

Дорогие коллеги!

Вы держите в руках 100-тый выпуск нашего совместного творчества – сборник научных трудов «Системные технологии». Начав издание сборника в далёком уже 1997 году под руководством академика НАН Украины, доктора технических наук, профессора Тарана – Жовнира Юрия Николаевича - человека, несомненно прозорливого, предвещавшего уже тогда долгую и счастливую судьбу нашего сборника, мы все надеялись, что сборник «Системные технологии» принесёт пользу учёным нашей академии, а тогда ещё легендарного, ордена Трудового Красного Знамени Днепропетровского металлургического института, известного во всём мире как ДМеТи. Однако никто из нас тогда не думал, что будет не только первый выпуск, но и сотый.

За эти годы сборник из издания с одним выпуском в год превратился в Региональный сборник научных трудов с шестью ежегодными выпусками, каждый из которых посвящён одному из научно-технических направлений, таких как, например: «Системное моделирование технологических процессов», «Прогрессивные технологии получения материалов», «Системные технологии обработки информации» и т.п.

В свою очередь, сборник «Системные технологии» стал специализированным изданием МОН Украины, получил международный префикс периодического издания ISSN, прошёл регистрацию в Государственном комитете телевидения и радиовещания Украины, вошел в ряд науко-метрических баз, в частности, в базу Index Copernicus International. С начала 2000-х сборник реферируется в украинском РЖ «Джерело», полнотекстово представляется в электронной базе Национальной научной библиотеки им. В.И. Вернадского..

С 2012 года сборник имеет своё электронное лицо - сайт: <http://st.nmetau.edu.ua>, где полнотекстово размещены статьи сборника за 10 предыдущих лет, включая и их английские версии. Это позволяет научной общественности, в том числе международной, в полной мере оценить глубину и научный вклад учёных академии и региона в развитие и внедрение инновационных идей в науку и промышленность.

100 – это не предел! Редакция надеется, что все мы ещё будем держать в руках и 200-тый выпуск нашего издания – «Системные технологии».

Редколлегия

K.S. Krasnikov, S.E. Samokhvalov, V.P. Piptyuk

**THE MATHEMATICAL MODEL OF THE CORED WIRE
INJECTION IN THE MOLTEN STEEL DURING BLOWING
ON THE LADLE-FURNACE**

Abstract. The mathematical model of the industrial process is presented. Three-dimensional movement of the wire, one-dimensional melting of the wire with a crust and three-dimensional movement of the molten steel with powder averaging in it is taken into account. The mathematical model is implemented in the computer program to check its quality and to make computational experiments.

Keywords: nonlinear system, three-dimensional space, computer model, cored wire, powder, molten steel, furnace-ladle.

Introduction

Cored wire injection is a modern method of molten steel refining. Finding of rational technological parameters of this process is expensive in industrial and laboratory experiments. This paper presents a mathematical model for numerical experiments on the computer, which are cheaper and widely used today.

Related work

In work [1] the authors considered the thermodynamics of wire in the cross-section with the crust of slag and steel. In [2] the authors neglected appearance of the crust. We think that thermodynamics is not enough to reproduce the process of wire injection, because in addition to wire melting there are three-dimensional motion of the wire and powder averaging affected by hydrodynamics during gas blowing. In [3] a three-dimensional mathematical model of the wire motion was implemented in the computer program and the adequacy of the model was tested, but ability of free movement of wire's part was not taken into account. In [4] a three-dimensional model of granule melting with crust was created – we will use it for one-dimensional wire melting. In [5] suitable to our problem three-dimensional model of the hydrodynamics was constructed in cylindrical coordinates and the results of numerical experiments were

presented. The authors of the work [6] offered own method of cored wire input, in which the parts of the wire can disconnect – in this article we will take the free movement of these parts into account.

Mathematical model

The article aims to build a model of cored wire injection in the melt during blowing on ladle-furnace. Given the complexity of model we will build it by solving the following tasks:

1) The problem of three-dimensional motion of cored wire, as a system of solids. A three-dimensional solution is needed to determine the trajectory and coordinates of powder`s or wire`s part release;

2) One-dimensional problem of wire melting with crust appearance. Given the small thickness of the wire shell (~ 1 mm), heat flow along the wire is neglected;

3) The problem of three-dimensional motion of the molten steel and powder averaging in it. Different locations and number of blowing tuyeres cause the finding of three-dimensional velocity field of the melt.

Let's go to first problem. Cored wire is modeled by chain of rods. The force of hydrodynamic resistance of the melt, the force of gravity, the buoyancy and force of bending elasticity act on the rods. Schematically chain of rods is shown in Figure 1. Reference point is a ladle bottom center.

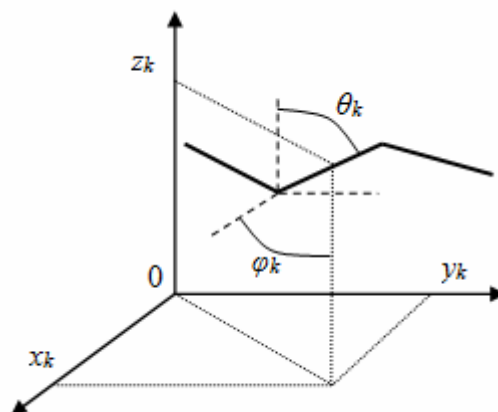


Fig. 1. Cartesian and spherical coordinates of k -th rod

Assumptions:

- 1) The wire is unstretchable and incompressible;
- 2) The torsion of the wire is neglected;
- 3) The angles between the rods are small, so Hooke's law performs when wire bends;

4) The melt's resistance to rod rotation is neglected and only the component of velocity, which is perpendicular to rod, is taken into account to determine the resistance;

The dynamics of the rod's system is determined by Lagrange equations of the second kind [3, 7, 8], taking into account the potential and dissipative forces:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial T}{\partial q_i} = - \frac{\partial U}{\partial q_i} + \tilde{Q}_i \quad i = \overline{1, S} \quad (1)$$

where T and U – respectively the kinetic and potential energy of the rod system, $\tilde{Q}_i$ – generalized dissipative forces, q_i – generalized coordinates. We choose angles of a spherical coordinate system as generalized coordinates: polar θ and azimuthal ϕ . Number of freedom degrees S is dual count of rods.

The kinetic energy T (1) is determined using Cartesian coordinates of the centers of rods masses and their velocities expressed in generalized coordinates θ and ϕ :

$$\begin{aligned} x_k &= x_0 + l \sum_{j=1}^{k-1} \sin \theta_j \cos \phi_j + \frac{l}{2} \sin \theta_k \cos \phi_k, \\ y_k &= y_0 + l \sum_{j=1}^{k-1} \sin \theta_j \sin \phi_j + \frac{l}{2} \sin \theta_k \sin \phi_k, \\ z_k &= z_0 + l \sum_{j=1}^{k-1} \cos \theta_j + \frac{l}{2} \cos \theta_k, \\ v_k^x &= v_0^x + l \sum_{j=1}^{k-1} (\omega_j \cos \theta_j \cos \phi_j - \sigma_j \sin \theta_j \sin \phi_j) \\ &\quad + \frac{l}{2} (\omega_k \cos \theta_k \cos \phi_k - \sigma_k \sin \theta_k \sin \phi_k), \\ v_k^y &= v_0^y + l \sum_{j=1}^{k-1} (\omega_j \cos \theta_j \sin \phi_j + \sigma_j \sin \theta_j \cos \phi_j) \\ &\quad + \frac{l}{2} (\omega_k \cos \theta_k \sin \phi_k + \sigma_k \sin \theta_k \cos \phi_k), \\ v_k^z &= v_0^z - l \sum_{j=1}^{k-1} \omega_j \sin \theta_j - \frac{l}{2} \omega_k \sin \theta_k, \\ T &= \sum_{k=1}^N \left[\frac{m_k}{2} (v_k^{x^2} + v_k^{y^2} + v_k^{z^2}) + l^2 \frac{m_k}{24} (\omega_k^2 + \sigma_k^2 \sin^2 \theta_k) \right], \end{aligned} \quad (2)$$

where ω and σ – angular velocities for the angles θ and φ respectively, m_k – weight of k -th rod, l – length of the rod.

The potential energy of the system (1):

$$U = \sum_{k=1}^N \left[g \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_k} \right) m_k z_k + \frac{\kappa_k}{2} (\Delta_k - \psi_k)^2 \right],$$

where g – gravitational acceleration, ρ_0 and ρ_k – respectively melt density and average density of the k -th rod (ρ_0 depends on the rod location – steel, slag, air), κ_k – coefficient of elasticity in the compound of $(k-1)$ -th and k -th rods, Δ_k – angles between them, ψ_k – angles of permanent deformation. Assuming that the angles Δ_k are small, we define them using the formula:

$$\Delta_k^2 = \Delta \theta_k^2 + \Delta \varphi_k^2 \sin^2 \theta_k,$$

where $\Delta \theta_k = \theta_k - \theta_{k-1}$, $\Delta \varphi_k = \varphi_k - \varphi_{k-1}$.

Let's find the generalized forces of resistance $\tilde{Q}_i$ (1):

$$\tilde{Q}_i = \sum_{k=1}^N \vec{f}_k \cdot \frac{\partial \vec{r}_k}{\partial q_i},$$

where $\vec{r}_k$ – the radius-vector of the center of k -th rod mass with coordinates x_k, y_k, z_k . Let $\vec{w}_k$ be the velocity of the mass center of the k -th rod relative to the melt, and $\vec{l}_k$ – the direction of the rod, then let's define the resistance and rod's perpendicular velocity component:

$$\vec{f}_k = -C_x \frac{\rho w_k^\perp \vec{w}_k^\perp}{2} A,$$

$$\vec{w}_k^\perp = \vec{w}_k - (\vec{l}_k \cdot \vec{w}_k) \vec{l}_k / l^2,$$

where C_x – dimensionless drag coefficient, ρ – density of the melt, A – area of longitudinal section of the rod (rod's diameter multiplied by rod's length).

The system (1) is not solvable analytically after differentiating, therefore, to get the numerical solution let's divide the time axis into layers and replace derivatives by corresponding velocities and accelerations, suggesting their constancy at each time step. We have obtained a system of linear algebraic equations in which the number of unknown angular accelerations equals the number of equations. We use classical iterative Gauss-Seidel method to solve the system. The rod's angles and

speeds for the next time step is determined from the Euler-Cromer method:

$$\begin{aligned}\omega_k^{n+1} &= \omega_k^n + \alpha_k^n \Delta t, \\ \sigma_k^{n+1} &= \sigma_k^n + \beta_k^n \Delta t, \\ \theta_k^{n+1} &= \theta_k^n + \omega_k^{n+1} \Delta t, \\ \phi_k^{n+1} &= \phi_k^n + \sigma_k^{n+1} \Delta t,\end{aligned}$$

where (n+1) – the next time step, α and β – angle accelerations for θ and ϕ respectively, Δt – time step.

The above solution of the problem takes into account the change in the current number of rods. The length of the wire's part in the melt increases with constant injection speed v_0 . The extending of this part is doing by the addition of the rod at the wire's entry point in the time step, which is defined as the ratio of the rod length l and input speed v_0 .

Let's pay attention to the components x_0 , y_0 , z_0 in (2), and let's state that they depend on the input angles and known input wire speed v_0 , so they are easy to identify in time. But if part of wire has been disconnected and moves independently in the melt [6], then the components x_0 , y_0 , z_0 in (2) is unknown. For this case we have new three generalized coordinates (x_0 , y_0 , z_0) in the mathematical model and after differentiation of equations (1) we obtain a new system with increased number of equations by three and unknowns $\dot{x}_0$, $\dot{y}_0$, $\dot{z}_0$. So in this way the free movement of the disconnected part has been considered.

Space for the wire's motion is restricted by bottom and walls of the ladle. Let's assume that taking into account the coordinates of rod mass center is sufficient for collision detection, so let's set impact conditions of the rod with a ladle and determine the angular velocity, which recovered after collision:

$$x_k^2 + y_k^2 > R^2 \rightarrow \begin{bmatrix} \omega_k = \frac{b}{l} (v_k^x \cos \theta_k \cos \phi_k - v_k^y \cos \theta_k \sin \phi_k) \\ \sigma_k = \frac{b}{l} (v_k^x \sin \theta_k \sin \phi_k - v_k^y \sin \theta_k \cos \phi_k) \end{bmatrix},$$

$$z_k < 0 \rightarrow \omega_k = \frac{b}{l} v_k^z \sin \theta_k,$$

where R – ladle radius, b – the coefficient of restitution of angular velocity.

Thus three-dimensional model of the wire's motion was built. Now we turn to the problem of melting.

The mathematical model of rod's melting is based on the finite-volume method in cylindrical coordinate system [4]. We introduce the following assumptions:

- 1) The heat flow along the wire is neglected and only radial flow is considered;
- 2) The break of crust under internal pressure and possible removing of the crust's pieces are ignored;
- 3) The movement of substance inside the wire is neglected;
- 4) We assume that the liquid material of the wire is mixed with molten steel instantly.

Let's assume that areas with homogeneous material occur in wire during melting. All areas consist of finite volumes. We will determine the flow of heat on the faces of volumes. Let's consider these areas (Fig. 2):

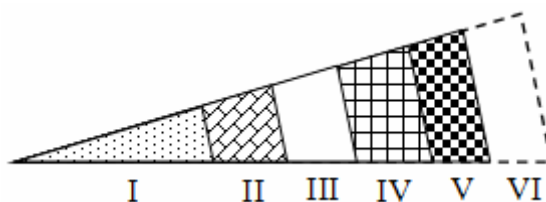


Fig. 2. Areas in schematic cross section of the cored wire (I – powder, II – wire's shell, III – shell's liquid material, IV – crust of melt, V – crust formation, VI – molten slag or steel)

I. Area of powder that has own thermal properties (eg low thermal conductivity);

II. Area of solid wire shell (usually thin);

III. Area of liquid material of the shell. This area occurs when shell material becomes liquid – heated above T_L^S (the liquidus temperature of shell's material).

IV. Area of melt's crust expands layer by layer when cold (with respect to melt) surface of the wire causes rapid heat loss in a thin layer of on-surface melt and then solidification at a temperature below T_S^M (the solidus temperature of the melt).

V. Area of crust formation has a thickness in one finite volume and is always on the surface of the wire.

VI. Ambient environment of the wire. It may be the atmosphere if the wire lies on the slag. This may be molten slag, steel or their interface, depending on the location of the wire in a given time. Thermo- and hydrodynamics is taken into account by the empirical heat transfer coefficient.

Next we will define heat flows. At the edge of areas V and VI we have convective boundary condition (III type):

$$q = \alpha \cdot S \cdot (T - T_p),$$

where α – the heat transfer coefficient, S – the area of volume face, T_p – the temperature of the melt, T – temperature in surface volume.

At the edge of areas IV and V it is a diffusion heat flow, as measured by Fourier law:

$$q_i = \lambda \cdot S \cdot (T_{i-1} - T_i) / L,$$

where λ – thermal conductivity, which is determined by the harmonic mean of corresponding thermal conductivities of neighboring cells [9], S – the area of volume face, L – distance between the centers of volumes, T_i and T_{i-1} – temperatures of corresponding volumes. Also, the law determines the thermal diffusion flows inside wire.

The heat of phase transition of the volume material included in the effective heat capacity [10].

Over time, temperature of volume material reaches the melting point of the crust and melt fills corresponding volumes. However, some volumes can have the remaining solid material inside and crust can appear again.

After shell's melting the powder enters the steel and increases the concentration in the appropriate place of the ladle. Corresponding rod is removed. If rod has been melted in the middle of the chain, then we disconnect part of the chain and its calculation takes the free movement into account.

Thus one-dimensional problem of wire's melting is solved with crust appearing. The advantage of the finite-volume method is conservative difference scheme. Next let's consider hydrodynamics.

We will solve the problem of molten steel motion and powder averaging using known Navier-Stokes equations and convection-diffusion equation with the following assumptions [5]:

1) The molten steel is a homogeneous viscous incompressible Newtonian fluid;

2) The ladle has the shape of a cylinder;

3) The melt surface is smooth and only the dynamic pressure is considered;

4) The influence of the powder's and wire's movement to the melt hydrodynamics is neglected;

$$\begin{aligned}\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} &= -(\vec{v} \cdot \nabla) \cdot \vec{v} + \nu \Delta \vec{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p, \\ \nabla \cdot \vec{v} &= 0, \\ \frac{\partial c}{\partial t} &= \nabla \cdot (D \nabla c) - \nabla \cdot (\vec{v} c),\end{aligned}$$

where $\vec{v}$ – velocity vector field, ∇ – Del operator, Δ – vector Laplace operator, t – time, ν – kinematic viscosity coefficient, ρ – density, p – pressure field, c – concentration field of powder, D – diffusion coefficient.

On the boundaries of calculation area we set no-flow and partial slip conditions. Also, these conditions can be set inside ladle. We are solving above equations numerically in cylindrical coordinates by finite difference method in following steps:

1) The computation of the velocity field (without pressure field);

2) The calculation of the pressure field using the divergence of velocity field;

3) The projection step corrects the velocity field using the pressure field (satisfying the continuity equation);

4) The calculation of the powder concentration field using the new velocity field.

The computation of these steps was done using the explicit scheme in time. The condition for the ending of simulation is reaching 2% in coefficient of powder concentration variation.

So we have solved three problems. Each task is doing its computation simultaneously in time. The possibility of different time step values for them is taken into account. Fig. 3 shows the exchange of results between tasks at each time layer.

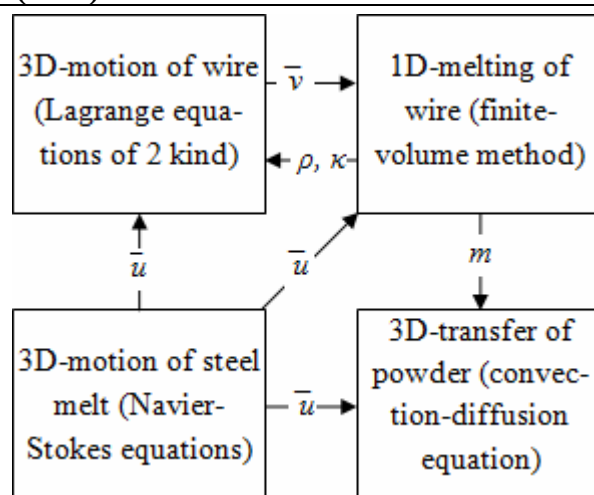


Fig. 3. The system of problems and relations between them:

$\vec{v}$ – rod velocity, κ – coefficient of elasticity in connecting rods,
 ρ – density of the rod, $\vec{u}$ – melt velocity field,
 m – mass of powder that is released from the wire

The computer program “Primat” was created for the numerical experiments. General flowchart of algorithm is shown in Fig. 4. Apart shown in figure the user interface allows the calculation pausing, to change the viewpoint or color of 3D-field. During the calculation the program displays the current state of the model, namely shows cored wire, sections of three-dimensional velocity field and powder, minimum and maximum powder concentration in the ladle. So, getting all the information about the state of the model, it is convenient to check. For example, hydrodynamics can be checked by the following indicator: the powder mass in the melt should remain constant over time for a given order of accuracy (starting calculation with predefined mass in melt).

Conclusions

Thus, problems of nonlinear dynamics of solids in Lagrange variables and nonlinear dynamics in continuum Euler variables are solved numerically. Also the one-dimensional problem of cylinder melting with crust appearing is solved. Usage of spherical coordinate system for cored wire implicitly considers reaction of rod to rod connections, which guarantees the continuity of the rod's chain. Hydrodynamics model uses a cylindrical coordinate system, which naturally matches the shape of the ladle. Three-step scheme for velocity field computation was used to satisfy the continuity equation.

The mathematical model reproduces the industrial process starting from cored wire injection under the level of the melt and finishing by powder averaging during inert gas blowing. The computer program allows to make experiments, to observe the model state. Computational part of the program can be used on the high-performance computers. The mathematical model is the basis for further improvement and incorporation of neglected phenomena.

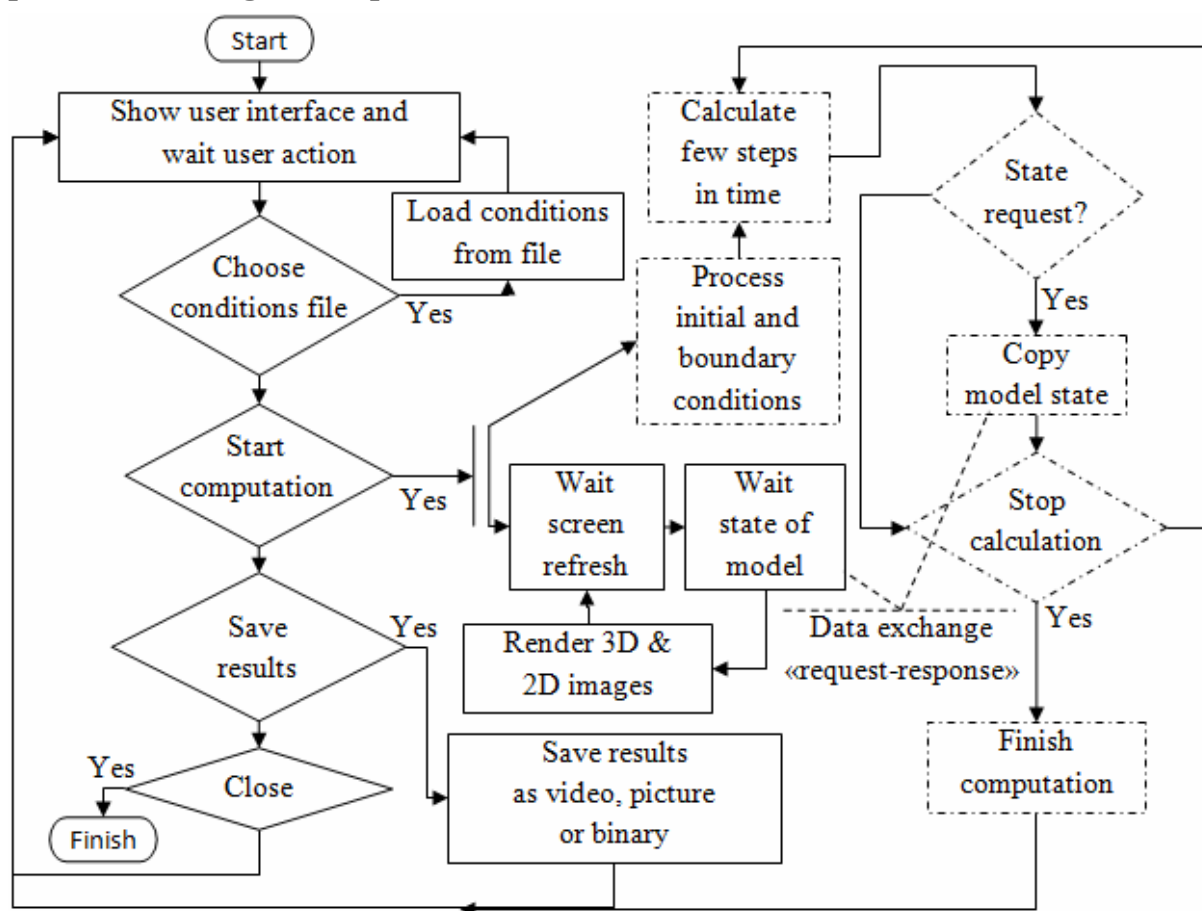


Fig. 4. General flowchart of the computer program “Primat”. Dash-marked blocks is computational part of the program that calculates mathematical model separately from the user interface

REFERENCES

1. Sanyal S., Chandra S., Kumar S., Roy G. G. An Improved Model of Cored Wire Injection in Steel Melts // *ISIJ International*, vol. 44. – 2004. – № 7. – P. 1157–1166.
2. Ryabov A.V., Nevolin D.V., Potapov V.I. Mathematical modelling of melt processing with cored wire // *Bulletin of the South Ural University, Series “Metallurgy”*, vol 13. – 2013. – № 1, – P. 194-198 (in russian).

