

The modeling of nonlinear processes and systems

The 8 International Scientific Conference (MNPS-2024)

Conference proceedings

Под редакцией Л.А. Уваровой

Сдано в набор 29.04.2025. Подписано в печать 12.05.2025.

Формат 60х90 1/16. Бумага офсетная №1.

Уч.-изд. л. 25. Физ. п. 24.625. Тираж 300. Заказ №3284

Издательство «Янус-К»,

127411, г.Москва, Учинская ул. д.1

Отпечатано в ООО «ИНФОРМ-СОФТ»

119034, Москва, Еропкинский пер., д.16

ISBN 5-8037-0974-3



9 785803 709749