3. Krasnikov K.S., Samokhvalov S.E., Piptyuk V.P. The computer model of three-dimensional motion of the steel wire in the melt on the ladle-furnace // Mathematical modeling. – 2013. – № 2(29). – P. 95-98 (in ukrainian).
4. Krasnikov K.S., Samokhvalov S.E., Piptyuk V.P., Andrievskyi G.A. The mathematical model of asymmetrical melting of easily fusible supplement // Mathematical modeling. – 2014. – № 2(31). – P. 47-50 (in ukrainian).
5. Samokhvalov S.E., Sokol A.M. The mathematical modeling of transfer processes in the converter. Monograph // Dniprodzerzhinsk: DSTU. – 2013. – 99 p (in ukrainian).
6. Tarasyuk L.I., Morneva V.V., Kazachkov E.O. The method of introduction of wire, stripe into iron-carbon melt // Bulletin of Pryazovskyi State Technical University, Series “Technical sciences”. – 2013. – № 26, – P. 57-61 (in russian).
7. Fedorchenko A.M. Theoretical physics. Mechanics // Kyiv: High School Publishing. – 1971. – P. 76-80 (in ukrainian).
8. Gantmakher F.R. Analitical mechanics lections. Learning book for high schools // M.:Fizmatlit. – 2005. – 3 ed. – P. 37-57 (in russian).
9. Patankar S. Numerical heat transfer and fluid flow // New York: Hemisphere Publishing Corporation. – 1980. – P. 44.
10. Ogurtsov A.P., Samokhvalov S.E., Nadrygailo T.Z. Methods of splitting in problems of hydrodynamics and thermomass transfer // Dnepropetrovsk: System technologies. – 2003. – 174 p. (in russian).

К.Ф. Чмырков, Е.Н. Сигарев, Л.С. Молчанов, Е.В. Синегин
**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
КАРБИДОКРЕМНИЕВЫХ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ
БРИКЕТОВ**

Аннотация. Статья посвящена актуальной проблеме исследования теплофизических свойств брикетов карбидкремния-железосодержащих. В ней представлена математическая модель зависимости коэффициента теплопроводности от состава брикетов. Для наиболее удачного состава карбидокремниевых железосодержащих брикетов определены технологические свойства.

Ключевые слова: карбид кремния, шлам, шихта, коэффициент теплопроводности, математическая модель, служебные свойства

Постановка проблемы

Третье тысячелетие требует кардинального реформирования производственного процесса в целом и особенно технологических операций по производству стали, как одной из его составляющих. Повышение эффективности и снижения себестоимости конечной продукции на современных металлургических предприятиях достигается за счет внедрения инновационных технологических процессов или применения принципиально новых шихтовых материалов. Поэтому, в мировой практике широкое распространение получили синтетические шихтовые материалы, среди которых особое место занимает комплекс материалов содержащих карбид кремния.

Анализ последних исследований и публикаций

Известно о широком применении материалов содержащих карбид кремния при производстве стали в электрических печах [1, 2], кислородных конвертерах [3, 4] и в процессе внепечной обработке [5, 6]. Карбид кремния является синтетическим материалом, производство которого требует значительных энерго- и ресурсозатрат, поэтому на данный момент актуальной является замена чистого карбида кремния на производственные отходы (карбидный шлам, пыль и т.д.).

Цель и задачи исследований

Учитывая, что технологические свойства материалов на базе шламов содержащих карбид кремния является малоизученными, то целью данного исследования является уточнение теплофизических характеристик брикетов карбидокремниевых железосодержащих (БКЖС).

Основная часть

Изучение теплофизических свойств БКЖС заключалось в определении функциональной зависимости коэффициент теплопроводности от химического состава и температуры. Решение такого рода задач в научно-исследовательской деятельности требует применения метода «Полного факторного эксперимента» [7]. В ходе проведения исследований содержание составляющих компонентов БКЖС изменялось в следующих диапазонах, % по массе: цемент – 10, карбидный шлам – 10-80, прокатная окалина 10-80 (были исследованы следующие содержания 10, 30, 45, 60 и 80 % по массе); температура изменялась в пределах 100 – 1600 °С (шаг изменения 100 °С).

Экспериментальное исследование теплопроводности БКЖС проводили методом полого цилиндра со стационарным тепловым потоком, генерируемым электрическим током [8]. В этом случае коэффициент теплопроводности рассчитывают по формуле:

$$\lambda = \frac{\ln \frac{r_1}{r_2}}{2\pi \cdot l_{об}} \cdot \frac{Q_{эл}}{T_2 - T_1}, \text{ (Вт/м·К)} \quad (1)$$

где T_2 – температура горячей поверхности образца с радиусом r_2 , К;

T_1 – температура холодной поверхности образца с радиусом r_1 , К;

$Q_{эл}$ – тепловой поток, проходящий через слой исследуемого вещества, Вт;

$l_{об}$ – высота образца, м.

Экспериментальная установка (рисунок 1) состоит из центрального образца 1 и двух симметрично расположенных теплоизолирующих надставок 2. Образцы в виде цилиндра диаметром 70 мм и высотой 100 мм с центральным отверстием диаметром 14 мм вырезали из готовых брикетов, выполненных из смеси цемента, прокатной окалины и карбидного шлама состав которых приведен в таблице 1. В образце и верхней надставке выполнены отверстия для ввода термопар 8. Цепь измерения состоит из вольфрам-рениевых термопар

ВР 5/20, установленных на внутренней и наружной поверхностях исследуемого образца, и мультиметров DT – 838.

Таблица 1

Химический состав составных компонентов БКЖС

№	Материал	Содержание, %									
		SiC	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	C	CaO	S	Fe (Mn)	Влага
1.	Карбидный шлам	76,59	11,32	3,15	-	-	-	-	-	-	8,94
2.	Прокатная окалина	-	0,3	-	50,2	32,07	0,76	2,2	0,035	12,7	1,735
3.	Цемент	-	22	6	1	3	-	67	-	-	1

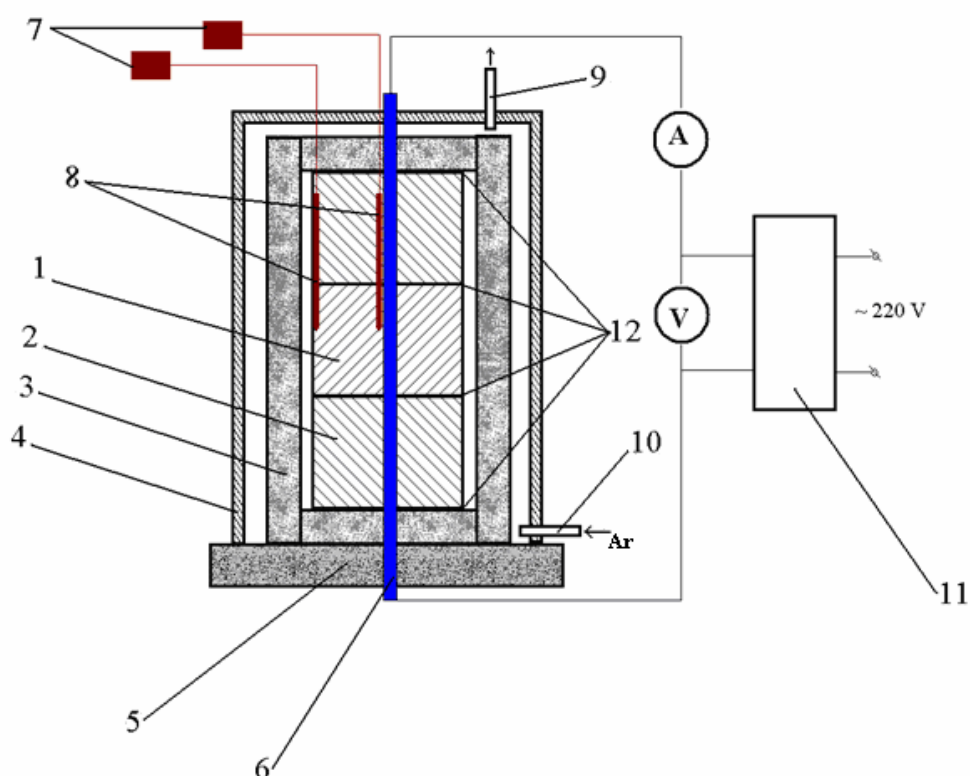


Рисунок 1 – Установка для определения коэффициента теплопроводности образца:

- 1 – исследуемый образец; 2 – теплоизолирующие наставки;
 3 – теплозащитный экран; 4 – металлический кожух; 5 – огнеупорная плита; 6 – нагреватель; 7 – мультиметр DT – 838; 8 – термопары;
 9 – выпускной клапан; 10 – штуцер для подачи аргона; 11 – реостат;
 12 – асбестовые прокладки

При помощи регулятора напряжения ориентировочно устанавливали необходимое значение напряжения. Когда температура горячей поверхности образца достигала необходимой и образец начинал нагреваться, постепенно, вручную снижали напряжение до тех пор, пока не устанавливался стационарный поток, то есть температура горячей и холодной поверхностей образца не изменялась при неизменной мощности теплового потока. После этого выполняли три замера через каждые 10 мин.

О тепловом потоке судили по изменению электрической мощности, выделяемой нагревателем. Согласно закону Ленца - Джоуля количество тепла, выделяемого электрическим током в проводнике равно:

$$Q_{эл} = R_{пр} \cdot I^2 \quad (2)$$

где $R_{пр}$ - сопротивление проводника, Ом;

I - сила тока, А.

Анализ полученных экспериментальных данных позволил сформулировать математическое уравнение зависимости коэффициента теплопроводности от состава БКЖС и температуры, имеющее следующий вид:

$$\lambda = 1,79101 \cdot 10^{13} \cdot Ц - 1,99002 \cdot 10^{12} \cdot КШ - 1,99002 \cdot 10^{12} \cdot ПО - 0,001057 \cdot Т, \\ R^2 = 0,989, \quad (3)$$

где Ц, КШ и ПО - содержание цемента, карбидного шлама и прокатной окалины в БКЖС, %;

Т - температура, °С.

Графическая зависимость коэффициента теплопроводности БКЖС от химического состава и температуры приведена на рисунке 2. Согласно данным представленных на нем наиболее подходящим с позиций теплофизических характеристик является БКЖС состава 3. Поскольку в данном случае прирост коэффициента теплопроводности определяется температурой, что позволяет разработанному материалу более равномерно взаимодействовать с компонентами металлических и шлаковых расплавов. Таким образом, для последующих исследований был применен БКЖС следующего состава, % по массе: цемент - 10, карбидный шлам - 45, прокатная окалина - 45.

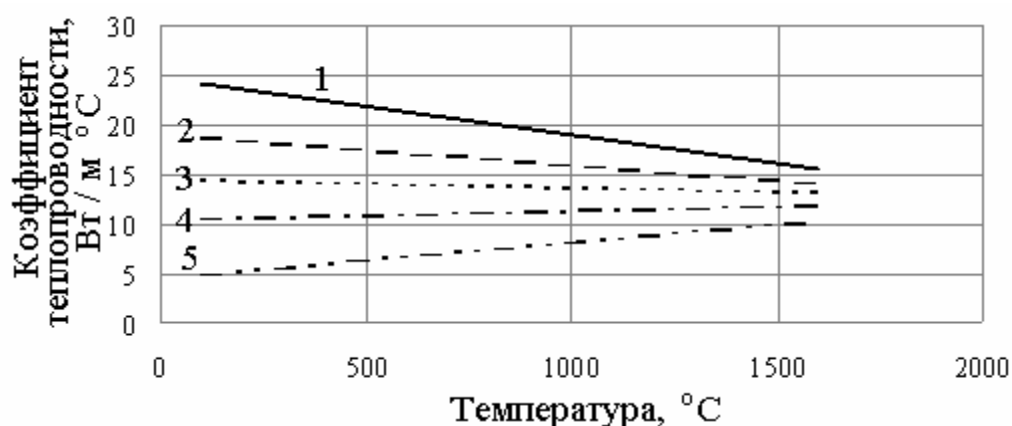


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента теплопроводности БКЖС от температуры и состава:

- 1 – 80 % содержание карбидного шлама; 2 – 60 % содержание карбидного шлама; 3 – 45 % содержание карбидного шлама;
4 – 30 % содержание карбидного шлама;
5 – 10 % содержание карбидного шлама

Учитывая, что в сталеплавильных цехах современной конструкции, подача шихтовых материалов осуществляется по тракту сыпучих материалов, то к БКЖС предъявляются особые требования по прочности, пористости и плотности.

Исследование их физико-механических свойств проводились по известной методике [9] и заключалось в определении истинной плотности, водопоглощения и предела прочности на сжатие. Полученные в ходе исследования результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2

Технологические характеристики БКЖС

№	Показатель	Значение			
		1 эксперимент	2 эксперимент	3 эксперимент	среднее
1.	Предел прочности, МПа/см ²	2,70	3,07	3,52	3,10
2.	Водопоглощение, %	6,49	7,49	5,41	6,46
3.	Пористость, %	15,47	17,44	12,73	15,21
4.	Кажущаяся плотность, г/см ³	2,38	2,33	2,35	2,35

Таким образом, сравнивая полученные показатели (таблица 2) и соответствующие для известняка и плавикового шпата марки ФК-75 [10, 11], можно сделать вывод о том, что основные технологиче-

ские свойства БКЖС находятся на уровне материалов широко применяемых в металлургии.

Выводы и перспективы дальнейших исследований

1. Экспериментальным путём определено уравнение зависимости коэффициента теплопроводности БКЖС от состава и температуры.

2. Определён рациональный состав БКЖС с теплофизической позиции.

3. Подтверждено соответствие технологических свойств БКЖС требованиям, предъявляемым к основным шихтовым материалам сталеплавильного производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гасик М.И., Овчарук А.Н., Семенов И.А., Деревянко И.В. Прогрессивные технологии выплавки электростали с заменой чугуна CSiC-брикетами // Сталь. – 2004. - №4. – С. 31 – 36
2. Гасик М.И., Михалев А.И., Овчарук А.Н., Деревянко И.В. Неметаллические включения и качество электростали 20ГЛ, выплавленной с использованием CSiC-брикетов взамен чугуна // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2003. - №6. – С. 24 – 26.
3. Металлолом в шихте кислородных конвертеров / Баптизманский В.И., Бойченко Б.М., Третьяков Е.В. – М.: Металлургия, 1982. – 136с.
4. Тепловая работа кислородных конвертеров / Баптизманский В.И., Бойченко Б.М., Черевко В.П. – М.: Металлургия, 1988. – 174с.
5. Кисиленко В.В., Дюдкин Д.А., Минченков А.В., Душкин А.В., Злепко Е.В. Использование карбида кремния при внепечной обработке чугуна порошковыми проволоками // Металл и литье Украины. – 2009. - №1 – 2. – С. 64 – 66
6. Дюдкин Д. А., Кисиленко В. В. Современная технология производства стали. – М.: Теплотехник, 2007. – 528с.
7. Организация эксперимента: Учебное пособие / Баптизманский В.И., Яковлев Ю.Н., Паниотов Ю.С. – К.: УМК ВО, 1992. – 244с.
8. Пустовалов В.В. Теплопроводность огнеупоров М.: Металлургия. 1966. – 84с.
9. Гавриш Д.И. Огнеупорное производство: Справочник, Том 2. — М.: Металлургия, 1965. — 584 с.
10. Сырьевая и топливная база черной металлургии: учебное пособие для вузов / Л.И. Леонтьев, Ю.С. Юсфин, Т.Я. Малышева и др. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 304с.
11. Производство стали / Борнацкий И.И., Михневич В.Ф. Яргин С.А. – М.: Металлургия, 1991. – 400с.

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСАМИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПАРКІВ ЗАЛІЗНИЧНИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

Анотація. Представлені результати із створення інтелектуальної автоматизованої системи, що забезпечує управління процесами експлуатації парків залізничних технічних систем (електричних двигунів) на основі отримання оцінок параметрів їх поточного стану, без вилучення пристроїв з виробничих технологічних процесів. Досліджено кілька напрямків удосконалення автоматизованих систем управління експлуатацією парків електричних двигунів залізничних стрілочних переводів: урахування вектору показників, за якими оцінюється ефективність процесів експлуатації, розділення процедур визначення черговості діагностування і ремонтів технічних систем, формування моделі автоматизованого управління парком, з урахуванням координації підсистем і розвитку автоматизованої системи, застосування інтелектуальних методів аналізу та управління на основі нейронних мереж, а також методів екстраполяційного прогнозування часових і технічних характеристик ін.

Ключові слова: парки технічних систем, процеси експлуатації, поточний стан, багатокритеріальне автоматизоване керування, електричні двигуни стрілочних переводів, інтелектуальне управління, нейронні мережі.

Вступ

В даний час застосування методів і технологій інтелектуальних транспортних систем залізничного транспорту (ІТСЗ) спрямоване на підвищення ефективності залізничних перевезень, безпеки процесів експлуатації технічних систем (ТС) ін. Для сучасних ІТСЗ важливим напрямком розвитку є багатокритеріальна оптимізація управління при забезпеченні вимог безпеки, ефективності, зниження впливу транспорту на навколишнє середовище в умовах зростаючої інтенсивності транспортних потоків, посилення взаємодії різних видів транспорту при вирішенні логістичних та інших технологічних завдань. Удосконалення процесів експлуатації парків ТС (вагонів,

локомотивів, стрілочних переводів, електродвигунів ін.) або їх складових компонентів, з урахуванням параметрів поточного стану, являється актуальною науково-технічною проблемою, яка є надзвичайно важливою для залізничного транспорту, де налічують тисячі одиниць такого роду ТС. У роботі представлені методи підвищення ефективності автоматизованих процесів експлуатації парків електричних двигунів (ЕД), АСУЕД, що використовуються в залізничних стрілочних переводах - високо відповідальних засобах управління процесами перевезень. В даний час лише на Південно-Західній залізниці України їх експлуатується понад 6800. ЕД – коштовне устаткування при закупівлі, експлуатації, у ремонті. Зараз процеси експлуатації ЕД здійснюються на основі планово-попереджувального методу, з урахуванням нормування. У статті представлені результати по створенню інтелектуальної автоматизованої системи, що забезпечує управління процесами експлуатації парків ЕД (моделі ДП 0.18, ДП 0.25, МСП 0.15, МСП 0.25) на основі отримання оцінок параметрів їх поточного стану, без вилучення пристроїв з виробничих технологічних процесів. Перевага такої системи автоматизованої діагностики [1] в тому, що в ній проводяться вимірювання характеристик двигунів, які знаходяться під впливом номінальних, робочих значень напруг, струмів, магнітних полів, відцентрових сил та ін. Такі вимірювання параметрів ЕД дозволяють виявляти більше несправностей, ніж при використанні статичних методів діагностики [2].

В [3] для реалізації безпосередніх процедур управління парком ЕД з урахуванням їх технічного стану розроблена дворівнева система математичних моделей, верхній рівень якої представляє деякі контрольовані властивості парку технічних систем в цілому, забезпечує оцінки параметрів поточного стану і прогнозування значень параметрів (очікуваний час до прояву несправності, необхідні витрати на відновлення тощо), а нижній - формується з математичних моделей окремих об'єктів, які представляють еволюцію станів конкретних ЕД.

У статті виконано наступні удосконалення АСУЕД: урахування вектору показників ефективності процесів експлуатації зі складовими – експлуатаційні витрати, надійність системи (ризик відмови), додаткові витрати на відновлення функціонування системи, сукупно-

стей ТС; розділення процедур визначення черговості діагностування технічних систем і їх ремонтів; розвиток моделі автоматизованого управління парком ТС з урахуванням координації підсистем і розвитку автоматизованої системи; застосування інтелектуальних методів аналізу та управління на основі нейронних мереж, а також методів екстраполяційного прогнозування часових і технічних характеристик та ін.

Для компонентів вектору цілі встановлено взаємно компромісний характер відношень між ними, що дозволило застосувати аксіоматичні методи векторної оптимізації. При визначенні черговості обслуговувань окремих ТС ураховується інтенсивність перевезень на відповідних ділянках залізниць. У роботі наведено дані про технологічні можливості АСУЕД, а також пропозиції щодо можливості її застосування для інших типів ТС залізничного транспорту.

Постановка завдання. Постановка завдання із підвищення ефективності експлуатації і управління парком технічних систем або їх компонентів формулюється наступним чином. Розглядається певна множина складних техніко-технологічних об'єктів однакового призначення (ЕД), парк технічних систем, а також процеси їх експлуатації. Об'єкти парків характеризуються наборами властивостей, значення яких вказують на їх певний «поточний» стан, що відображає хід і можливості подальшої експлуатації кожної з систем. Технічний стан об'єкта на даному етапі його експлуатації визначається за сигналами, що знімається з нього, причому без виключення з процесів експлуатації. Також відомі ресурси (технічні, матеріальні, трудові та ін.), необхідні або ж виділені для експлуатації парку об'єктів. Ставиться завдання підвищення ефективності експлуатації парку об'єктів, на основі створення інтелектуальної автоматизованої технології та системи управління процесами експлуатації парку технічних об'єктів по поточному стану. При цьому потрібно визначити поточний технічний стан компонентів системи (моніторинг технічного стану), а також забезпечити раннє виявлення прихованих несправностей. Результатом моніторингу є оцінка приналежності об'єкта до класу справного або до класів несправного. Якщо виявлено несправний стан об'єкта, то необхідно визначити вид несправності і отримати оцінку достовірності. На основі даних

моніторингу об'єктів потрібно спрогнозувати можливі зміни технічного стану елементів системи, а також встановити раціональну черговість відновлення елементів, з урахуванням вимог із безпеки транспортної системи та обмежених ресурсів процесів експлуатації.

Нейронно-мережеве моделювання процесів в АСУЕД

Автоматизована технологія діагностування та управління парком ЕД заснована на аналізі частотного спектра робочого струму електродвигуна. Дискретизація струму ЕД реалізується в блоці аналого-цифрового перетворювача (АЦП), отримання спектральних характеристик струму ЕД реалізовано за допомогою швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) [4]. Вхідними даними модуля моніторингу електродвигунів являється частотний спектр струму ЕД, розрахований в блоці ШПФ. Для кожного електродвигуна формується індивідуальна модель (ІМ), яка зберігає спектральні характеристики справного стану двигуна. Завдання з автоматизації керування процесом експлуатації парку ЕД з контрольованими поточними станами вирішується на основі побудови дворівневої нейронно-мережевої моделі (карти Кохонена [5]), в якій моніторинг станів ЕД і аналізу їх динаміки реалізується в рамках індивідуальної моделі двигуна (ІМД). Пропонована модель керування експлуатацією парку ЕД полягає в об'єднанні індивідуальної моделі зміни станів ЕД з моделлю парку [3]. Одночасно з використанням моделі парку (МП) контролюються можливі зміни поточного стану ЕД, що відображають відповідні різні типи несправностей. Як початкові використовуються експлуатаційні дані всього парку ЕД – гармоніки певної частоти і інтенсивності в спектрі струму для електродвигунів з раніше виявленими станами (зразки), а також відповідні параметри досліджуваного електродвигуна.

Для вирішення задачі за експлуатаційними даними (спектри струмів ЕД) була побудована МП можливих станів електродвигунів у формі карти Кохонена. При навчанні (10000 епох) використовувалися представники ЕД з наступними контрольованими станами: І (справний); КЗО (коротке замикання обмотки); КЗПК (коротке замикання пластин колектора); ОСЯ (обрив секції якоря); КПК (круговий вогонь по колектору). У моделі експлуатації парку реалізований механізм «розфарбовування» вузлів мережі відповідно до заданих ознак об'єктів, які досліджуються при аналізі сукупності даних. Після

«розфарбовування» отримують зони моделі, які відповідають заданим кольоровим «ознакам типа вузлів».

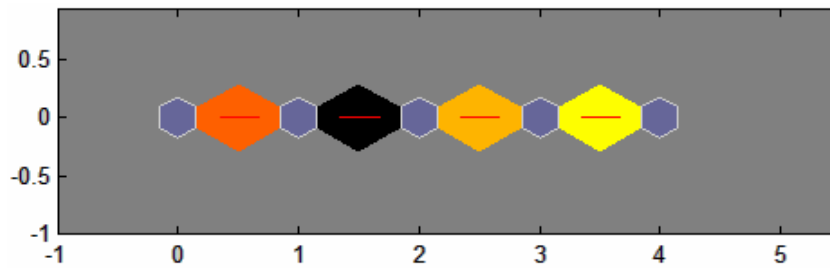


Рисунок 1 - Карта Кохонена потужностей зв'язків між кластерами ІМД

При аналізі нових даних, або нових ЕД, попадання параметрів деякого об'єкту при класифікації на основі карти Кохонена в певну зону говорить про його очікувані властивості. За рахунок побудови моделі статистичних даних як карти ознак Кохонена, а також маючи інформацію про частину досліджуваних об'єктів, можна досить достовірно прогнозувати поведінку інших об'єктів [5].

На рис. 1 подана карта Кохонена загальної моделі станів ЕД. Малі шестикутники – нейрони карти Кохонена, а колір великих – відображує близькість груп об'єктів. Чим темніше колір шестикутника, тим сильніше відрізняються об'єкти кластерів.

Згідно рис. 2 в шестикутниках карти Кохонена вказаний розподіл двигунів на даний момент (23, 22, 23, 10, 22), зверху, в жовтих прямокутниках, – попередній розподіл (23, 25, 20, 10, 22). Колір шестикутника визначається таким чином. Якщо сталася зміна кількості елементів в кластері – колір зелений, а якщо число елементів перевищує деяке задане число (тут – 22) – колір червоний, інакше колір є стандартним, синім.

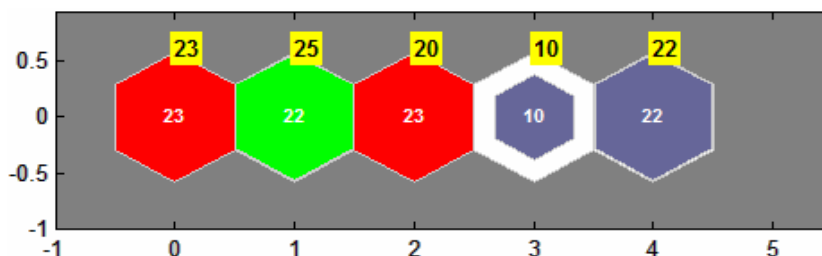


Рисунок 2 - Відображення динаміки станів парку ЕД стрілочних переводів

Такий аналіз (рис. 2) дозволить ефективно здійснювати моніторинг за станом парку ЕД при його експлуатації, своєчасно встановлювати потреби в здійсненні ремонтів або оновленні парку технічних систем.

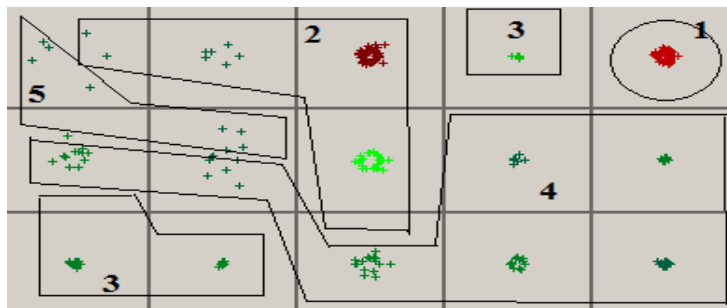


Рисунок 3 - Топологічна карта для кластеризації спектральних характеристик електродвигунів

Топологічна карта для кластеризації спектральних характеристик електродвигунів представлена рис. 3. На ній показані приблизні межі кластерів технічного стану двигуна. Знаками «+» позначено положення вхідних зразків на карті, їх близькість до центрів нейронів і між собою. Кластери позначені таким чином: справний - 1, коротке замикання обмотки - 2, коротке замикання пластин колектора - 3, обрив секції якоря - 4, круговий вогонь по колектору - 5. Вхідні зразки, відповідні справному ЕД, добре локалізовані, повністю відповідають одному нейрону топологічної карти. Кластери інших типів несправностей мають невеликі перекриття.

Векторна модель для оцінки ефективності процесів експлуатації

Управління процесами експлуатації парку ТС, в тому числі, полягає в реалізації процедур моніторингу параметрів поточних станів ЕД, а також у вирішенні завдань по встановленню раціональної черговості проведення діагностування ЕД і їх ремонтів. В цілому ефективне управління парком ТС може бути представлене як рішення задачі векторної оптимізації (ЗВО) з частковими показниками Е - експлуатаційні витрати (за заданий період), Р - надійність (забезпечення необхідного рівня працездатності системи), DZ - додаткові витрати на відновлення у разі відмови транспортної системи:

$$\overline{W} = (E, P, DZ) \Rightarrow \begin{matrix} opt \\ x \in D_x \end{matrix} \quad (1)$$

У моделі (1) керовані параметри «х» вибираються з області D_x . Для реалізації багатокритеріальної моделі (1), розкриття змісту оператора opt (), використовується аксіоматичний метод скаляризації [7], згідно з яким здійснюється вибір узагальненого мінімаксного критерію оптимальності, як буде показано нижче. Слід, насамперед, вказати важливу властивість системи показників моделі (1) - їх взаємну суперечливість. Змістовно ця особливість полягає в тому, що поліпшення оцінок будь-якого з компонентів вектора (1) можливе лише при погіршенні інших, що враховується при формуванні скалярної моделі компромісу. Наприклад, збільшуючи експлуатаційні витрати Е, можна підвищити надійність Р і скоротити додаткові витрати DZ.

В роботі [2] для визначення черговості ремонту ЕД, як частини завдання управління парком, використаний показник «загальна вартість відмови електродвигуна», який має вигляд:

$$C = f(R, F, Z), \quad (2)$$

де R - вартість ремонту електродвигуна; F - прогнозована вартість ремонту електродвигуна за індивідуальною моделлю (ІМ); Z - витрати, викликані припиненням роботи стрілочного переводу. У лінійній формі моделі (2) оцінка вартості відмови ЕД може бути представлена, як

$$C = \gamma_z Z + \gamma_R R + \gamma_F F, \quad (3)$$

де коефіцієнти важливості γ_k визначаються на основі методу аналізу ієрархій або експертними методами [7]. Для оцінки вартості ремонтів R використовується значення ймовірності несправності, які вважаються незалежними. При цьому оцінка очікуваної вартості R ремонту ЕД представлена наступним чином:

$$R = \sum_{i=1}^N d_i c_i, \quad (4)$$

де d_i - достовірність і-ої несправності, $d_i \in [0;1]$; c_i - нормативна вартість ремонту і-ої несправності; N - число несправностей, виявлених системою діагностики електродвигунів.

У АСУЕД крім нормативних значень d_i використовуються їх оцінки, одержувані за ІМ, Для виявлення несправностей в електродвигунах за спектрами струмів використовуються штучні нейронні мережі [5, 6]. При цьому значення достовірності і-ої несправності d_i визначається значенням нейрона вихідного шару багатошарового персептрона. Прогнозована вартість ремонту електродвигуна F обчислюється, як

$$F = \sum_{i=1}^N d_i^F c_i, \quad (5)$$

де d_i^F - прогнозоване значення достовірності і-ої несправності, $d_i^F \in [0;1]$. Система діагностики здійснює постійний (за регламентом) контроль технічного стану ЕД, Моніторинг технічного стану конкретного двигуна дозволяє отримати часовий ряд оцінок достовірності для кожної і-ої несправності d_i :

$$D_i = \{d_i^1, d_i^2, \dots, d_i^k, d_i^{k+1}, \dots, d_i^L\}, (i = \overline{1, N}). \quad (6)$$

Вважається, що з часом наступне значення d_i^{k+1} достовірності і-ої несправності часового ряду (6) не менше попереднього d_i^k : $d_i^k \leq d_i^{k+1}, (i = \overline{1, N})$. Для обчислення оцінок F (5) необхідно прогнозувати значення на основі даних часового ряду (6), відповідного і-тій несправності в індивідуальній моделі ЕД. Для розрахунку оцінок значень d_i^F використовуються методи багатовимірної лінійної екстраполяції [9].

Витрати Z , викликані відмовою ЕД та припиненням роботи стрілочного переводу, оцінюються згідно

$$Z = N_p T_v C_z P_z, \quad (7)$$

де N_p - середнє число поїздів, що проходять через стрілочний перевід на годину; T_v - час, необхідний для відновлення роботи стрілочного переводу; C_z - вартість затримки одного поїзда на одну годину; P_z - ймовірність відмови стрілочного переводу. Без урахування взаємних впливів різних типів несправностей ЕД ймовірність P_z оцінюється як $P_z = \max_i (d_i)$.

Після розгляду часткового завдання, що відноситься до управління парком ТС, повернемося до аналізу векторної моделі управління (1). Зауважимо, що взаємна суперечливість компонентів $\bar{W} = (E, P, DZ)$ встановлюється логічно, представляючи елементи вектора пов'язаними умовою залежного ресурсу [7]. Один з найбільш поширених підходів до вирішення завдань виду (1) полягає в побудові узагальнених критеріїв, що формалізують компромісний характер вихідної проблеми проектування. Сутністю використаного тут аксіоматичного підходу є узгодження припущень, які обумовлюють вид моделей «згорток», з можливостями їх реалізацій в конкретних класах ЗВО. Слідуючи [7], властивості при застосуванні узагальненого критерію виду

$$\lambda^0 = \max_{x \in D} \min_{k \in N} \left\{ \lambda_k^1 = \frac{\lambda_k}{\alpha_k} = \frac{1}{\alpha_k} \frac{f_k(x) - f_k^-(x)}{f_k^+ - f_k^-} \right\} \quad (8)$$

гарантують отримання єдиного компромісного рішення x_c^0 , що задовольняє аксіомам оптимальності по Парето $x_c^0 \in P_x$ і симетрії

$$\lambda_p(x_c^0) \alpha_p^{-1} = \lambda_q(x_c^0) \alpha_q^{-1}, \quad \forall p, q \in N, \quad (9)$$

де f_k^-, f_k^+ - мінімальні і максимальні оцінки в $x \in D_x$, α_k - коефіцієнт важливості. Гарантування властивостей рішень x_c^0 служить обґрунтуванням вибору компромісу (8) для задачі (1)). Крім знаходження рішення з аксіоматизованими властивостями, також принцип оптимальності (8): - визначає повноту множини критеріїв $\bar{W}_N$; - дозволяє зіставити оцінки додаткових витрат і найменших прирощень ефективності (при рівноцінності W_j); - дозволяє отримати

оцінки коефіцієнтів важливості чавстних критеріїв W_j на основі відомих аналогів (прототипів).

Модель екстраполяційного прогнозування часових і технічних характеристик об'єктів парку залізничних систем

У АСУЕД методом багатовимірної лінійної екстраполяції [9] вирішується завдання оцінки прогнозних значень параметрів ТС за інформацією, що накопичена у подібних або «аналогічних» системах. Зокрема до них відносять ТС приналежні одному кластеру, побудованому вище. Нехай ефективність прогнозу визначається функцією векторних аргументів X та Y

$$Q = Q(X, Y) \quad (12)$$

де $Y = (y_1, \dots, y_m)$ - вектор параметрів об'єкту і $X = (x_1, \dots, x_n)$ - вектор ситуації, який визначає специфіку об'єкта та його середовища, що треба враховувати при прогнозуванні. Для невеликої кількості ситуацій $X_i (i = \overline{1, k})$ відомі значення векторів рішень $Y_i^* (i = \overline{1, k})$ та значення Q . Вирішується завдання визначення оцінок вектора Y_{k+1} , «близького» до вектору Y_{k+1}^* , оптимального у заданій новій ситуації X_{k+1} (наприклад, через встановлений інтервал часу).

У роботі виконується процедура прогнозування [9], коли число k еталонів об'єктів мале і недостатнє для побудови навіть лінійної моделі рівняння $Y^* = L(X)$, $k < n + 1$. При цьому будується лінійна модель на підпросторах $\{X'\}$ $\{Y'\}$, утворених «аналогами», що належать одному кластеру. З використанням гіпотези щодо лінійної функції на просторах $\{X\}$ та $\{Y\}$ отримуються рівняння для гіперплощин $\{X'\}$ и $\{Y'\}$, які мають вигляд

$$\{X'\} + X_1 + \sum_{i=1}^{k-1} \lambda_i (X_{i+1} - X_1); \quad (13)$$

$$\{Y'\} = Y_1 + \sum_{i=1}^{k-1} \mu_i (Y_{i+1} - Y_1) \quad (14)$$

На основі прийнятої гіпотези про лінійність перетворення $\{X'\} \rightarrow \{Y'\}$ отримують $(\lambda_i = \mu_i, \quad i = \overline{1, k-1})$. Для розрахунку єдиного

рішення вводиться функцію $\Phi(X, X') = \|X - X'\|^2$, де $X \in \{X\}, X' \in \{X'\}$, яка кожній парі ситуацій X та X' ставить у відповідність число, що характеризує їх близькість. Далі кожному вектору ситуації $X \in \{X\}$ ставиться у відповідність його ортогональна проекція X'' на лінійний підпростір $\{X'\}$. Параметри λ_i отримують із системи рівнянь $\partial\Phi / \partial\lambda_i = 0, i = \overline{1, k-1}$, враховуючи що $\{X'\} = \sum_{i=1}^k \lambda_i * X_i$, тобто

$$\Phi(X' - X_{\text{э}}) = \sum_{i=1}^n [\lambda_i * X_i - X_{\text{э}}]_i^2. \quad (15)$$

Мінімізуючи (15) знаходять параметри λ_i , а отже і прогноз значень Y_{k+1} . На основі отриманих прогнозних значень техніко-економічних параметрів ТС виконуються процедури керування експлуатацією парків ТС – остаточно визначаються черговості діагностування ЕД, їх ремонту ін.

Висновки

У роботі представлено методи та засоби, призначені для автоматизації та інтелектуального управління процесами експлуатації парку ТС, зокрема, електродвигунів залізничних стрілочних переводів за оцінками їх поточного стану, отриманих з використанням процедур моніторингу та діагностування. Для управління парком ТС використана векторна модель з показниками - експлуатаційні витрати, надійність, додаткові витрати на відновлення. Завдання з автоматизації керування процесом експлуатації парку ЕД вирішується на основі побудови дворівневої нейронно-мережевої моделі Кохонена, в якій моніторинг і аналіз динаміки станів ЕД реалізується на основі формування індивідуальних моделей експлуатації двигунів. Автоматизована система передбачає адаптацію на основі обробки експлуатаційних даних.

Виконані дослідження і розробки дозволяють перейти від планово-попереджувального методу експлуатації до обслуговування по фактичному технічному стану ЕД. При цьому здійснюється прогнозування технічного стану елементів засобами штучного інтелекту, а також методами кластеризації та екстраполяції. До основних експлуатаційних властивостей АСУЕД відносяться наступні: багатокритеріальність процедур управління парками ТС; прогнозу-

вання відмови ЕД на основі індивідуальних моделей, а також методами екстраполяції; віддалена діагностика ЕД без їх виключення з процесів експлуатації; розділення процедур визначення черговості діагностування технічних систем і їх ремонтів; самонавчання та адаптація моделей окремих об'єктів; можливість застосування засобів АСУЕД до експлуатації парків інших технічних систем.

ЛІТЕРАТУРА

1. Скалозуб В.В., Швець О.М. Нейросетевые модели диагностики электродвигателей постоянного тока // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2009. – №4. – С. 7-11.
2. Інструкція з технічного обслуговування пристроїв, сигналізації, централізації та блокування (СЦБ), Державна адміністрація залізничного транспорту України, Київ, 2009.
3. Скалозуб В.В., Швець О.М., Осовик. В.Н. Методы интеллектуальных систем в задачах управления парками объектов железнодорожного транспорта по текущему состоянию // В сб. «Питання прикладної математики і математичного моделювання». – Дніпропетровськ: вид. ДНУ, 2014. С. 40 – 47.
4. Нуссбаумер Г. Быстрое преобразование Фурье и алгоритмы вычисления сверток. Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1985.
5. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание. : Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1024 с.
6. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 288с.
7. Скалозуб В.В. Аксиоматика компромисса в обратных задачах многокритериальной оптимизации конструкций и технических систем // В сб. научн. тр. АН Украины «Математические методы в задачах расчета и проектирования сложных механических систем». – Киев: Ин-т кибернетики им. В.М. Глушкова. 1992. С. 62 – 65.
8. Саати Т. Кернес А. Метод анализа иерархий. – М.: Мир. 1991. – 352 с.
9. Растрингин Л.А., Пономарев Ю.П. Экстраполяционные методы проектирования и управления. – М. Машиностроение, 1986. – 116 с.

АНАЛІЗ ВЗАЄМНИХ ЗВ'ЯЗКІВ МІЖ ОКРЕМИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ПРОЦЕСУ ОБПАЛУ ОКАТИШІВ

Анотація. У статті представлені результати моделювання роботи зон сушки, підігріву та обпалу конвеєрної машини для обпалу окатишів. Встановлено, що при наявності залишкової вологи в окатишах розвиток процесів окислення магнетиту і дисоціації вапняку значно сповільнюється в наслідок чого знижується кінцева якість окатишів і продуктивність процесу обпалу.

Ключові слова: обпал окатишів, залишкова волога, розкладання вапняку, окислення магнетиту.

Проблема і її зв'язок з науковими та практичними завданнями

Збільшення продуктивності і підвищення якості кінцевого продукту, як правило, є основними напрямками оптимізації будь-якого технологічного процесу. Одним з дієвих шляхів вирішення вказаних завдань, стосовно процесу виробництва залізорудних окатишів, є теоретично обґрунтована інтенсифікація роботи зони сушки обпалювальної конвеєрної машини. Загальновідомо, що зона сушки лімітує і визначає як швидкість руху обпалювальних візків, так і, в значній мірі, умови подальшої термічної обробки окатишів, і, отже, їх якість. Незважаючи на беззаперечну важливість глибокого дослідження роботи вказаної зони і істотний резерв її поліпшення, на сьогоднішній день залишається відкритими багато питань. Зокрема, відомо, що застосовувані наразі режими сушки залізорудних окатишів не є найефективнішими. [1,2]

Вміст залишкової вологи в окатишах навіть у відносно невеликій кількості в значній мірі впливає на протікання фізико-хімічних процесів в зоні підігріву. Таким чином, дослідження впливу параметрів сушки окатишів на протікання фізико-хімічних процесів у зонах підігріву та обпалу для подальшої оптимізації роботи зони сушки є актуальним завданням.

Аналіз досягнень і публікацій

Складність проблеми раціональної організації роботи зони сушки обпалювальної конвеєрної машини обумовлює різноманіття підходів до її рішення [3,4]. Основна увага приділяється сушці окатишів з погляду запобігання їх руйнування у зоні підігріву. Втім в недостатній мірі розглядаються питання впливу параметрів процесу сушки на подальше протікання фізико – хімічних процесів під час обпалу.

Постановка завдання

Метою даної статті є дослідження роботи обпалювальної конвеєрної машини із застосуванням різних режимів сушки і подальший аналіз одержаних результатів, який передбачає визначення впливу режиму сушки на ступінь розкладання вапняку та окислення магнетиту. Зазначене дослідження проводилось із застосуванням методів математичного моделювання.

Методика дослідження

Використана для дослідження динамічна математична модель [5], в якій використані наступні основні рівняння:

Диференціальне рівняння видалення вологи в шарі окатишів [6]:

$$L_{H_2O} \cdot \rho_{ок} \cdot (1 - \xi) \cdot \frac{\partial W_{H_2O}}{\partial \tau} = -a_v \cdot (t_{ок} - t_{вип}), \quad (1)$$

де: L_{H_2O} – прихована теплота пароутворення води, Дж/кг; $\rho_{ок}$ – щільність концентрату кг/м³; ξ – пористість шару окатишів, дол. од.; W_{H_2O} – вміст вологи в окатишах, дол. од.; $t_{ок}$ – температура окатишів, °С; τ – час, с; a_v – коефіцієнт теплопровідності (від газу до окатишів), Вт/(м·К); $t_{вип}$ – температура випаровування, °С.

Диференціальне рівняння теплового балансу для шару сухих окатишів:

$$\rho_{ок} \cdot (1 - \xi) \cdot C_{ок} \cdot \frac{\partial t_{ок}}{\partial \tau} = -a_v \cdot (t_2 - t_{ок}) + Q_1 - Q_2 + Q_3, \quad (2)$$

де: $\rho_{ок}$ – щільність концентрату кг/м³; ξ – пористість шару окатишів, дол. од.; $t_{ок}$ – температура окатишів, °С; τ – час, с; a_v – коефіцієнт теплопровідності (від газу до окатишів), Вт/(м·К); t_2 – температура газу, °С; Q_1 – теплота окислення магнетиту, Дж; Q_2 – теплота розкладання вапняку, Дж; Q_3 – теплота окислення вуглецю, Дж.

Диференціальне рівняння теплового балансу для газу:

$$\rho_2 \cdot C_2 \cdot W_2 \cdot \frac{\partial t_2}{\partial x} = a_v \cdot (t_{ок} - t_2); \quad (3)$$

де: ρ_2 – щільність газу кг/м³; C_2 – теплоємність газу, кДж/(К·м³); W_2 – нормальна швидкість руху газу крізь перетин шару, м/с; t_2 – температура газу, °С; ∂x – координата, спрямована по висоті шару зверху вниз, м; a_v – коефіцієнт теплопровідності (від газу до окатишів), Вт/(м·К); $t_{ок}$ – температура окатишів, °С.

Для опису швидкості протікання процесу окислення магнетиту використовувалася підмодель [7], в якій прийнято, що окислення протікає від поверхні окатишу до його центру, визначається масообміном на поверхні окатишу і швидкістю дифузії кисню з поверхні окатишу до ще неокисленого ядра. Швидкість окислення магнетиту розраховували за формулою:

$$V_{Fe_3O_4} = \frac{16\pi r_M^2(\tau) \cdot P \cdot (C_{O_2}^{равн} - C_{O_2})}{R_o T_{ок} \cdot \left\{ \frac{1}{k_r} + \frac{r_M^2(\tau)}{r_{ок}^2 \cdot k_{gO_2}} + \frac{r_M(\tau)}{D_{O_2}} \cdot \left[1 - \frac{r_M(\tau)}{r_{ок}} \right] \right\}}, \quad (4)$$

де: $V_{Fe_3O_4}$ – швидкість реакції окислення магнетиту, моль/с; $r_M(\tau)$ – радіус ядра магнетиту, який ще не окислився, м; $r_{ок}$ – радіус окатишу, м; P – загальний тиск газу, Па; $C_{O_2}^{равн}$ – рівноважна об'ємна концентрація O₂, моль/м³; C_{O_2} – об'ємна концентрація O₂ у поверхні окатишу, моль/м³; R_o – універсальна газова стала, Дж/(моль·К); $T_{ок}$ – температура окатишу, К; k_r – швидкість хімічної реакції окислення магнетиту, м/с; k_{gO_2} – коефіцієнт передачі маси на поверхні окатишу, м/с.

Швидкість розкладання вапняку визначається за рівнянням [8]:

$$V_{CaCO_3} = \frac{4\pi r_{ок}^2 (C_{CO_2}^{равн} - C_{CO_2})}{\frac{1}{k_{co_2}} + \left[\frac{r_{ок}}{r_1(\tau)} \right]^2 \frac{K_1}{k_1 R_o T_{ок}} + \frac{r_{ок} [r_{ок} - r_1(\tau)]}{r_1(\tau) D_{CO_2}}}, \quad (5)$$

де: V_{CaCO_3} – швидкість реакції розкладання вапняку, моль/с; $C_{\text{CO}_2}^{\text{равн}}$ – рівноважна об'ємна концентрація CO_2 , моль/м³; C_{CO_2} – об'ємна концентрація CO_2 у поверхні окатишу, моль/м³; k_{CO_2} – коефіцієнт масо-переносу CO_2 на поверхні окатишу, м/с; $r_1(\tau)$ – радіус ядра, який містить вапняк, що не розклався, в момент часу τ , м; K_1 – константа реакції розкладання вапняку, С⁻¹; k_1 – швидкість хімічної реакції розкладання вапняку, м/с; D_{CO_2} – коефіцієнт дифузії CO_2 в повітрі, м²/с.

Результати дослідження

Для визначення впливу залишкової вологи на процеси, що протікають при підігріві окатишів, проведено дослідження за допомогою математичного моделювання впливу температури газу і швидкості газового потоку на вміст залишкової вологи в окатишах для умов сушки окатишів просмоктуванням повітря з гори до низу, а також вплив вмісту залишкової вологи на ступінь дисоціації вапняку і ступінь окислення магнетиту (розподіл залишкової вологи розраховувався з урахуванням використання реверсивної сушки окатишів).

Відсоток розподілення залишкової вологи за висотою шару окатишів, в залежності від температури їх сушки та швидкості газового потоку за результатами моделювання наведений у таблиці 1.

Залежність ступеню розкладання вапняку від вмісту залишкової вологи в окатишах по висоті шару наведена на рисунку 1. Залежність ступеню окислення магнетиту від вмісту залишкової вологи в окатишах по висоті шару наведена на рисунку 2.

Встановлено, що зі збільшенням температури газу в зоні сушки до 450°C в і швидкості газового потоку понад 1,2 м/с волога в окатишах видаляється на 90% і більш по всій висоті шару.

За результатами дослідження ходу протікання процесів окислення магнетиту і дисоціації вапняку в залежності від вмісту залишкової вологи в окатишах встановлено, що при наявності залишкової вологи розвиток процесів окислення магнетиту та дисоціації вапняку значно сповільнюється. Тому, щоб не допустити сповільнення процесів, що протікають при підігріві, необхідно максимально повно видалити зайву вологу з окатишів в зоні їх сушки.

Таблиця 1

Залишкова волога в залежності від температури газу у зоні сушки та швидкості газового потоку по висоті шару

Температура газу, °C	350			400			450			Висота у шарі, мм
Швидкість газу, м/с	0,8	1,0	1,2	0,8	1,0	1,2	0,8	1,0	1,2	
Залишкова волога, %	0	0	0	0	0	0	0	0	0	300
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	240
	3,3	0,6	0	1,4	0	0	0	0	0	180
	5,5	3,7	1,4	4,3	1,8	0	3	0	0	120
	6,9	5,7	4,1	6,1	4,4	2,1	5,3	2,9	0	60

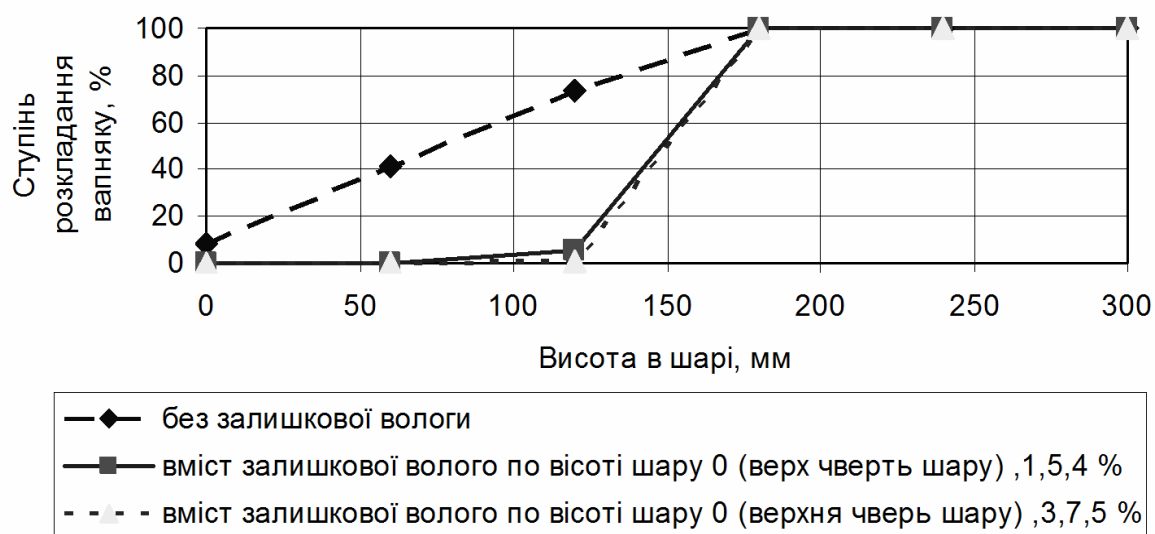


Рисунок 1 - Залежність ступеню розкладання вапняку від вмісту залишкової вологи в окатишах по висоті шару в кінці зони підігріву

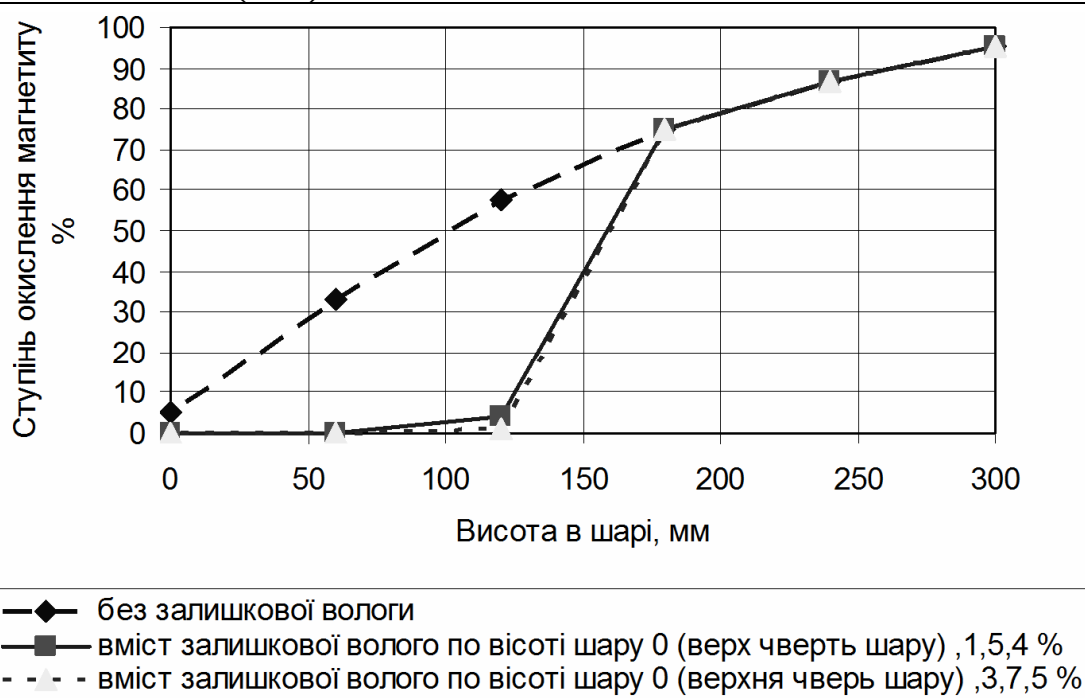


Рисунок 2 - Залежність ступеню окислення магнетиту від вмісту залишкової вологи в окатишах по висоті шару в кінці зони підігріву

При температурі сушки 350 - 400°C в окатишах на виході з зони сушки залишається істотна кількість вологи, а при температурі 350°C і швидкості газового потоку 0,8 м/с не встигає висушитися більша частина шару, при цьому процеси розкладу вапняку та окислення магнетиту протікатимуть більшою мірою у зоні обпалу, що негативно позначиться на якості окатишів і продуктивності процесу.

Висновки

На підставі проведених досліджень встановлено, що при обпалі окатишів необхідна ступінь зневоднення в зоні сушки повинна бути не менше 90-95%, щоб окатиші не руйнувалися при подальшому інтенсивному нагріванні.

За наявності значної кількості залишкової вологи декарбонізація вапняку починається в зоні підігріву - там, де температура окатишів в шарі досягає температури його розкладання, і, більшою частиною, протікає в зоні обпалу. Окислення магнетиту починається в зоні підігріву і закінчується на 90% і більше в зоні обпалу, при цьому значного окислення магнетиту в зонах рекуперації та охолодження на конвеєрних машинах не спостерігається.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кокорин Л.К. Производство окисленных окатышей. Л.К. Кокорин, С.Н. Лелеко - Екатеринбург: Изд-во «Уральский центр ПР и рекламы».- 2004.- 208с.
2. Абзалов В.М. Эффективность работы зон сушки обжиговых машин. В.М. Абзалов // Сталь.- 2008.- № 12.- С.25-27.
3. Механизм упрочнения и свойства окатышей из железорудного концентрата Михайловского ГОКа. / Журавлев Ф.М., Малышева Т.Я., Чумак А.Д. и др. // Сталь – 1981 - № 4 – С.16 – 20.
4. Интегральный показатель качества технологии производства железорудных окатышей (на примере Лебединского горно-обогатительного комбината) / А.Р. Жак, Ю.С. Юсфин, Р.Г. Мирнова [и др.] // Известия ВУЗов. Чёрная металлургия.-1998.- № 3.- С. 6 – 14.
5. Ковалёв Д.А Разработка динамической математической модели для управления обжигом углеродсодержащих железорудных окатышей / Д.А. Ковалёв, Н.Д. Ванюкова, М.Н. Бойко // Системні технології : регіон. міжвуз. зб. наук. праць. – 2008г – Дніпропетровськ: Системні технології, № 1. – с. 93-102.
6. Young R.W. Matematical model of grate – kiln – cooler process used for induration of iron are pellets / R.W. Young, M. Cross, R.D. Gibson // Ironmaning and Steelmaking. – 1979. – N 1. – P. 1 – 13.
7. Ванюкова Н.Д. Теоретические исследования окисления магнетита в окатышах / Н.Д.Ванюкова, Д.А.Ковалёв, М.Н. Бойко // Збірник тез доповідей науково-практичної конференції «Металургія та освіта. проблеми і перспективи».- Запоріжжя.- 2006.- С. 24-26.
8. Теорія металургійних процесів. / [В.Б. Охотський, О.Л. Костюлов, А.К. Тараканов та ін.]- К.: ІЗМН, 1997.- 512 с.

Н.В. Полякова

ФОРМУВАННЯ ЯКІСНИХ ОКАТИШІВ СУМІСНИМ ВПЛИВОМ ТЕМПЕРАТУРИ ЇХ ОБПАЛУ ТА ШВИДКОСТІ ГАЗОВОГО ОБДУВУ

Анотація. У статті представлені результати моделювання роботи зон обпалу та охолодження конвеєрної машини для обпалу окатишів при зміні температури обпалу та швидкості газового потоку. Встановлено, що при підвищенні швидкості газового потоку зона максимальних температур розповсюджується на більшу глибину, при цьому зменшується перепад температури по висоті, за рахунок чого вирівнюється якість окатишів у всьому шарі.

Ключові слова: обпал окатишів, температура обпалу, швидкість газу, якість окатишів

Постановка проблеми

Основними технологічними чинниками, що впливають на такі характеристики якості окатишів як їх міцність та структура є: рівень температури в зонах обпалювальної машини, час і швидкості нагріву та охолодження, склад газової фази [1].

Температурно-часові умови обпалу залізорудних окатишів є основним чинником, що визначає якість готового продукту [2]. Найважливішими з цих умов є рівень температури обпалу, а також швидкість нагріву і охолодження окатишів.

Температура в значно більшій мірі, ніж решта чинників, інтенсифікує процес спікання, тому доцільно вести обпал окатишів при максимально можливій температурі. Граничне значення останньої визначається температурою розм'якшення і оплавлення окатишів.

Відмінність в складах шихт, що застосовуються для виробництва окатишів, не дозволяє рекомендувати вибір єдиного значення температури обпалу для всіх випадків. Проте, відомо, що температура обпалу нижче 1200°C не забезпечує досягнення необхідної міцності окатишів [3].

Певну роль в зміцненні окатишів грає і чинник часу. Найінтенсивніше зростання міцності відбувається впродовж перших 5—20

хв. обпалу [4]. Подальше перевищення тривалості обпалу збільшує міцність несуттєво і, в подальшому, навіть може призвести до деякого зниження її.

Певну дію на формування показників міцності окатишів також має швидкість їх охолодження. Так, окатиші необхідно охолоджувати зі швидкістю, яка не перевищує 100 °С/хв. При вищих швидкостях охолодження окатиші втрачають міцність, що пов'язано з розвитком термічних напруг.

Враховуючи вищесказане, аналіз сумісного впливу температури обпалу та швидкості газового потоку в зонах обпалу і охолодження на якість окатишів представляє значний практичний інтерес щодо вирішення завдання підвищення ефективності процесу обпалу окатишів.

Аналіз публікацій

Питанням досягнення раціонального розподілу температур обпалу окатишів присвячена значна кількість наукових робіт, наприклад [5-6]. Втім, складною проблемою залишається вирівнювання температурно-часових умов для окатишів по всій висоті їх шару.

Постановка завдання

Метою даної статті є аналіз сумісного впливу температури обпалу та швидкості газового потоку в зонах обпалу і охолодження на температурно-часові умови обпалу окатишів по висоті шару, які визначають якість кінцевого продукту. Зазначене дослідження здійснювалось із застосуванням методів математичного моделювання.

Результати

Для дослідження використана математична модель [7], яка ґрунтується на описі реальних фізико-хімічних і теплових механізмів, залучених в процес обпалу окатишів. Перетворення в цій системі аналізуються з позицій кінетики, заснованої на кінетичних рівняннях. Для загального випадку топохімічного реагування модель масопереносу включає хімічну взаємодію і дифузії газового компоненту в приграничній плівці і крізь пористий шар продукту реагування.

У загальному вигляді модель представлена наступною системою рівнянь:

$$\begin{cases} L_{H_2O} \cdot \rho_{ок} \cdot (1 - \xi) \cdot \frac{\partial W_{H_2O}}{\partial \tau} = -a_v \cdot (t_{ок} - t_{вun}), \\ \rho_{ок} \cdot (1 - \xi) \cdot C_{ок} \cdot \frac{\partial t_{ок}}{\partial \tau} = -a_v \cdot (t_z - t_{ок}) + Q_1 - Q_2 + Q_3, \\ \rho_z \cdot C_z \cdot W_z \cdot \frac{\partial t_z}{\partial x} = a_v \cdot (t_{ок} - t_z); \end{cases} \quad (1)$$

де: $\rho_{ок}$ – щільність концентрату; ξ – пористість шару окатишів; W_{H_2O} – вміст води у окатишах, $t_{ок}$ – температура окатишів; τ – час; a_v – коефіцієнт теплопровідності (від газу до окатишів); t_z – температура газу; Q_1 – теплота окислення магнетиту; Q_2 – теплота розкладання вапняку; Q_3 – теплота окислення вуглецю.

Для опису фізико-хімічних процесів окислення магнетиту, окислення вуглецю, дисоціації вапняку застосовуються відповідні моделі цих процесів.

Для визначення міцності обпалених окатишів на стиснення використовується математична модель, яка включає моделі для визначення впливу на процес зміцнення: хімічного складу сирих окатишів – через використання показників основності CaO/SiO_2 , глиноземного Al_2O_3/SiO_2 і магнезійного модулів MgO/SiO_2 ; динаміки нагріву окатишів; температури обпалу; діаметру окатишів.

Для визначення впливу температури і швидкості газового потоку на рівень теплової обробки окатишів при обпалі проведені модельні дослідження, в ході яких змінювали температуру газу, що просмоктується крізь шар окатишів при їх обпалі і швидкість газового потоку. Швидкість газового потоку змінювали в діапазоні від 0,8 до 1,2 м/с. Температуру газу в зоні обпалу змінювали в інтервалі 1230-1280°C. Висота шару окатишів та швидкість руху обпалювальних візків задавалась незмінною для всіх досліджень. Залежність максимальної температури окатишів від температури газу у зоні обпалу та швидкості газового потоку по висоті шару наведена на рисунку 1.

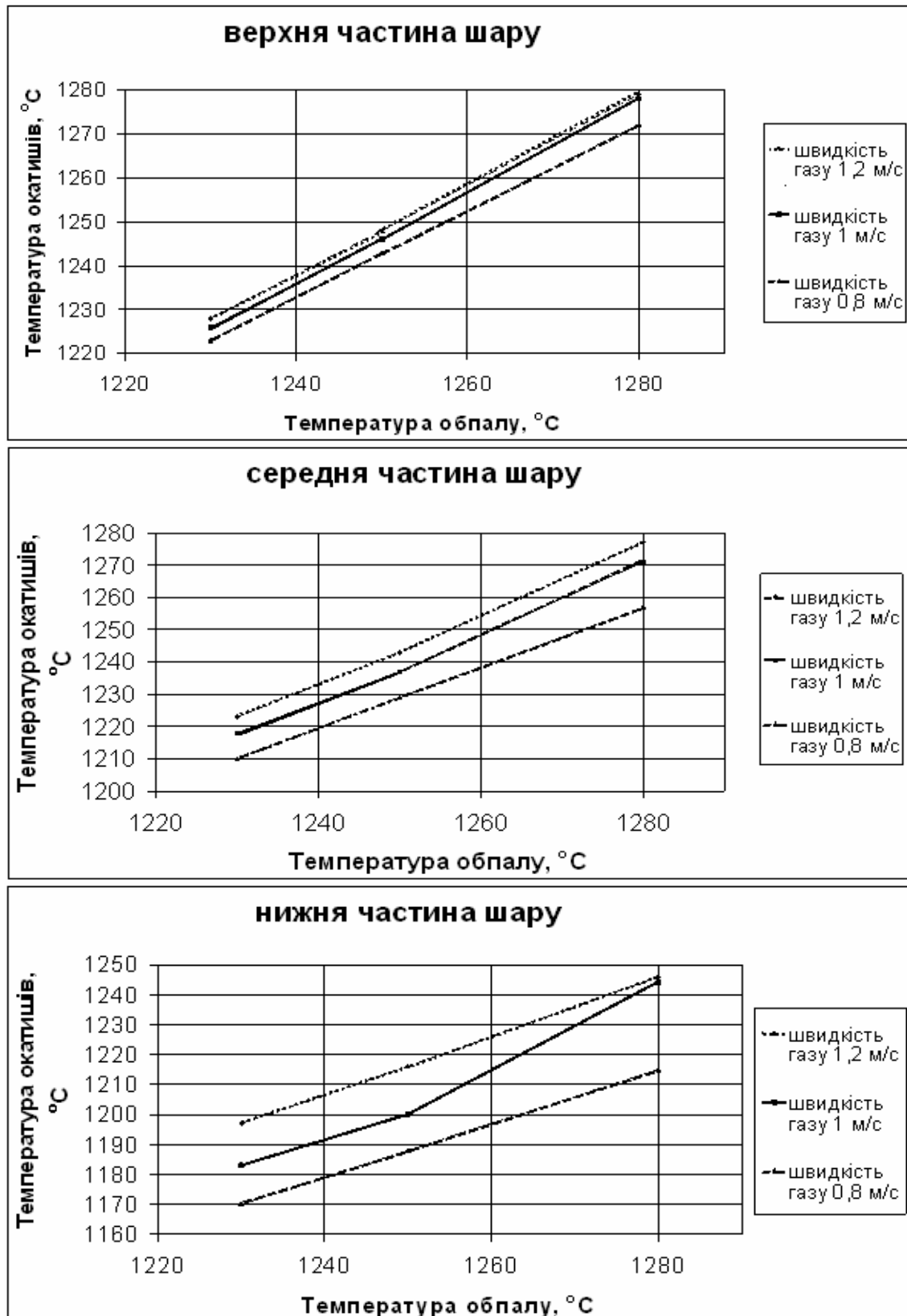


Рисунок 1 – Залежність максимальної температури окатишів від температури газу у зоні обпалу та швидкості газового потоку по висоті шару (верх, середина та низ шару)

Для визначення впливу температурного режиму і швидкості газового потоку на охолодження окатишів проведені дослідження за допомогою математичного моделювання. В ході цих досліджень змінювали швидкість газового потоку в зоні охолодження від 0,8 до 1,2 м/с, температуру окатишів на вході в зону охолодження с 1220 до 1280 °С. Висоту шару окатишів і швидкість руху обпалювальних візків не змінювали. В результаті визначали температуру окатишів на виході із зони охолодження і швидкість охолодження окатишів. Отримані дані наведені у таблиці 1.

Встановлено, що зі збільшенням температури газу у зоні обпалу до 1280°С максимальна температура окатишів по висоті шару суттєво залежить від швидкості газового потоку. Особливо це стосується окатишів нижньої частини шару. Так при швидкості газового потоку 0,8 м/с температура окатишів складала 1214 °С, а при швидкості 1 м/с – 1243°С.

Таблиця 1

Швидкість охолодження в залежності від температури газу у зоні охолодження та швидкості газового потоку по висоті шару.

Температура газу, °С	20			60			100			Висота у шарі, мм
Швидкість газу, м/с	0,8	1,0	1,2	0,8	1,0	1,2	0,8	1,0	1,2	
Швидкість охолодження, °С/хв.	78,5	78,68	78,75	76,12	76,25	76,25	73,68	73,75	73,75	300
	77,93	78,37	78,56	75,6	76,05	76,11	73,1	73,3	73,35	240
	76,87	77,68	78	75,36	75,62	75,65	72,79	72,91	72,96	180
	75,18	75,81	77,12	74,85	75,13	75,32	72,56	72,61	72,68	120
	83,14	85,21	85,78	80,71	83,14	83,28	78,07	80,5	80,35	60

Взагалі максимальна температура окатишів при зміні швидкості газового потоку змінюється більш суттєво зі збільшенням ступеню заглиблення розташування шарів окатишів, а для окатишів верхньої частини шару температура практично не змінюється.

Встановлено, що при всіх досліджуваних температурах охолодження та швидкостях газового потоку швидкість охолодження ока-

тишів у відповідній зоні менше 100 °С/хв., тобто не перевищує допустиме значення.

При підвищенні температури окатишів на вході в зону охолодження при швидкості газового потоку 0,8 м/с спостерігається недостатнє охолодження окатишів, що ускладнює їх подальше транспортування.

На процес охолодження окатишів, а саме на швидкість охолодження та кінцеву температуру окатишів значно впливають наступні параметри зони обпалу: температура обпалу – що визначає температуру окатишів на вході в зону охолодження (в більшій мірі для окатишів верха шару) та швидкість газового потоку, яка також визначає температуру окатишів на вході в зону охолодження, але в більшій мірі для окатишів, що розташовані в нижній частині шару.

Висновки

За результатами дослідження встановлено, що максимальна температура окатишів при зміні швидкості газового потоку змінюється більш суттєво зі збільшенням ступеню заглиблення розташування шарів окатишів, що зменшує перепад температур за висотою шару.

На швидкість охолодження та кінцеву температуру окатишів, які розташовані у верхній частині шару, в більшій мірі впливає температура обпалу, яка визначає температуру окатишів на вході в зону охолодження, а для окатишів, що розташовані внизу шару швидкість газового потоку в зоні обпалу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бойко М.Н. Комплексный расчет основных параметров и качества углеродсодержащих окатышей при обжиге на конвейерной машине / М.Н. Бойко, Д.А. Ковалёв, Н.Д. Ванюкова // Системні технології : регіон. міжвуз. зб. наук. праць. – Дніпропетровськ: Системні технології, 2008. – № 3. – том 2. – С. 3-8.
2. Интегральный показатель качества технологии производства железорудных окатышей (на примере Лебединского горно-обогатительного комбината) / А.Р. Жак, Ю.С. Юсфин, Р.Г. Миронова [и др.] // Известия ВУЗов. Чёрная металлургия. – 1998. – № 3. – С. 6 – 14.
3. Механизм упрочнения и свойства окатышей из железорудного концентрата Михайловского ГОКа. / Журавлев Ф.М., Малышева Т.Я., Чумак А.Д. и др. // Сталь – 1981 – № 4 – С. 16 – 20.
4. Ефименко Г.Г. Технология производства офлюсованных окатышей повышенной прочности. Г.Г. Ефименко, Д.А. Ковалев, Е.И. Сулименко // Сталь. – 1978 – № 3 – С. 199 – 201.
5. Кокорин Л.К. Производство окисленных окатышей. Л.К. Кокорин, С.Н. Лелеко – Екатеринбург: Изд-во «Уральский центр ПР и рекламы». – 2004. – 208с.
6. Методы интенсификации процесса термообработки окатышей на конвейерной машине. / Бережной Н.Н., Петров А.В., Воскерчан Н.В., Дрожилов Л.А. // Бюллетень научнотехнической информации – Черная металлургия – 1977 – № 6 – С. 21 – 23. 2009».
7. Ковалёв Д.А. Разработка динамической математической модели для управления обжигом углеродсодержащих железорудных окатышей / Д.А. Ковалёв, Н.Д. Ванюкова, М.Н. Бойко // Системні технології : регіон. міжвуз. зб. наук. праць. – 2008г – Дніпропетровськ: Системні технології, № 1. – с. 93-102.

Д.М. Свинарченко

МЕТОДИ ОБРОБКИ БАГАТОСПЕКТРАЛЬНИХ РАСТРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ НА ОСНОВІ ОРТОГОНАЛІЗАЦІЇ ДАНИХ

Анотація. Запропоновано метод підвищення якості растрових фотографічних зображень, що дозволяє збільшити просторову розрізненість первинних зображень.

Ключові слова: мультиспектральне зображення, ортогоналізація, просторова розрізненість, показники якості.

Постановка проблеми. Однією з основних проблем оброблення видових даних дистанційного зондування, одержаних з аерокосмічних носіїв, є те, що ці дані мають різну просторову розрізненість. Зображення окремих спектральних каналів, отримані з одного апарату, можуть відрізнятися за цим показником у десятки разів. Тому, постає проблема отримання усієї множини даних, що мали б найбільшу просторову розрізненість, з метою більш якісного тематичного аналізу в автоматизованих системах.

Аналіз останніх досліджень. На теперішній час відома низка способів підвищення якості цифрових даних стосовно розподілів яскравості растрових зображень [1 - 3]. Усі вони розвинені без урахування специфіки видових даних дистанційного зондування, забезпечення збереження геометричних структур первинних видових даних в зображеннях. Це зумовлює актуальність розроблення нових способів попередньої обробки цифрових аерокосмічних зображень з урахуванням зазначених факторів.

Метою роботи є розроблення нового методу обробки растрових зображень дистанційного зондування, що базується на різних алгоритмах ортогоналізації даних та додозволяє покращити якісні показники зображень.

Основна частина. З позицій прикладної геометрії багатоспектральне растрове зображення, подане на прямокутній решітці $N \times M$ пікселів, може бути представлено у вигляді множини векторів, що

належать евклідовому простору $\mathbf{R}^K$, де $K = N \cdot M$. Далі множину цих векторів позначаємо через $\{\mathbf{e}_k : k = \overline{1, S}\}$, де S – кількість фіксованих спектральних каналів. Прийmemo, що зображення з найвищою просторовою розрізненістю (тобто отримане найбільш короткохвильовому спектральному інтервалі проміння – носія видової інформації) подається вектором $\mathbf{e}_1$ цього простору.

Загальний обсяг подання вихідного цифрового фотограмметричного зображення з 256-ма рівнями яскравості на піксел у загальному випадку дорівнює $N \cdot M \cdot K \cdot n$ біт, де K – кількість спектральних каналів, n – кількість двійкових розрядів, якою кодуються рівні яскравості пікселів. З урахуванням характеристик сучасних сенсорних пристроїв дистанційного зондування Землі з аерокосмічних носіїв використання усього обсягу первинних видових даних з позицій ідентифікації геометричних форм візуалізованих об'єктів є надлишковим. Це зумовлює актуальність розроблення методів редукції (зменшення) вимірності вихідних видових даних до рівня, достатнього для досягнення заданого рівня достовірності розпізнавання.

Один із способів такої редукції забезпечується на основі методу головних компонент [4]. У даній статті викладені альтернативні способи ортогоналізації багатовимірних векторів, які подають розподіли яскравості окремих спектральних каналів багатоспектральних зображень. Перевагою ортогоналізації є декореляція цих розподілів, що забезпечує можливість незалежного оброблення відповідних зображень з наступним синтезом утвореного у такий спосіб «штучного» багатоспектрального зображення з підвищеними інформаційними показниками. Крім того методи ортогоналізації дозволяють здійснити стиснення даних, подавлення шумів та ін. Зазначимо у цьому зв'язку, що метод головних компонент забезпечує лише часткову ортогоналізацію розподілів яскравості зображень спектральних каналів – складових первинного багатоспектрального зображення [5, 6].

У лінійній алгебрі розвинені декілька способів ортогоналізації множин векторів, заданих у багатовимірних просторах. Найбільш поширені серед них – процес Грама-Шмідта, метод «відбиття» Хаусхолдера, метод «обертання» Гівенса [7].

Суміщення первинних зображень на основі процесу ортогоналізації Грама-Шмідта реалізується побудовою на основі множини K -

вимірних векторів $\{\mathbf{e}_k: k = \overline{1, S}\}$ множини попарно ортогональних векторів $\{\mathbf{u}_k: k = \overline{1, S}\}$ з наступною заміною вектора $\mathbf{u}_1$ вектором $\mathbf{e}_1$ та оберненим перетворенням.

Традиційна реалізація процесу ортогоналізації векторів передбачає їхню одночасну нормалізацію, тобто виконання умови $\|\mathbf{u}_n\|=1$, $n = \overline{1, S}$ (тут і далі подвійні прямі дужки позначають норму відповідного вектора).

Пропонується узагальнений спосіб процесу ортогоналізації Грама-Шмідта без вимоги нормалізації отримуваних векторів, який подається співвідношеннями:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_1 &= \mathbf{e}_1; \\ \mathbf{u}_k &= \mathbf{e}_k - \sum_{i=1}^{k-1} \frac{(\mathbf{u}_i \cdot \mathbf{e}_k)}{\|\mathbf{u}_i\|} \cdot \mathbf{u}_i; \quad k = \overline{2, S}, \end{aligned} \quad (1)$$

де дужками позначено скалярні добутки векторів. Надалі вектор $\mathbf{u}_1$ замінюється вектором, утвореним з панхромного зображення, чи зображення, отриманого у діапазоні з найкоротшою довжиною хвилі проміння, та здійснюється обернене перетворення.

Другий запропонований метод ортогоналізації вихідних видових багатоспектральних даних базується на відомому у лінійній алгебрі QR-поданні матриць. Підставою для використання такого підходу є подання розподілів яскравості растрових зображень, одержаних у різних спектральних інтервалах проміння - носія видової інформації у вигляді двовимірних масивів числових даних (рівнів яскравості). Кожен з них упорядковується по стовпцях, на основі яких формується матриця з розмірністю $NM \times K$, де $N \times M$ - вимірність растрових зображень, отриманих у різних спектральних діапазонах, K - кількість цих діапазонів. Далі здійснюється QR-перетворення сформованої матриці, у результаті чого вона подається у вигляді добутку матриць $\mathbf{Q}_{NM \times K}$ та $\mathbf{R}_{K \times K}$. Відмітимо, що стовпці матриці $\mathbf{Q}_{NM \times K}$ попарно ортогональні. Після цього перший стовпець матриці $\mathbf{Q}_{NM \times K}$ замінюється упорядкованим зазначеним способом масивом рівнів яскравості зображення, отриманого у діапазоні з найкоротшою довжиною хвилі проміння - носія видової інформації, з наступним оберненим QR-перетворенням.

Ще один метод використовує сингулярне перетворення, тобто подання довільної матриці A розмірності $(N \times M)$ у вигляді:

$$A = U S V^T \quad (2)$$

де $U - (N \times N)$ та $V - (M \times M)$ - ортогональні квадратні матриці, що задовольняють критерію ортогональності:

$$\begin{aligned} VV^T &= V^T V = E_{N \times N}, \\ UU^T &= U^T U = E_{M \times M}, \end{aligned} \quad (3)$$

де E – одиничні матриці відповідних розмірностей.

Матриця S складається з квадратного діагонального блоку розмірності $r \times r$ ($r = \min(N, M)$) з невід'ємними елементами на головній діагоналі і, якщо $N \neq M$, з додаткових нульових рядків або стовпців:

$$\begin{aligned} S &= [S'; 0], \text{ якщо } N < M, \\ S &= [S'; 0]^T, \text{ якщо } M < N, \\ S &= S', \text{ якщо } M = N. \end{aligned} \quad (4)$$

$$S' = \text{diag} \left\{ s_1, s_2, \dots, s_r; \begin{matrix} s_1 \geq s_2 \geq \dots \geq s_r \end{matrix} \right\}$$

Числа s_i , $i = 1, 2, \dots, r$ називаються сингулярними числами матриці A , що однозначно визначаються матрицею A . Процес ортогоналізації та перетворення матриць здійснюється за алгоритмом, аналогічним за QR-перетворення.

На рисунку 1 представлено первинне зображення одного зі спектральних каналів (червоного) багатоспектрального зображення (подано в тонах сірого). На рисунках 2-5 відповідно зображення червоного каналу після здійснення прямого та оберненого перетворення за методом головних компонент, ортогоналізацією Грама-Шмідта, QR-перетворенням, сингулярним перетворенням.



Рисунок 1 – Первинне зображення



Рисунок 2 – Зображення, отримане за застосування методу головних компонент



Рисунок 3 – Зображення, отримане за застосування ортогоналізації Грама-Шмідта



Рисунок 4 – Зображення, отримане за застосування QR-перетворення



Рисунок 5 – Зображення, отримане за застосування сингулярного перетворення

В таблиці 1 подані значення сигнальної ентропії відповідних зображень [8] та рівня адаптації зорової системи (LQ).

В таблиці 2 подані значення наступних, найпоширеніших об'єктивних показників якості зображень [9, 10] (для пар зображень - первинного та отриманого за застосування одного з методів ортогоналізації): AD – середня різниця, NK – нормована кореляція, CQ – якість кореляції, MD – максимальна різниця, IF – точність зображення, MSE –

середньоквадратична похибка, PMSE – максимальна середньоквадратична похибка, NAE – нормована абсолютна похибка, NMSE – нормована середньоквадратична похибка, SNR – відношення сигнал/шум, PSNR – максимальне відношення сигнал/шум.

Таблиця 1

Показник	Зображення Рис. 1	Зображення Рис. 2	Зображення Рис. 3	Зображення Рис. 4	Зображення Рис. 5
Ентропія	6.7837	6.1623	7.2117	7.2030	6.3451
LQ	0.8148	0.8148	0.9194	0.8410	0.8125

Таблиця 2

	Зображення Рис.1- Зо- браження Рис.2	Зображення Рис.1- Зообра- ження Рис.3	Зображення Рис.1- Зообра- ження Рис.4	Зображення Рис.1- Зообра- ження Рис.5
AD	0.5893	3.4679	0.7997	0.9679
NK	1.0304	0.7626	0.9722	1.0331
CQ	148.648	110.0163	140.2579	149.0446
MD	104	113	143	205
IF	0.9883	0.9314	0.9842	0.9809
MSE	0.5893	3.4679	0.7997	0.9679
PMSE	9.0621e-06	5.3332e-05	1.2298e-05	1.4885e-05
NAE	0.0928	0.2528	0.1052	0.1119
NMSE	0.0117	0.0686	0.0158	0.0191
SNR	19.3345	11.6369	18.0084	17.1793
PSNR	-1.6135	-9.3111	-2.9396	-3.7686

Висновки та перспективи подальших досліджень. Отримані результати дозволяють усвідомити переваги одного з варіантів ортогоналізації за інформаційними критеріями. Перспективи подальших досліджень за проблематикою роботи пов'язані з узагальненням запропонованих методів ортогоналізації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB / Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс. – Москва: Техносфера, 2006. – 616 с.
2. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. В. А. Сойфера. – 2-е изд., испр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 784 с.
3. Бузовский О. В. Компьютерная обработка изображений / О. В. Бузовский, А. А. Болдак, М. Х. Мохаммед Руми. – К.: Корнійчук, 2001. – 180 с.
4. Свинаренко Д.М. Класифікація геометричних форм растрових проєкційних зображень дистанційного зондування землі на основі їхніх головних компонент / Д.М. Свинаренко // Прикладна геометрія та інженерна графіка. – Випуск № 85. – К.: КНУБА, 2010. – С.301-305.
5. Faugeras O. The Fundamental Matrix: Theory, Algorithms, and Stability Analysis / Q. Luong, O. Faugeras. // International Journal of Computer Vision. - 1996. № 17 (1). - P. 43-76.
6. Баландин М.Ю. Методы решения СЛАУ большой размерности / М.Ю.Баландин, Э.П.Шурина. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – 72 с.
7. Гельфанд И.М. Лекции по линейной алгебре / И.М.Гельфанд. – М.: Наука, 1974. – 272 с.
8. Корчинський В.М. Інформативність афінно-інваріантної геометричної моделі проєкційних зображень в їх морфологічному аналізі / В.М.Корчинський // Оброблення сигналів і зображень та розпізнавання образів / Праці сьомої Всеукраїнської міжнародної конференції (UkrObraz'2004). – К.: Ін-т кібернетики НАН України, 2004. – С.53-56.
9. Мирошников М.М. Дальнейшее развитие методологических основ иконоки / Мирошников М.М., Нестерук В.Ф.// Труды ГОИ им. С.И.Вавилова. – т.64, вып. 198. – Л. – 1987. – С. 5 – 11.
10. Шлихт Г.Ю. Цифровая обработка цветных изображений. / Шлихт Г.Ю. // – М., Издательство ЭКОМ, 1997. – 336 с.

А.И. Михалев, А.А. Стенин, В.П. Пасько, М.А. Солдатова

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЛИНЕЙНЫХ КВАЗИСТАЦИОНАРНЫХ СИСТЕМ НА БАЗЕ СПЛАЙН- ФУНКЦИЙ И ФУНКЦИЙ УОЛША

Аннотация. В статье для параметрической идентификации квазистационарных систем предлагается подход, основанный на совместном использовании сплайн-функций и функций Уолша. Алгоритм оценивания параметров линейной квазистационарной системы на каждом из интервалов постоянства параметров сводится к решению n систем линейных алгебраических уравнений. В силу приближенного задания коэффициентов матриц квазистационарной системы, устойчивое решение полученных систем линейных алгебраических уравнений обеспечивается методом регуляризации А.Н. Тихонова.

Ключевые слова: динамические системы, квазистационарность, сплайн-функции, функции Уолша, параметрическая идентификация, адаптивный алгоритм.

Введение

Большой интерес к теории оценивания возник в результате необходимости повышения качества функционирования технических систем, а также вследствие существенного изменения возможностей применения теории оценивания, связанного с огромными возможностями современных вычислительных машин [1,2]. В тоже время существующие методы идентификации зачастую либо вообще не применимы к системам с переменными параметрами, либо не дают возможности получить оценки в аналитическом виде, что очень важно при последующей оптимизации таких систем. С учетом последнего замечания в данной статье для параметрической идентификации квазистационарных систем предлагается подход, основанный на совместном использовании сплайн-функций и функций Уолша [3,4].

Постановка задачи

Для модели линейной динамической системы, описываемой системой дифференциальных уравнений вида:

© Михалев А.И., Стенин А.А., Пасько В.П., Солдатова М.А., 2015

$$\dot{\bar{x}}(t) = A(t)\bar{x}(t) + B(t)\bar{u}(t), \quad t \in [t_0, T_j] \quad (1)$$

где $\bar{x}(t)$ – n -мерный измеряемый вектор состояния; $\bar{u}(t)$ – m -мерный измеряемый вектор управления, а $A(t)$ и $B(t)$ – матрицы неизвестных параметров системы, размерности $n \times n$ и $n \times m$, соответственно, значения которых необходимо оценить.

Если параметры объекта изменяются достаточно медленно по сравнению с длительностью переходных процессов, вызванных изменением входных воздействий, то можно говорить о квазистационарности системы (1). Это означает, что на некоторых интервалах времени $[t_l, t_l + T_l] \in [t_0, T_f]$ ($l = \overline{1, L}$) параметры объекта остаются неизменными и коэффициенты уравнения (1) можно считать постоянными, т.е. $a_{ij}(T_l) = \text{const}$, $b_{ik}(T_l) = \text{const}$ ($i, j = \overline{1, n}$) ($k = \overline{1, m}$). Здесь L – количество интервалов квазистационарности. Оценку параметров будем производить, исходя из минимума квадрата невязки:

$$I = \min \left\{ \int_{t_0}^{t_0+T_f} [\dot{\bar{x}}(t) - A(t)\bar{x}(t) - B(t)\bar{u}(t)]^2 dt \right\} \quad (2)$$

Это позволяет при минимизации интегрального квадратичного критерия невязки (2) получить оценки искомых постоянных коэффициентов разложения в ряд Уолша неизвестных функций параметров $a_{ij}(t)$, $b_{ik}(t)$ путем решения соответствующей системы линейных алгебраических уравнений.

Решение задачи

Для квазистационарной системы вида (1) весь интервал наблюдения $[t_0, T_f]$ некоторым образом разбивается на подинтервалы $[t_l, t_l + T_l]$, где коэффициенты $a_{ij}(T_l), b_{ik}(T_l)$ ($i, j = \overline{1, n}$) ($k = \overline{1, m}$) матриц $A(t), B(t)$ соответственно, можно считать неизменными. Идентификация осуществляется на каждом из интервалов постоянства параметров, при этом для последующего интервала заново оценивается матрица параметров, тогда как данные, не относящиеся к рассматриваемому подинтервалу, полностью игнорируются. Очевидно, что коэффициенты $a_{ij}(T_l), b_{ik}(T_l)$ ($l = \overline{1, L}$) на отдельных подинтервалах могут быть различными. Для системы (1) при условии, что вектор управления $\bar{u}(t)$ задан, а вектор-функция состояния

$\bar{u}(t)$ определена на отрезке $[t_l, t_l + T_l]$ своими значениями $\bar{x}^{(i)} = \bar{x}(t_i), t_i \in [t_l, t_l + T_l] (i = \overline{0, N})$ задача идентификации состоит в нахождении оценок $\hat{a}_{ij}^l = \hat{a}_{ij}^l(T_l), \hat{b}_{ik}^l = \hat{b}_{ik}^l(T_l) (i, j = \overline{1, n}), (k = \overline{1, m})$ неизвестных параметров $a_{ij}(T_l), b_{ik}(T_l)$ матриц $A(t)$ и $B(t)$, обеспечивающих минимум квадратичного критерия (2) внутри рассматриваемого подинтервала $[t_l, t_l + T_l]$.

Применение в задачах идентификации функционала вида (2) предполагает наличие известного аналитического выражения как для вектора состояния $\bar{x}(t)$, так и для его производной $\dot{\bar{x}}(t)$. Используя кубические сплайны для интерполирования значений вектора $\bar{x}^{(i)} (i = \overline{0, N})$:

$$\hat{x}_1(t) \rightarrow S_1(t), \dots, \hat{x}_i(t) \rightarrow S_i(t), \dots, \hat{x}_n(t) \rightarrow S_n(t),$$

получаем аналитическое выражение для оценки $\hat{x}(t)$ – вектор-функции состояния, осуществив таким образом переход от $\bar{x}(t_i) (i = \overline{0, N})$ к $\bar{S}(t)$, где $\bar{S}(t)$ – n -мерная вектор-функция, каждая составляющая $S_i(t) (i = \overline{1, n})$ которой является кубической сплайн-функцией [5]. В силу свойства дифференцируемости сплайнов определяем приближение $(\dot{x}_i(t) - \dot{\hat{x}}_i(t))$ как производную от сплайна $(S_i(t) - \dot{S}_i(t))$. Тогда модель системы (1) примет вид:

$$\dot{S}_i(t) = \sum_{j=1}^n a_{ij}^l S_j(t) + \sum_{k=1}^m b_{ik}^l u_k(t) (i = \overline{1, n}), t \in [t_l, t_l + T_l], \quad (3)$$

а интегральный квадратичный критерий невязки вида (2) системы (1) может быть представлен как:

$$Q_i(\bar{g}_l^i) = \int_{t_l}^{t_l+T_l} [\dot{S}_i(t) - \sum_{j=1}^n a_{ij}^l S_j(t) - \sum_{k=1}^m b_{ik}^l u_k(t)]^2 dt (i = \overline{1, n}). \quad (4)$$

Используя необходимые условия минимума функционала (4), дифференцируем $Q_i (i = \overline{1, n})$ по элементам матриц $A(t)$ и $B(t)$ и приравняем производные нулю:

$$\partial Q_i(\hat{g}_l^{(i)}) / \partial \hat{a}_{ij}^l = 0, \partial Q_i(\hat{g}_l^{(i)}) / \partial \hat{b}_{ik}^l = 0 (j = \overline{1, n}), (k = \overline{1, m}).$$

Тогда для минимума Q_i невязки, получаем

$$\int_{t_l}^{t_l+T_l} [\dot{S}_i(t) - \sum_{j=1}^n \hat{a}_{ij}^l S_j(t) - \sum_{k=1}^m \hat{b}_{ik}^l u_k(t)] [-S_j(t)] dt = 0,$$

$$\int_{t_l}^{t_l+T_l} [\dot{S}_i(t) - \sum_{j=1}^n \hat{a}_{ij}^l S_j(t) - \sum_{k=1}^m \hat{b}_{ik}^l u_k(t)] [-u_k(t)] dt = 0,$$

$$(j = \overline{1, n}), (k = \overline{1, m}).$$

После ряда преобразований для определения вектора оценок $\widehat{g}_l^{(i)}$ на подинтервале $[t_l, t_l + T_l]$ получим систему линейных алгебраических уравнений:

$$C^{(i)} \widehat{g}_l^{(i)} = \bar{d}^{(i)}. \quad (5)$$

Здесь $C^{(i)}$ – матрица размерности $(n+m) \times (n+m)$, имеющая блочную структуру

$$C^{(i)} = \begin{bmatrix} C_{(n \times n)}^{(i)} & \vdots & C_{(n \times m)}^{(i)} \\ \dots & \dots & \dots \\ C_{(m \times n)}^{(i)} & \vdots & C_{(m \times m)}^{(i)} \end{bmatrix},$$

элементы которой определяются следующим образом:

$$C_{(n \times n)}^{(i)} = \{c_{i_1, j}^{(i)}\}, c_{i_1, j}^{(i)} = \int_{t_l}^{t_l+T_l} S_{i_1}(t) S_j(t) dt, \quad (6)$$

$$C_{(n \times m)}^{(i)} = \{c_{i_1, k}^{(i)}\}, c_{i_1, k}^{(i)} = \int_{t_l}^{t_l+T_l} S_{i_1}(t) u_k(t) dt, \quad (7)$$

$$C_{(m \times n)}^{(i)} = \{c_{kj}^{(i)}\}, c_{kj}^{(i)} = \int_{t_l}^{t_l+T_l} u_k(t) S_j(t) dt, \quad (8)$$

$$C_{(m \times m)}^{(i)} = \{c_{i_2, k}^{(i)}\}, c_{i_2, k}^{(i)} = \int_{t_l}^{t_l+T_l} u_{i_2}(t) u_k(t) dt; \quad (9)$$

$$\bar{d}^{(i)T} = \{d_1^{(i)}, \dots, d_n^{(i)}, d_{n+1}^{(i)}, \dots, d_{n+m}^{(i)}\} - (n+m)\text{-мерный вектор свободных членов, элементы которого определяются следующим образом:}$$

$$d_{l_1}^{(i)} = \int_{t_l}^{t_l+T_l} S_{l_1}(t) \dot{S}_i(t) dt (l_1 = \overline{1, n}), \quad (10)$$

$$d_{l_2}^{(i)} = \int_{t_l}^{t_l+T_l} u_{l_2-n}(t) \dot{S}_i(t) dt (l_2 = \overline{n+1, n+m}), \quad (11)$$

$$\widehat{g}_l^{(i)} = \{\hat{a}_{i1}^l, \dots, \hat{a}_{in}^l, \hat{b}_{i1}^l, \dots, \hat{b}_{n+m}^l\} - (n+m)\text{-мерный вектор оценок неизвестных параметров на интервале квазистационарности } [t_l, t_l + T_l].$$

Заметим, что входные данные (коэффициенты матрицы и правой части) системы (5) определяются с погрешностью, зависящей от погрешности приближения состояния системы (3) сплайнами и аппроксимации соотношений (6) – (11) формулами численного интегрирования, которую всегда можно оценить. В силу приближенного задания коэффициентов матриц $C^{(i)}, \bar{d}^{(i)}$, устойчивое решение системы (5) может быть получено методом регуляризации А.Н. Тихонова [6].

Таким образом, алгоритм оценивания параметров линейной квазистационарной системы (3) сведен к решению n систем линейных алгебраических уравнений вида (5) на каждом из интервалов постоянства параметров T_l .

Перейдем к вопросу о выборе интервалов квазистационарности. Рассмотрим два способа разбиения интервала наблюдения $[t_0, T_f]$.

1. Алгоритм с фиксированным разбиением интервала. Такой метод эффективен при наличии некоторой априорной информации о динамике изменения неизвестных параметров во времени. В этом случае удастся построить хорошее равномерное или неравномерное разбиение интервала. При выборе длительности интервала квазистационарности можно положить $T_l \geq t_{\text{рег}}$, где $t_{\text{рег}}$ – время переходного процесса.

2. Алгоритм с адаптивным выбором разбиения интервала. Текущую информацию о поведении системы (наблюдения состояния в некоторых точках) можно использовать для адаптивного выбора величина временных интервалов при кусочно-постоянной аппроксимации неизвестных параметров. Алгоритм строится следующим образом.

0 шаг. Пусть $l=1$.

1 шаг. На интервале $[t_l^{(i)}, t_{l+1}^{(i)H}]$, где $t_{l+1}^{(i)H} = t_l^{(i)} + \delta_l, \delta_l > 0$ получена оценка $\hat{g}_l^{(i)}$ по приведенному алгоритму идентификации.

2 шаг. На интервале $[t_{l+1}^{(i)H}, t_{l+1}^{(i)'}]$, где $t_{l+1}^{(i)'} = t_{l+1}^{(i)H} + \eta_0 \delta_l$, по уравнениям состояния (1) с оценками $\hat{g}_l^{(i)}$ рассчитывается состояние модели $x_i^M(t)$, при этом полагаем $x_i^M(t_{l+1}^{(i)H}) = x_i(t_{l+1}^{(i)H})$.

3 шаг. В окрестности $[t_{l+1}^{(i)'} - \delta', t_{l+1}^{(i)'}]$ ($\delta' < t_{l+1}^{(i)'} - t_{l+1}^{(i)H}$) интервала $[t_{l+1}^{(i)H}, t_{l+1}^{(i)'}]$ рассматривается функционал $I = 1/P \sum_{p=1}^P (x_i(t_p) - x_i^M(t_p))^2$.

Если:

$I > \varepsilon$, где $\varepsilon > 0$, то параметр η_0 уменьшается, вводится параметр $\eta_1 = \mu \eta_0$ ($0 < \mu < 1, \mu = const$) и происходит переход к шагу 2.

Если через m шагов $\eta_m = \mu^m \eta_0 \approx 0$, то переход к шагу 4.

$I \leq \varepsilon$. Условие (4) не выполнилось ни на одном из шагов, то формируется интервал $[t_l^{(i)}, t_{l+1}^{(i)}]$, где принимается оценка $\hat{g}_l^{(i)}, t_{l+1}^{(i)H} = t_{l+1}^{(i)'}$ и переход к шагу 2. В противном случае переход к шагу 4.

4 шаг. На интервале $[t_l^{(i)}, t_{l+1}^{(i)}]$, где $t_{l+1}^{(i)} = t_{l+1}^{(i)'}$ принимается оценка $\hat{g}_l^{(i)}$ ($i = \overline{1, n}$).

5 шаг. Полагаем $l = l + 1$ и переход к шагу 1.

Алгоритм выполняется до тех пор, пока не будет проанализирован весь интервал наблюдения. Схема системы, реализующей алгоритм идентификации с адаптивным разбиением временного интервала показана на рис. 1.

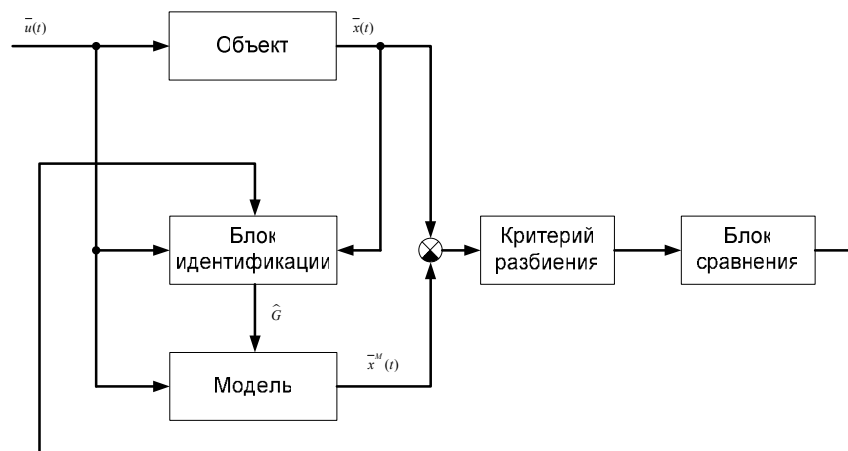


Рисунок 1 - Схема системы, реализующей алгоритм адаптивной идентификации

Для дальнейшего использования полученных оценок $\hat{g}_l^{(i)}$ ($i = \overline{1, n}, l = \overline{1, L}$) в алгоритмах управления их удобно представить в виде

$$\hat{a}_{ij}(t) = \sum_{l=1}^L \hat{a}_{ij}^{(l)} \beta_i^{(l)}(t), \hat{b}_{ik}(t) = \sum_{l=1}^L \hat{b}_{ik}^{(l)} \beta_i^{(l)}(t),$$

где $\hat{a}_{ij}^{(l)}, \hat{b}_{ik}^{(l)}$ – постоянные коэффициенты, полученные в результате алгоритма идентификации на интервале $[t_l^{(i)}, t_{l+1}^{(i)}]$; $\beta_i^{(l)}(t)$ – известные функции, определяемые следующим образом:

$$\beta_i^{(l)}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } t \in [t_l^{(i)}, t_{l+1}^{(i)}] \subset [t_0, T_f], \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

В качестве примера рассмотрим задачу идентификации нестационарного объекта второго порядка

$$\dot{x}_1(t) = a_{12}(t)x_2(t),$$

$$\dot{x}_2(t) = b_2(t)u(t), \quad t \in [0, 100]$$

где $x_1(0) = 30$, $x_2(0) = 50$, $b_2(t) = 1$, $u(t) = -1$. Точное значение оцениваемого параметра $a_{12}(t) = 0,000012t^3 - 0,0014t^2 + 0,033t + 2$. Параметры алгоритмов разбиения временного интервала следующие: $L = 10$; $P = 5$; $\delta' = 1$; $\delta_l = 1$ для всех l ; $\eta_0 = 10$; $\varepsilon = 0,2$; $\mu = 0,5$. Результаты оценивания $\hat{a}_{12}(t)$ для фиксированного ($L = 10$) и адаптивного разбиения интервала приводятся на рис.2, где кривая 1 – точное значение $a_{12}(t)$, кривая 2 – оценка $\hat{a}_{12}(t)$ при фиксированном разбиении; кривая 3 – оценка $\hat{a}_{12}(t)$ при адаптивном разбиении.

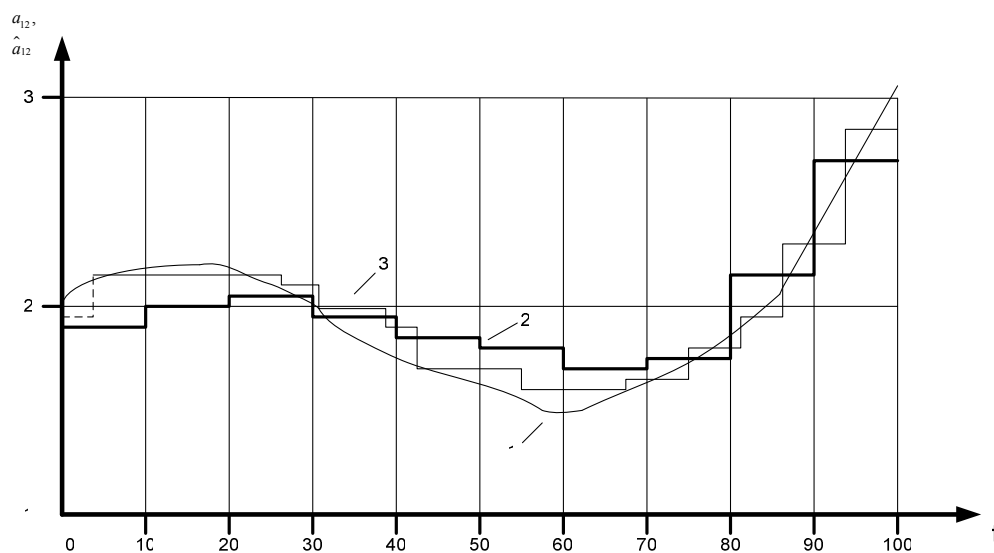


Рисунок 2 - Результаты моделирования алгоритма адаптивного оценивания

Точность оценки параметра $a_{12}(t)$ характеризуется величиной:

$$\delta^2 = \sum_{m=0}^M [\delta \hat{a}_{12}(t_m)]^2 / \sum_{m=0}^M [a_{12}(t_m)]^2.$$

Сравнение оценок, полученных при фиксированном и адаптивном разбиении временного интервала, для рассмотренного примера позволяет сделать вывод, что точность оценки параметра $a_{12}(t)$ может быть существенно повышена при использовании алгоритма с адаптивным выбором интервала квазистационарности.

Выводы

Использование предложенного в данной статье подхода к параметрической идентификации нестационарных систем, основанного на совместном использовании сплайн-функций и функций Уолша, позволяет получить оценки неизвестных параметров в аналитическом виде, что является одним из необходимых условий при оптимизации таких систем. Практическая реализация данного подхода показана на примере квазистационарной системы. Для увеличения точности оценки предложен адаптивный алгоритм разбиения интервала наблюдения. Данный подход может быть обобщен на линейные динамические системы с распределенными параметрами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. – М.: Мир. – 1975. – 684с.
2. Новоселов О. Н. Идентификация и анализ динамических систем: Монография. 2-е изд. испр. и доп. — М.: Изд. Моск. гос. ун-та леса, 2007. — 316 с.
3. Chen C. F., Hsiao C. H. Walsh series analysis in optimal control // Int. g. Control. – 1979. – v.21. – p.p.881-897с
4. Залманзон Л. А. Преобразования Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях. — М.: Наука, 1989.
5. Де Бор К. Практическое руководство по сплайнам. М.: Радио и связь, 1985, 304 с.
6. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука. – 1986. – 288с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОРРОЗИИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОЛЕС

Исследовали влияние коррозионных повреждений на механические свойства колесной стали и железнодорожных колес.

Ключевые слова: железнодорожное колесо, колесная сталь, коррозия, обод, диск, поверхность катания

Проведен анализ современных материалов для защиты железнодорожных колес от коррозионных повреждений и разработать систему защиты поверхностей железнодорожных колес, которая может быть использована при хранении колес на складах и припортовых зонах, транспортировке морскими и сухопутными путями, а также при эксплуатации.

Постановка проблемы

Химическое или электрохимическое взаимодействие металлов и сплавов с окружающей средой и, протекание коррозионных процессов на металлической поверхности неизбежно вследствие термодинамической неустойчивости металла.

Наличие продуктов коррозионного взаимодействия поверхности колес с агрессивными компонентами окружающей среды, несомненно, оказывает существенное влияние на зарождение усталостных повреждений [1 – 12]. Необходима защита поверхности колес от коррозионных повреждений на всех этапах «жизни» колес, в том числе на предэксплуатационных этапах – при хранении и транспортировке к потребителям.

Целью данной работы было изучение влияния коррозионных повреждений на механические свойства колесной стали и железнодорожных колес.

Материалы и методики исследований

Исследовали скорость коррозии колесных сталей марки R7 (ISO 1005-6-94) и марок 2, 3 (ГОСТ 10791-2011) в условиях, которые моделируют условия «жизни» железнодорожных колес, изготовлен-

ных из этих марок: R7 - для пассажирских вагонов локомотивной тяги, пассажирских локомотивов, путевых машин, немоторных вагонов электро- и дизель-поездов; из стали марки 2 – для пассажирских вагонов по требованию потребителей и немоторных вагонов электро- и дизель-поездов; из стали марки 3 – для грузовых вагонов, маневровых и грузовых локомотивов (таблица 1).

Таблица 1

Химический состав образцов колесной стали

Марка стали	Массовая доля элементов, %										
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Al	V	Cu	Ti	S	P
R7	0,46	0,74	0,34	0,19	0,05	0,022	0,032	0,06	0,030	0,007	0,035
2	0,58	0,73	0,32	0,11	0,04	0,017	-	0,08	0,006	0,009	0,018
3	0,66	0,74	0,34	0,09	0,05	0,025	-	0,07	0,006	0,008	0,006

Коррозионные испытания образцов, вырезанных из дисков и ободьев исследованных колес, проводили в камере солевого тумана SC 450/KWT (ГОСТ 9.401), в термогидрокамере Г-4 (ГОСТ 9.041 – 74), натурные испытания проводили на площадке для атмосферных исследований (ГОСТ 15150 – 69 и ГОСТ 9.039 – 74).

Результаты исследований и их обсуждение

После коррозионных испытаний на поверхности всех образцов имелись продукты коррозии, количество которых зависело от типа коррозионной среды, содержания углерода в сталях, места вырезки образцов (рисунок 1).

Результаты исследований коррозионных свойств образцов сталей марок R7, 2, и 3 приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты испытаний образцов колесной стали

Марка стали	Часть колеса	Степень поражения поверхности (%) за период (сут) испытаний в		
		камере солевого тумана, 3 сут	термогидрокамере Г-4, 190 сут	натурных условиях, 250 сут
R7	обод	100	100	80
	диск	100	100	75
2	обод	100	100	97
	диск	100	100	90
3	обод	100	100	100
	диск	100	100	100

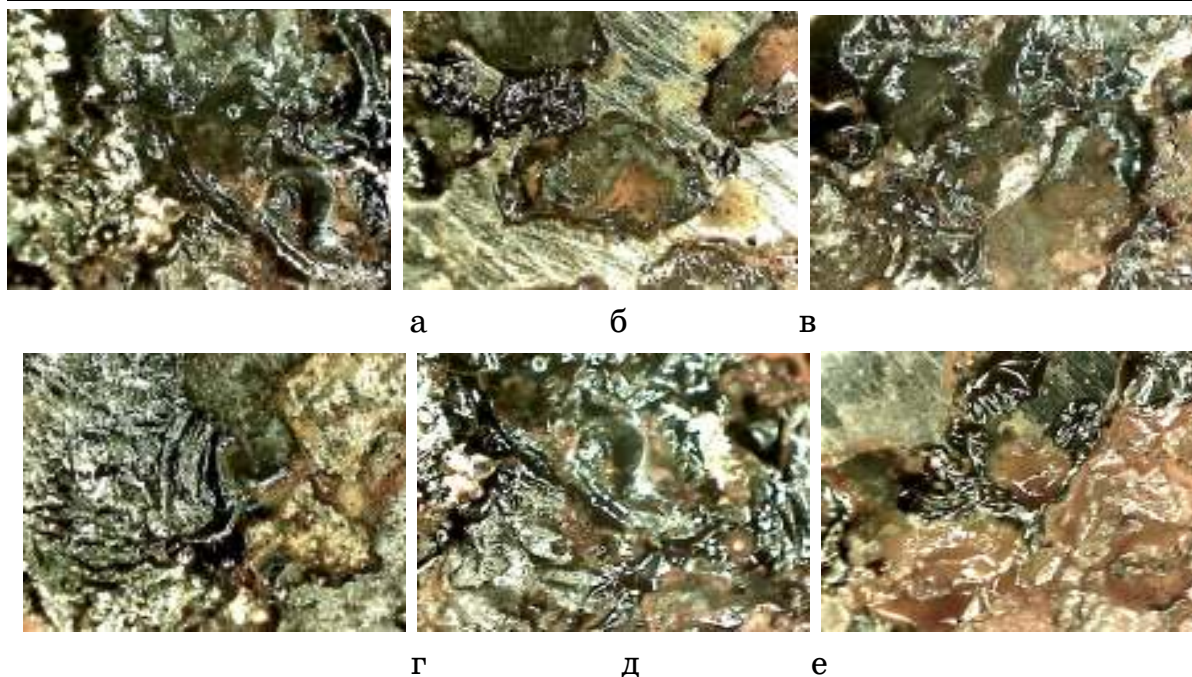


Рисунок 1 - Вид поверхности образцов после коррозионных испытаний в камере солевого тумана: а, в, д – из ободьев колеса; б, г, е – из дисков колес из сталей марок R7, 2, 3, соответственно: x200

При увеличении содержания углерода в сталях скорость коррозии возрастает во всех исследованных коррозионных средах. Образцы из ободьев колес корродировали интенсивнее, чем образцы из дисков. Об этом свидетельствуют как размеры очагов коррозии, так и их общее количество. Представляется, что наличие в ободьях колес остаточных термических напряжений способствует ускорению коррозионного взаимодействия сталей с агрессивными средами.

Результаты механических испытаний образцов колесных сталей марок R7, 2 и 3 в исходном состоянии и после испытаний в различных коррозионных средах приведены в таблице 3.

Как следует из приведенных данных, механические свойства образцов сталей в исходном состоянии зависят от содержания углерода в сталях и от места вырезки образцов из различных участков колес. При этом уровень механических свойств всех указанных сталей соответствует требованиям ISO 1005-6-94 и ГОСТ 10791-2011 для колесных сталей с различным содержанием углерода.

**Результаты механических испытаний образцов колесных сталей
марок R7, 2, 3 до и после коррозионных испытаний**

Марка стали	Место вырезки образца	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %	Твердость, НВ	Ударная вязкость a_n , Дж/см ²	Временное сопротивление σ_b , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа
До испытаний							
R7	обод	18,1	46,3	253	29,0	873	584
	диск	21,2	42,3	201	62,0	725	404
2	обод	15,0	35,0	299	45,0	1045	685
	диск	21,0	37,0	238	43,0	834	400
3	обод	16,0	50,0	307	40,0	1075	685
	диск	17,0	39,0	236	30,0	825	416
После натурных испытаний							
R7	обод	18,0	47,0	247	80,0	864	579
	диск	20,0	43,0	202	65,0	707	403
2	обод	14,0	35,5	300	35,0	1051	687
	диск	19,0	36,5	236	43,0	825	398
3	обод	15,5	50,0	309	45,0	1080	700
	диск	16,0	37,0	236	28,0	825	422
После испытаний в термогидрокамере Г-4							
R7	обод	16,5	49,0	250	61,0	874	579
	диск	16,0	49,0	204	49,0	714	398
2	обод	13,0	37,5	303	55,0	1061	687
	диск	17,0	31,5	230	40,0	805	393
3	обод	14,0	46,0	317	39,0	1110	707
	диск	13,0	31,0	247	15,0	864	398
После испытаний в камере солевого тумана							
R7	обод	15,0	49,0	251	60,0	880	577
	диск	14,0	47,0	197	45,0	690	392
2	обод	12,0	38,0	306	50,0	1072	689
	диск	16,0	30,0	226	39,0	790	388
3	обод	13,0	42,0	323	32,0	1130	718
	диск	10,0	26,0	237	14,0	830	390

Принято считать, что отгрузка железнодорожных колес, сертифицированных в соответствии с требованиями стандартов, гарантирует потребителю их надежность и долговечность при эксплуатации. Однако чаще всего колеса подвергаются более или менее длительному

хранению на складах и при их транспортировке сухопутными или морскими путями. При этом и при эксплуатации колеса подвергаются воздействию окружающих сред. Вследствие коррозионного взаимодействия с этими средами могут ухудшаться эксплуатационные и механические свойства колес, что отрицательно сказывается на их надежности и долговечности.

Наиболее существенное ухудшение механических свойств наблюдалось у образцов после испытаний в камере солевого тумана, несколько меньшим было ухудшение свойств после испытаний образцов в термогидрокамере Г-4 и наименьшее ухудшение свойств наблюдали у образцов, прошедших натурные коррозионные испытания.

На рисунке 2 изображены структуры изломов образцов стали марки 3 после коррозионных испытаний в различных средах, а именно натурных (а), в камерах Г-4 (б) и солевого тумана (в). Очевидно, вследствие коррозионных поражений происходит огрубление участков разрушения с увеличением доли хрупкой составляющей излома образца.

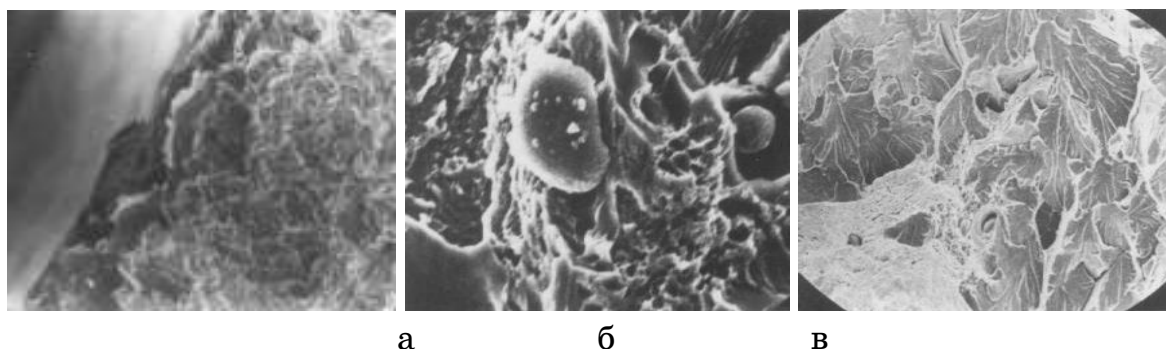


Рисунок 2 - Структура изломов образцов колесной стали марки 3 после коррозионных испытаний: а – $\times 1200$; б, в – $\times 5000$

Результаты механических испытаний образцов позволили обнаружить, а также качественно и количественно оценить влияние коррозионных сред на прочностные и пластические свойства колесных сталей и, следовательно, на эксплуатационные свойства железнодорожных колес. Данные выполненных исследований структурных изменений, проходящих в процессе эксплуатации железнодорожных колес [14], позволяют сделать заключение, что в первую очередь от взаимодействия с окружающей средой необходимо защищать диск железнодорожного колеса, а также переходную зону обод-диск. Это связано с тем, что в процессе движения колеса при эксплуатации,

скорость вращения обода больше, чем у диска и влага, воздействующая на обод, стекает на поверхность диска, дополнительно загрязненную различного рода агрессивными частицами. Кроме того, в процессе эксплуатации в диске возникают достаточно высокие напряжения, которые способствуют ускорению процессов коррозионного разрушения. Необходимо защищать также боковые поверхности ободьев колес. При этом на поверхность катания колеса нельзя наносить какие-либо защитные покрытия, т.к. это может повлиять на условия трения пары колесо-рельс при движении подвижного состава.

Выводы

Необходимо провести анализ современных материалов для защиты железнодорожных колес от коррозионных повреждений и разработать систему защиты поверхностей железнодорожных колес, которая может быть использована при хранении колес на складах и припортовых зонах, транспортировке морскими и сухопутными путями, а также при эксплуатации.

REFERENCES

1. Gubenko S.I. Osobennosti korrozii kolYosnyih staley s raznoy mikrostrukturoy / S.I. Gubenko, S.I. Pinchuk, E.V. Belaya // Teoriya i praktika metallurgii. – 2009. – # 1-2. – S. 111-117.
2. Gubenko S.I. Vliyanie strukturnogo sostoyaniya kolYosnoy stali na razvitie korrozii / S.I. Gubenko, S.I. Pinchuk, E.V. Belaya // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost. – 2009. – #2. – S. 69-73.
3. Gubenko S. Some peculiarities of corrosion of wheels steel / S. Gubenko, S. Pinchuk, Y. Proidak, E. Belaja, A. Kozlowsky, A. Shramko // Transport problems. – 2009. – V. 4. – Issue 3. – Poland. – Part 2. – P. 5-14.
4. Pinchuk S.I. Issledovanie strukturnyih i fazovyih izmeneniy, proishodyaschih vblizi poverhnosti kataniya zheleznodorozhnyih kolYos pri ekspluatatsii / S.I. Pinchuk, S.I. Gubenko, E.V. Belaya // Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie. – Dnepropetrovsk: PGASA. – 2009. – # 48. – S. 11-21.
5. Pinchuk S. Correlation Between Electrochemical Corrosion and Structural State of Steel by Simulation of Operation Conditions of Railway Wheels / S. Pinchuk, S. Gubenko, E. Belaya // Chemistry & Chemical Technology. – 2010. – V. 4. – #2. – LvIv – P. 151-158.
6. Pinchuk S.I. Korroziya zheleznodorozhnyih kolYos pri ekspluatatsii / S.I. Pinchuk, S.I. Gubenko, E.V. Belaya // FIZIKO-hImIchna mehanika

- materIalIv: problemi korozIYi ta protikorozIynogo zahistu materIalIv. – 2010. – # 8. – S. 761-764.
7. Gubenko S.I. Issledovanie faktorov i mehanizma korrozionnogo razrusheniya stali pri ekspluatatsii zheleznodorozhnyih kolYos / S.I. Gubenko, S.I. Pinchuk, A.V. Belaya // Metaloznavstvo ta termIchna obrobka metalIv. – 2011. – # 1-2 (52-53). – S. 94-103.
8. Gubenko S.I. Issledovanie vliyaniya nemetallicheskih vklyucheniy na korrozionnoe povedenie kolYosnoy stali / S.I. Gubenko, S.I. Pinchuk, E.V. Belaya // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost. – 2011. – # 2. – S. 69-71.
9. Gubenko S.I. Rol nemetallicheskih vklyucheniy v zarozhdenii korrozi-onnyih povrezhdeniy v kolYosnoy stali / S.I. Gubenko, S.I. Pinchuk, E.V. Belaya // Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie. – Dnepropetrovsk: PGASA. – 2011. – # 58. – S. 203-206.
10. Gubenko S.I. Vliyanie nemetallicheskih vklyucheniy na mehanicheskie svoystva kolYosnoy stali v razlichnyih sredah / S.I. Gubenko, S.I. Pinchuk, E.V. Belaya // New technologies and achievements in metallurgy and materials engineering. Series: Monographs, #24. – Czestochowa, Poland. – 2012. – S. 602-608.
11. Gubenko S.I. Vliyanie sredy na mehanicheskie svoystva kolYosnoy stali, sodержashey nemetallicheskie vklyucheniya / S.I. Gubenko, S.I. Pinchuk, E.V. Belaya // Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie. – Dnepropetrovsk: PGASA. – 2012. – # 64. – S. 98-102.
12. Pinchuk S.I. Vliyanie korrozionnih povrezhdeniy na mehanicheskie svoystva kolesnoy stali i zheleznodorozhnyih koles / S.I. Pinchuk, S.I. Gubenko, E.V. Belaya, G.Yu. Galchenko // HHIII vseukraYinska naukovo-praktichna konferentsIya «InnovatsIyniy potentsIal svItovoYi nauki – HH storIchchya»: tezi dopovIdey – ZaporIzhzhya. – 2013. – S. 69-74.
13. Tomashov N.D. Teoriya korrozii i zaschityi metallov / N.D. Tomashov. – M.: AN. SSSR, 1959. – S. 497-498.
14. Belaya E.V. Zakonomernosti fazovyyih, strukturnih izmeneniy v kolesnyih stalyah i zaschita poverhnostnyih sloYiv zheleznodorozhnyih koles ot korrozii: dis. k-tatehn.nauk: 05.02.01 / Belaya Elena Viktorovna; NAN Ukrainyi, Nats. Metal. Akad. Ukrainyi. – D., 2014. – S. 57 - 157.

А.А. Внуков, А.Н. Головачев

ВЛИЯНИЕ ТИПА ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ НА ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЕ И СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ

Аннотация. Изучены закономерности влияния различных типов дисперсных добавок на коррозионную стойкость и износостойкость никелевых композиционных электролитических покрытий (КЭП). Определены оптимальные концентрации дисперсных добавок, а также вид добавки, которые обеспечивают максимальный уровень эксплуатационных характеристик покрытий.

Ключевые слова: Композиционные электролитические покрытия, электроосаждение, никель, дисперсные частицы, коррозионная стойкость, износостойкость.

Постановка проблемы

Электрохимическим методом можно получать как моно- или поликомпозиционные электрохимические покрытия на основе соосаженных металлов (сплавов) и дисперсных металлических и неметаллических материалов, так и материалы на основе порошков различной природы с металлическим покрытием. Эти материалы и покрытия сочетают в себе свойства металлов или их сплавов (пластичность, электро- и теплопроводность и др.) и неметаллов (высокая твердость, износостойкость, жаропрочность и др.), превосходят обычные металлические покрытия и материалы по твердости, антифрикционности, жаростойкости, коррозионной стойкости, способности работать в безокислительной среде и обладают рядом других ценных свойств [1].

Композиционные электрохимические покрытия представляют собой композицию на основе металла, в объеме которого может находиться 1 - 50 % и более частиц различного размера и видов.

Композиционные покрытия и материалы получают в электрохимических системах. Электролиз происходит, главным образом, в водных растворах электролитов, присутствие дисперсных материалов в электролите создает особые условия кристаллизации металла. Для

получения КЭП применяются дисперсные материалы различного зернового состава с размером частиц главным образом от нескольких десятых до 50 мкм. При заращивании («цементировании») металлом порошков на матрице или их металлизации верхний предел размера частиц не имеет принципиального значения и может достигать нескольких сотен микрометров [2, 3].

Широкое использование КЭП на основе никеля объясняется как физико-химическими свойствами электрохимически осаждаемого никеля — высокой твердостью и износостойкостью, способностью защищать основной металл от коррозии и обеспечивать ему высокую декоративную отделку, так и легкостью соосаждения с большинством дисперсных частиц различной природы. КЭП на основе никеля используются, главным образом, с целью получения дисперсно-упрочненного износостойкого и жаростойкого покрытия и защитно-декоративной отделки изделий и деталей.

В значительной части опубликованных работ приводятся результаты лабораторных исследований электроосаждения КЭП в электролизерах незначительных объемов, что не только осложняет, но и, в большинстве случаев, делает невозможным использование их результатов в производственных условиях вследствие различия технологических факторов соосаждения (размер и форма детали, скорость подвода частиц к детали, условия взвешивания и поддержания частиц в объеме электролита и др.) [4].

Несмотря на наличие обширного информационного материала в отечественной и зарубежной литературе, обобщить результаты исследований в области КЭП с целью практического их использования без каких-либо корректив не представляется возможным [5]. Поэтому дальнейшее изучение особенностей электроосаждения КЭП в присутствии различных типов дисперсных частиц является актуальным.

Цель и задача исследования

Цель исследования — получение никелевого композиционного электролитического покрытия с максимально высоким регулируемым комплексом его эксплуатационных характеристик.

Задача исследования — определение влияния типа и концентрации упрочняющей дисперсной добавки на коррозионную стойкость и износостойкость электролитического никелевого покрытия.

Методика исследования

Объектом исследований являются композиционные электролитические покрытия на основе никеля, нанесенные на цилиндрические образцы Ст3. Назначение таких покрытий – защита от коррозии и повышение износостойкости изделий.

В качестве дисперсных добавок использовали порошки Al_2O_3 , SiC, а также MoS_2 со средним размером частиц 3-5 мкм. Концентрации указанных дисперсных добавок в электролите: 5, 10 и 20 г/л. Для облегчения процесса соосаждения компонентов КЭП и улучшения его качества в электролит вводили поверхностно-активное вещество (алкил) в количестве 1 г/л.

Для нанесения КЭП использовали стандартные технологические режимы, применяемые для никелирования [6]. Никелирование производили в электролите следующего состава, г/л: $NiSO_4 \cdot 7H_2O$ – 300; $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ – 45; H_2BO_3 – 30; вода техническая – остальное.

Коррозионные испытания проводили в соляном тумане (200 часов) и в гидрокамере (480 часов) в соответствии с ГОСТ 9.308-85. «Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы ускоренных испытаний», после чего производили оценку степени коррозионного поражения поверхности образцов в соответствии с Приложением 2 к ГОСТ 9.308-85.

Износостойкость покрытия оценивали по потере массы образца после его обработки абразивом в планетарной мельнице.

Результаты исследования

Результаты определения коррозионной стойкости исследуемых покрытий приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Результаты определения коррозионной стойкости КЭП в гидрокамере

Вид дисперсных частиц	Степень коррозионного поражения X_A , %		
	концентрация дисперсных частиц, г/л		
	5	10	20
Al_2O_3	10-12	5-7	15-20
MoS_2	10-12	5-7	15-20
SiC	8-10	3-4	10-12
Без частиц	10-12		

Результаты определения коррозионной стойкости КЭП в камере соляного тумана

Вид дисперсных частиц	Степень коррозионного поражения X_A , %		
	концентрация дисперсных частиц, г/л		
	5	10	20
Al_2O_3	13-15	8-10	20-22
MoS_2	13-15	8-10	20-22
SiC	8-10	5-7	13-15
Без частиц	13-15		

Данные по коррозионной стойкости КЭП на основе никеля, полученные по результатам двух способов ускоренных испытаний, полностью коррелируют.

Установлено, что введение рассмотренных типов упрочнителей не приводит к ухудшению коррозионной стойкости никелевого покрытия. Более того, введение в покрытие частиц карбида кремния способствует повышению коррозионной стойкости. На рисунке 1 приведены фотографии поверхности покрытий после испытаний в гидрокамере.

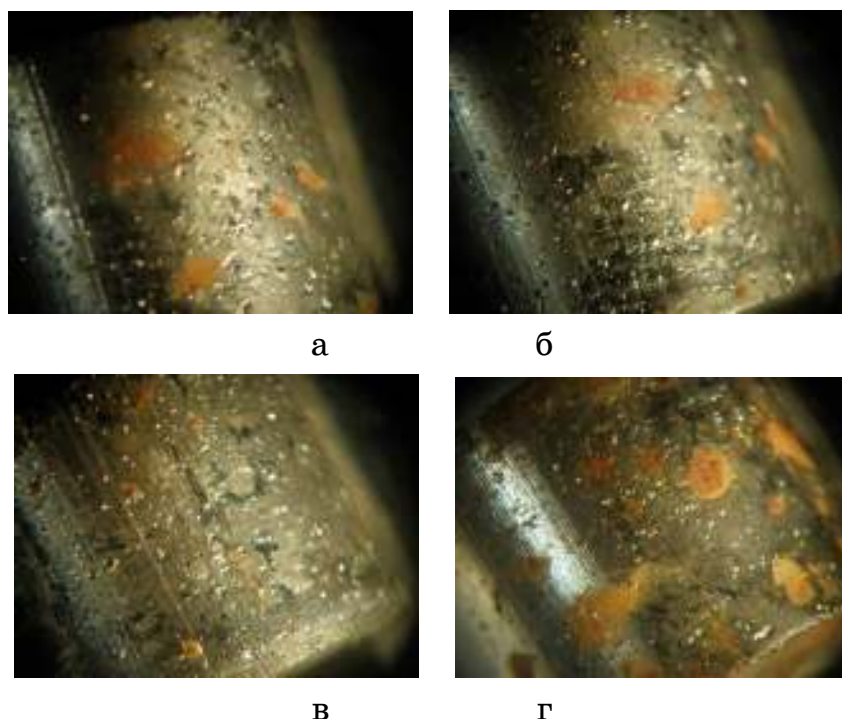


Рисунок 1 – Поверхность покрытий с различными добавками после испытаний в гидрокамере: а – Al_2O_3 ; б – MoS_2 ; в – SiC; г – без добавок

Оптимальная концентрация дисперсных частиц в растворе, обеспечивающая необходимую коррозионную стойкость КЭП составляет 10 г/л. С повышением концентрации частиц до 20 г/л уменьшается электропроводность электролита, и затрудняются условия электроосаждения. Это приводит к формированию тонкого неплотного покрытия с низкой коррозионной стойкостью. На рисунке 2 приведены фотографии поверхности КЭП, упрочненных карбидом кремния, после испытаний в соляном тумане.

Результаты определения износостойкости КЭП на основе никеля приведены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты определения износостойкости КЭП

Вид дисперсных частиц	Износостойкость КЭП, г/м ² ·ч		
	концентрация дисперсных частиц, г/л		
	5	10	20
Al ₂ O ₃	0,2	0,15	0,8
MoS ₂	0,2	0,15	0,8
SiC	0,1	0,08	0,6
Без частиц	1,25		

Согласно полученным данным, введение в никелевое покрытие исследуемых дисперсных частиц значительно повышает его износостойкость. Установлено, что наиболее износостойким является КЭП, содержащие в качестве упрочняющей фазы частицы SiC. Износостойкость таких покрытий на порядок выше, чем покрытий чистым никелем.

Оптимальной концентрацией дисперсных частиц в электролите с точки зрения повышения износостойкости КЭП можно считать 10 г/л. Данная закономерность характерна для всех исследованных видов частиц.

Полученные данные по коррозионной стойкости и износостойкости никелевых КЭП также хорошо согласуются с известными данными по изучению структуры покрытий (рисунок 3).

Как видно из рис. 3, дисперсные частицы оксида алюминия и дисульфида молибдена склонны к агрегатированию, что приводит к образованию большого количества пор в покрытии, и, как следствие,

к снижению коррозионной стойкости и износостойкости. Частицы SiC не слипаются друг с другом и равномерно распределены в покрытии.

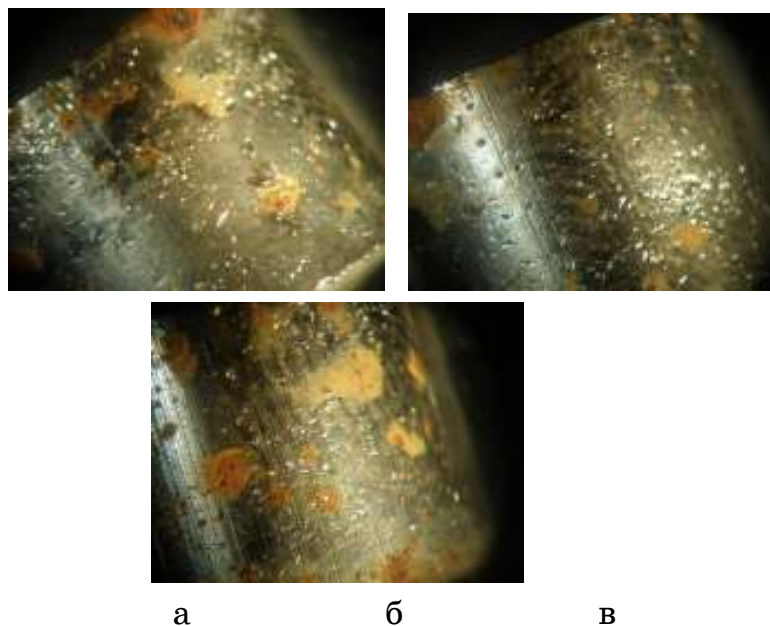


Рисунок 2 – Поверхность КЭП с различными концентрациями частиц SiC после испытаний в условиях соляного тумана:

а – 5 г/л SiC; б – 10 г/л SiC; в - 20 г/л SiC

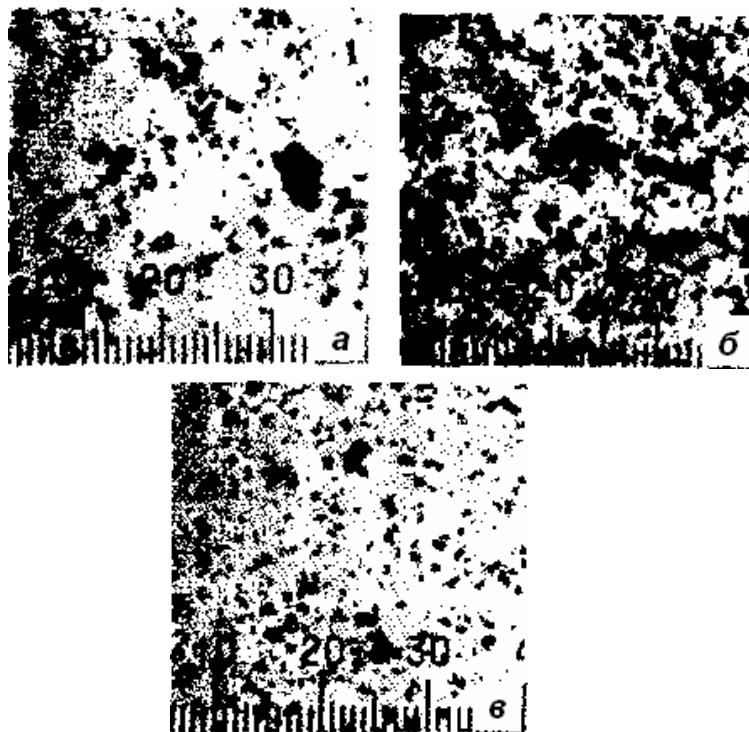


Рисунок 3 – Структура никелевых КЭП с различными видами упрочняющих частиц (концентрация частиц 10 г/л, Ч250)

а – Al_2O_3 ; б – MoS_2 ; в – SiC [7]

Необходимо также отметить, что дисперсная фаза значительно влияет на шероховатость КЭП. При наличии в матрице не электропроводных частиц шероховатость покрытия значительно меньше, чем у покрытия содержащего токопроводящие частицы. Поэтому КЭП с токопроводящими частицами дисульфида молибдена имеют значительно более высокую шероховатость поверхности, чем КЭП с диэлектрическими частицами Al_2O_3 и SiC .

Выводы

1. Введение рассмотренных типов дисперсных частиц не приводит к ухудшению коррозионной стойкости никелевого покрытия.

2. Оптимальная концентрация дисперсных частиц в растворе, обеспечивающая необходимую коррозионную стойкость КЭП, составляет 10 г/л.

4. Введение в никелевые покрытия всех исследованных типов дисперсных частиц значительно повышает их износостойкость. Наиболее износостойким является КЭП, содержащие в качестве упрочняющей фазы частицы SiC .

5. Дисперсные частицы оксида алюминия и дисульфида молибдена склонны к агрегатированию, что приводит к образованию большого количества пор в покрытии, и, как следствие, к снижению коррозионной стойкости и износостойкости. Частицы SiC не слипаются друг с другом и равномерно распределены в покрытии.

6. При наличии в матрице не электропроводных частиц шероховатость покрытия значительно меньше, чем у покрытия содержащего токопроводящие частицы. КЭП с токопроводящими частицами дисульфида молибдена имеют значительно более высокую шероховатость поверхности, чем КЭП с диэлектрическими частицами Al_2O_3 и SiC .

ЛИТЕРАТУРА

1. Антропов Л.И. / О некоторых особенностях электроосаждения покрытий на основе никеля / Л.И. Антропов, М.И. Быкова, И.В. Шклянная // Защита металлов. – 1981. – Т. 17 – №4. – С. 420-424.
2. Лебединский Ю.Н. Электрохимическое осаждение никеля и крупнодисперсных частиц карбида кремния / Ю.Н. Лебединский, Л.И. Антропов // Применение металлопокрытий при производстве и ремонте деталей машин. – К.: 1977. – С. 11-12.
3. Антропов Л.И. Композиционные электрохимические покрытия никелем с включением частиц карбида титана и нитрида бора / Л.И. Антропов, М.И. Быкова, И.В. Шклянная, Н.Я. Настенко // Защита металлов. – 1974. – Т. 1 – №4. – С. 382-385.
4. Лебединский Ю.Н. Композиционные электрохимические покрытия, применяемые на предприятиях Минстройдормаша / Ю.Н. Лебединский.- М.: ЦНИИТЭстроймаш, 1975. – 38 с.
5. Молчанов В.Ф. Комбинированные электролитические покрытия / В.Ф. Молчанов, Ф.А. Аюпов, В.А. Вандышев, В.М. Дзыцук. – К.: Техніка, 1976. – 176 с.
6. Внуков А.А. Исследование совместного влияния параметров электрокристаллизации на морфологию и дисперсность частиц порошка никеля / А.А. Внуков, А.Н. Головачев, В.А. Асмолков // МиТОМ. – 2012. – № 3-4 – С. 75-81.
7. Бородин И.Н. Порошковая гальванотехника // И.Н. Бородин. – М.: машиностроение, 1990. – 240 с.

Г.Н. Трегубенко

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УСВОЕНИЯ АЗОТА ЖИДКОЙ СТАЛЬЮ ИЗ КАРБАМИДСОДЕРЖАЩИХ ЛИГАТУР С ЦЕЛЬЮ РАЗРАБОТКИ ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

Аннотация. Определено какие технологические факторы и как влияют на ассимиляцию азота жидкой сталью из карбамидсодержащих лигатур. Это позволяет разработать эффективную технологию применения новых лигатур для производства сталей с карбонитридным упрочнением. Ключевые слова: сталь, азот, лигатура, карбамид, ассимиляция, модель, технология.

Введение

Постоянная интенсификация условий эксплуатации машин, агрегатов и строительных конструкций ставит перед металлургами достаточно сложную задачу создания новых сталей массового производства, обладающих комплексом высоких потребительских свойств. Принципиально новый уровень свойств достигается в сталях с карбонитридным упрочнением, микролегированных азотом и сильными нитридообразующими элементами (V, Nb, Ti, Al и др.). Наличие в стали высокодисперсных карбонитридов или нитридов приводит к измельчению зерна, параллельному повышению прочностных характеристик и ударной вязкости, снижению температурного порога хладноломкости и т.п.

Постановка проблемы в общем виде

Одной из важных причин, сдерживающих расширение производства сталей с карбонитридным упрочнением, является дефицит и очень высокая стоимость азотоносителей.

Анализ последних исследований и публикаций

В настоящее время технология производства низколегированных и углеродистых сталей с карбонитридным упрочнением традиционна, т.е. в основном такая же, как у базовых сталей [1]. В качестве азотоносителей обычно используют азотированные в твердом

состоянии сплавы хрома, марганца, реже ванадия, главными недостатками которых являются прежде всего дефицитность и очень высокая стоимость, а также крайне низкая однородность по концентрации азота и, соответственно, сложность обеспечения его стабильного содержания в стали и, как следствие, уровня свойств готового проката [1].

Методы легирования сталей азотом непосредственно из газовой фазы либо очень дорогие (плазменно-дуговая плавка [2], автоклавные процессы [3] и др.) либо пока имеют крайне ограниченное распространение (газо-кислородное рафинирование в конвертерах с донной продувкой газовыми смесями переменного состава [4]) и недоступны для массового производства углеродистых и низколегированных сталей с карбонитридным упрочнением.

В литературе имеются сведения [5] о попытках использования в качестве азотоносителя при выплавке низколегированных сталей минеральных и органических соединений (например, селитры, карбамида и др.). Однако сколь-нибудь широкого распространения в сталеплавильной практике эти азотосодержащие материалы не получили ввиду их нетехнологичности (мелкодисперсность, малая плотность) и крайне низкого усвоения азота жидкой ванной.

Получение новых недорогих и эффективных азотсодержащих лигатур (АЛ) с регулируемым, высоким и равномерным содержанием азота может быть осуществлено путем совместного окускования порошковых ферросплавов практически любого состава (в том числе отходов ферросплавного производства) и недефицитных азотсодержащих соединений.

Основным ингредиентом АЛ является азотоноситель. В качестве последнего нами [6] был выбран карбамид (мочевина) – вещество очень богатое азотом (46,7%). По способу производства мочевины является самым доступным азотоносителем, что связано с ее широким применением как органического удобрения. Кроме того, карбамид является нетоксичным, невзрывоопасным и не дорогим азотсодержащим соединением.

Постановка задачи

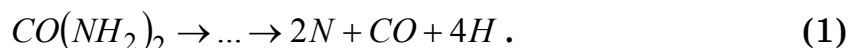
В настоящее время все известные теоретические и технологические закономерности ассимиляции азота жидким металлом определены для легирования или газообразным азотом [7] или азотирован-

ными ферросплавами, в которых азот существует в виде нитридной фазы или твердого раствора [8]. Что касается нового класса азотсодержащих лигатур с принципиально иной формой существования азота (органические соединения), то как теоретические, так и экспериментальные данные по усвоению азота из них жидким металлом практически отсутствуют. Поэтому целью работы являлось моделирование процесса усвоения азота жидкой сталью из карбамидсодержащих лигатур для разработки эффективной технологии их применения.

Изложение основного материала исследования

При легировании АЛ можно предложить следующую модель усвоения азота сталью:

1. Разложение органического азотоносителя (карбамида) на промежуточные соединения (биурет, меламина, циануровую кислоту, аммиак), которые в итоге превращаются в азот, монооксид углерода и водород:



2. В результате химического взаимодействия атомарного азота со сталью и с компонентами активного наполнителя АЛ происходит насыщение окружающих слоев расплава азотом, образование и диссоциация промежуточных нитридных фаз:

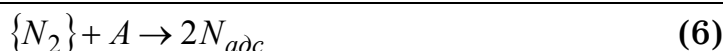


Разложение карбамида при контакте АЛ с жидкой сталью протекает очень быстро и при этом выделяется большое количество атомарного азота и только часть его взаимодействует на этой стадии с металлом. Большая часть атомов азота рекомбинирует в молекулу и десорбируется:



3. Образующиеся по реакции (5) газовые пузырьки перемещаются к поверхности ванны и взаимодействуют с менее насыщенными верхними слоями металла. При этом переход азота в расплав через межфазную поверхность может быть представлен следующей моделью:

а) адсорбция молекул азота на поверхности металла:



б) растворение адсорбированных атомов азота в металле:



где A – адсорбционный центр;

$[N]_{нов}$ – содержание растворенного в металле азота у поверхности раздела сталь – газ, мас. %.

4. Перенос азота в металле через диффузионный пограничный слой.

5. Конвективный перенос в объеме металла.

Первые две и последняя стадии не могут тормозить общий процесс, т.к. реакция (1) протекает очень быстро, образование газовых пузырьков при легировании АЛ не должно встречать сколь-нибудь серьезных энергетических и кинетических затруднений, а интенсивное перемешивание металла в ковше при выпуске исключает лимитирующий характер конвективного массопереноса азота в объеме. В случае присадки АЛ в печь, интенсивные конвективные потоки создаются за счет перемешивания ванны пузырьками газов, образующихся по реакции (1).

Учитывая, что поверхностно-активные вещества (ПАВ) занимают адсорбционные центры на поверхности раздела сталь – газ, то кинетическая константа перехода азота из газового пузырька в расплав (k) по реакциям (6) и (7) обратно пропорциональна концентрации ПАВ:

$$k = \frac{B}{[O] + 0,5[S]} - C, \quad (8)$$

где $[O]$ и $[S]$ – содержание кислорода и серы в расплаве, мас. %;

B и C – константы, определяющие k в строго фиксированных условиях.

Поэтому, если лигатуру присаживают в хорошо раскисленный металл и/или активный наполнитель АЛ содержит сильный раскислитель (десульфуратор) типа FeMn, SiMn, FeSi, SiCa, FeTi, Al, PЗМ и т.п., адсорбционная стадия также вряд ли может быть лимитирующей. Таким образом, наиболее вероятен контроль за ассимиляцией азота сталью со стороны его массопереноса в диффузионном пограничном слое. Тогда скорость насыщения жидкой стали азотом (v) будет описываться известным уравнением [7]:

$$\nu = \beta \frac{S_{нов}}{V_m} ([N]_{нов} - [N]_{\tau}), \quad (9)$$

где β – коэффициент массопереноса азота, м/с;

$S_{нов}$ – поверхность контакта газовой пузырьки – сталь, м²;

V_m – объем металла, м³;

$[N]_{\tau}$ – содержание азота в объеме ванны в момент времени τ , мас. %.

В описанных условиях можно ожидать практически мгновенного достижения равновесной концентрации азота ($[N]_{np}$) на поверхности контакта стали с газовым пузырьком. Соответственно величина $[N]_{нов}$ в уравнении (9) может быть принята равной:

$$[N]_{np} = K_N \sqrt{P_{N_2}}, \quad (10)$$

где K_N – константа растворимости азота в жидкой стали, мас. % / Па^{0,5};

P_{N_2} – парциальное давление азота в газовом пузырьке, Па.

На основании закона Дальтона и реакций (1), (5), и учитывая массовое содержание элементов в карбамиде и молекулярные веса азота, водорода и монооксида углерода, получаем:

$$P_{N_2} = 0,25 P_{общ} \approx 0,25 (P_{вн} + g \rho_m h_{погр}), \quad (11)$$

где $P_{общ}$ – общее давление смеси газов в пузырьке, Па;

$P_{вн}$ – внешнее давление газовой фазы, в обычных условиях равно атмосферному давлению, Па;

g – ускорение силы тяжести, 9,8 м/с²;

ρ_m – плотность металла, кг/м³;

$h_{погр}$ – глубина погружения АЛ в ванну, м.

Так как, глубина погружения АЛ в ванну невелика, ферростатическим давлением металла в уравнении (11) в первом приближении можно пренебречь. Таким образом, парциальное давление азота в газовом пузырьке приблизительно равно 0,25 атм и соответственно $[N]_{np} \approx 0,5 K_N$.

На основании предложенной схемы ассимиляции азота сталью при легировании АЛ, видно, что протекание реакций (2) – (7) и дальнейший перенос азота через диффузионный пограничный слой в объ-

ем металла являются зависимыми событиями. Поэтому, согласно теории вероятностей, общее усвоение азота сталью ($\eta_{общ}$) будет равно:

$$\eta_{общ} = \eta_{ат} + (1 - \eta_{ат}) \cdot \eta_{пуз}, \quad (12)$$

где $\eta_{ат}$ – степень усвоения атомарного азота в результате протекания реакций (2) – (4);

$\eta_{пуз}$ – степень усвоения азота из газовых пузырьков.

Степень усвоения азота по пузырьковому механизму можно определить следующим образом:

$$\eta_{пуз} = \frac{V_{усв}}{V_{выд}}, \quad (13)$$

где $V_{усв}$ – объем азота, усвоенного сталью по пузырьковому механизму, м³;

$V_{выд}$ – объем азота, выделяющегося при вводе АЛ, м³.

В наших условиях азот с достаточной степенью точности можно считать идеальным газом и соответственно объем азота, усвоенного сталью из газовых пузырьков можно определить из уравнения Менделеева – Клайперона:

$$V_{усв} = \frac{M_M}{\mu_N \cdot 100\%} ([N]_к - [N]_0) \frac{RT_{лег}}{P_{вн} + g\rho_M h_{ногр}}, \quad (14)$$

где M_M – масса металла, кг;

μ_N – молекулярный вес азота, кг/моль;

$[N]_к$ и $[N]_0$ – конечное и исходное содержание азота в стали, мас. %;

R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);

$T_{лег}$ – температура стальной ванны при легировании АЛ, К.

Из уравнений (9) и (14) после элементарных алгебраических преобразований и с учетом ранее принятых допущений, получим:

$$V_{усв} = \frac{\beta S_{нов} \rho_M R T_{лег}}{\mu_N P_{вн} \nu \cdot 100\%} (0,5 K_N - [N]_{\tau}) ([N]_к - [N]_0). \quad (15)$$

Объем азота, выделившегося из АЛ, можно выразить как:

$$V_{выд} = \frac{q}{\rho_N} m_{АН} = \frac{q}{\rho_N} x m_{АЛ}, \quad (16)$$

где q – массовая доля азота в азотоносителе (в карбамиде она равна ~0,47);

ρ_N – плотность азота, кг/м³;

$m_{АН}$ – масса азотоносителя, вводимого при легировании АЛ, кг;

x – массовая доля азотоносителя в АЛ, обычно $x=0,15-0,20$;

$m_{АЛ}$ – масса АЛ, кг.

Подставляя уравнения (15) и (16) в (13), получим:

$$\eta_{усв} = \frac{\beta S_{нов} \rho_m \rho_N R T_{лег}}{\mu_N P_{вн} \nu q x m_{АЛ} \cdot 100\%} (0,5 K_N - [N]_{\tau}) ([N]_{\kappa} - [N]_0). \quad (17)$$

На основании уравнения (17) можно определить, какие факторы и как влияют на степень усвоения азота по пузырьковому механизму.

Несмотря на то, что доля $\eta_{пуз}$ в общем усвоении азота достаточно высока, вклад $\eta_{ам}$ может быть весьма существенным, особенно при использовании АЛ на базе отсевов ФМн(70-78), МнС17 и ФХ800. В то же время $\eta_{ам}$ близко к 0 при легировании лигатурами на базе отсевов ФС65 и ФС45, т.к. расплав, находящийся в контакте с АЛ значительно пересыщается кремнием, который уменьшает K_N и в данных условиях не образует нитридов. Таким образом, для повышения степени усвоения азота сталью, в т.ч. и $\eta_{ам}$, необходимо, чтобы активный наполнитель АЛ содержал в достаточном количестве элементы, существенно повышающие растворимость азота в расплаве (Mn, Cr и др.), и сильные нитридообразующие элементы (Ti, Al, Nb, V и др.).

В качестве одного из существенных факторов, повышающих как $\eta_{пуз}$, так и $\eta_{ам}$, следует отметить интенсивность перемешивания ванны в процессе легирования. При перемешивании стали (например, в ковше падающей струей либо в печи электромагнитным перемешиванием) происходит, во-первых, выравнивание состава металла в ванне и, во-вторых, куски АЛ, имеющие плотность ниже жидкой стали, увлекаются движущимся металлом вглубь расплава. Это приводит к тому, что происходит взаимодействие большего объема расплава с атомарным азотом, выделяющимся по реакции (1), и соответственно увеличивается $\eta_{ам}$.

Положительное влияние перемешивания на величину $\eta_{пуз}$ связано с направленностью перемещения масс металла. В принуди-

тельно не перемешиваемой ванне относительно холодные слои металла по ее периферии опускаются вниз, вызывая тем самым восходящие потоки более нагретого металла в центральной части ванны. Такая направленность конвективного движения металла будет способствовать более быстрому перемещению газовых пузырьков и, соответственно, снижению степени усвоения азота. При интенсивном перемешивании стали движение металла тормозит всплытие пузырьков, что должно приводить к увеличению продолжительности контакта сталь – пузырьки (это по своему влиянию аналогично увеличению $S_{нов}$ в выражении (17)) и соответственно увеличивать $\eta_{нуз}$.

Весьма важным фактором, влияющим на многие компоненты уравнения (17), является температура легирования. При этом ее увеличение положительно влияет на коэффициент массопереноса (β), т.к. возрастает экспоненциально коэффициент диффузии и поверхность образующихся газовых пузырьков ($S_{нов}$). С другой стороны, с ростом температуры снижается растворимость азота в стали (K_N), что отрицательно сказывается как на $\eta_{нуз}$, так и на $\eta_{ам}$.

Согласно уравнению (17) увеличение скорости насыщения жидкой стали азотом (ν), в т.ч. путем увеличения массы АЛ ($m_{АЛ}$) и доли азотоносителя в ней (x), приводит к уменьшению $\eta_{нуз}$. Аналогично влияние этих величин и на $\eta_{ам}$. Увеличение степени насыщения металла азотом также отрицательно влияет на его усвоение. Поэтому для значительного увеличения степени усвоения азота, в т.ч. и при необходимости получения высокого содержания азота в стали, близкого к пределу растворимости, следует присаживать АЛ порционно. При этом объем порции при присадке в печь должен постепенно уменьшаться, а в ковш – увеличиваться (т.к. количество металла в ковше с течением времени увеличивается).

Выводы

На основании моделирования процесса усвоения азота жидкой сталью из карбамидсодержащих лигатур разработана эффективная технология их применения. Согласно которой для обеспечения стабильного и максимального усвоения азота сталью при использовании АЛ необходимо:

- 1) активный наполнитель АЛ должен по возможности иметь

высокую плотность и содержать компоненты, существенно повышающие растворимость азота в стали, нитридообразующие элементы и сильный раскислитель (десульфуратор);

2) присадка АЛ должна осуществляться в хорошо раскисленный металл, в максимальной степени легированный элементами, повышающими растворимость азота в стали;

3) присадку новых лигатур необходимо производить при возможно более низкой температуре, обеспечивающей качественную разливку металла;

4) положительное влияние на усвоение азота оказывает интенсивность перемешивания металла, что позволяет рекомендовать присадку АЛ преимущественно в ковш при выпуске стали;

5) при присадке лигатур в печь их следует вводить порционно – не более 6,7 кг/т в один прием, постепенно уменьшая относительную массу порции;

6) для лучшего усвоения азота необходимо притапливать лигатуры более тяжелыми легирующими;

7) для исключения выноса кусков АЛ из ковша их фракция должна быть более 20 мм, при этом верхний предел крупности должен обеспечивать их свободное прохождение через отверстие бункера.

ЛИТЕРАТУРА

1. Свяжин А.Г. Азот при производстве стали. Теория и технология [Текст] / А.Г. Свяжин // Труды конференции «Металлургия и металлурги 21 века». – М.: МИСиС, 2001. – С. 305-320.
2. Medovar B.I. Arc-Slag Remelting of steel and alloys [Текст] / B.I. Medovar, V.Ya. Saenko, G.M. Grigorenko et al. – Cambridge Intern. Soc. Pull, 1996. - 160 p.
3. Рашев Ц.В. Высокоазотистые стали. Металлургия под давлением. [Текст] / Ц.В. Рашев – София, Болгария: Проф. Марин Дринов. – 1995. – 240 с.
4. Нефедов Ю.А. Разработка и промышленное освоение технологии выплавки коррозионностойких сталей методом ГКР [Текст] / Ю.А. Нефедов, А.В. Рабинович, Ю.В. Садовник // Сб. "Современные проблемы металлургии". – Днепропетровск: ГМетАУ, 1999. – Вып. I. – С. 102-113.
5. Ефименко С.П. Некоторые физико-химические аспекты проблемы производства легированных азотом сталей плавильными методами [Текст] / С.П. Ефименко, В.И. Алексеев // Металлы. – 2002. – № 1. – С. 10-17.
6. Трегубенко Г.Н. Разработка технологии низкотемпературного жидкофазного синтеза окискованных азотсодержащих лигатур [Текст] / Г.Н. Трегубенко, Б.А. Нижегородов, Н.В. Игнатов и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2001. – № 4. – С. 24-27.
7. Лакомский В.И. Взаимодействие диатомных газов с жидкими металлами при высоких температурах [Текст] / В.И. Лакомский – К.: Наукова думка, 1992. – 231 с.
8. Венец Ю.С. Моделирование усвоения азота стальной ванной из азотированных ферросплавов [Текст] / Ю.С. Венец, Г.Н. Трегубенко, М.И. Тарасьев, А.В. Рабинович // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2000. – № 4. – С. 35-38.

V.A. Kyrylovych, R.S. Morgunov

KINEMATICS PROBLEMS OF INDUSTRIAL ROBOTS' GRIPPERS INTERACTION WITH OBJECTS OF MANIPULATION

Abstract. The heuristic algorithm of kinematics problems sequence solving, that suitable for automated searching of proposed before geometrically-forces and trajectory-dynamics parameters of industrial robots' grippers interactions with objects of manipulations which are components of automatic synthesis of robotic mechanical assembly technologies in flexible manufacturing cells is proposed.

Introduction. The solving of industrial robots' (IR) grippers (Gr) interactions with objects of manipulations (OM) is one of the stages of flexible manufacturing cells' (FMC) designing, and involves the interactions parameters components (vector-projection, geometrically-force, trajectory-dynamic) determination [3, 6]. All interactions components are interconnected, the search of one component is impossible without definition of another. The geometrically-forces and trajectory-dynamics parameters searching involves the limited set of kinematics problems (KP) solving, which include the search of IR' manipulation systems (MS) configuration states (CS) with Gr for each Gr's trajectories moving with and without OM which are generated earlier. In this the CS's changing for Gr's moving between neighboring points is performed by generalizes coordinates (GC) changing and should provide a possibility to realize the trajectory in control level [4, 5, 7, 8].

The information sources analysis has shown that today there are known a lot of methods of KP solving, which provides solving on geometrical level (definition of trajectories check points geometrical parameters based on terms of geometric IR's compatibility and technological equipment and ensure non-collision condition between IR's MS's construct elements and FMC's work positions (WP)) and kinematic level (could quickly find the MS's links final position, trajectories and velocity strictly for specific IR's MS's models which constructions are previ-

ously analysed and corresponding analytical expressions are established) [4, 5, 8]. Each of KP's methods has own advantages and disadvantages, but does not provide universal Gr's interaction with OM problem solving.

The contents of these Gr's interaction with OM problems has points to necessity for methodical sequence (algorithm) of KP's solving, which will take into account not only the Gr's pole coordinates, but also the Gr's final orientation with and without OM. In most cases in known methods of KP's solving the accent provided only for Gr's pole, and thus the result of KP's solving could be the final set of MS's links GC, which in further analyzed and then the best option will be selected. Its performed by exhaustive search of IR's MS's CS's set, which could last too long and in general case the none of received options will not be suitable for using in Gr's interaction with OM problems. Therefore we could say that the methodical sequence and algorithm for KP's solving, that are suitable for Gr's interaction with OM problems solving, in general case are missing.

The aim of the work is developing KP's solving algorithm which take into account Gr's pole coordinates and orientation, OM's orientation fixed in Gr for each different IR's MS's constructions with theirs kinematic redundancy, suitable for Gr's interactions with OM problems solving in automated synthesis of robotic mechanical assembly technologies.

Main part. The proposed algorithm of KP's solving consists of three main steps. First two steps based on one of the methods of discrete optimization – the method of branches and boundaries [1]. The content of the proposed algorithm is reduced to KP's solving through iterative determination of the distance between the end (which were set) and the current points of Gr's pole and also Gr's fixing points to the last MS's link (with further index CFP) and choosing of the MS's CS, which provides minimal distance between selected points.

The set Gr's points pole (P_{Gr}) and in accordance with Gr's fixing points to the last MS's link (P_{CFP}) which are obtained at the stage of determining the vector-projection component of Gr's interaction with OM [6] and defining a set of possible Gr's orientations that will ensure non-collision between elements of IR (MS, Gr) and WP (OM, device (Dv) and work equipment (WE)). Solving geometrically-force and trajectory-

dynamic problems of Gr's interaction with OM involves generating corresponding trajectory of Gr's movement between WP and determining corresponding MS's CS for each point of the trajectory strictly given initial and final MS's CS, defined by KP solving by two (j-th starting and (j + 1)-th final) check points of trajectory with a set of linear and angular services parameters (LSP and ASP) [3].

A simplified diagram of the algorithm presented in the form SADT-diagram in fig. 1.

For correct working of algorithm the dimensions of each i_q -th GC q_{i_q} built to so-called local time, the value of which is in the range $[0...1]$ where 0 and 1 – respectively the minimum and maximum values of each q_{i_q} -th MS's GC according to formalized description of MS [2]. So MS's configuration searching is automatically takes into account the structure of IR's MS's construction and type of GC (linear, angular).

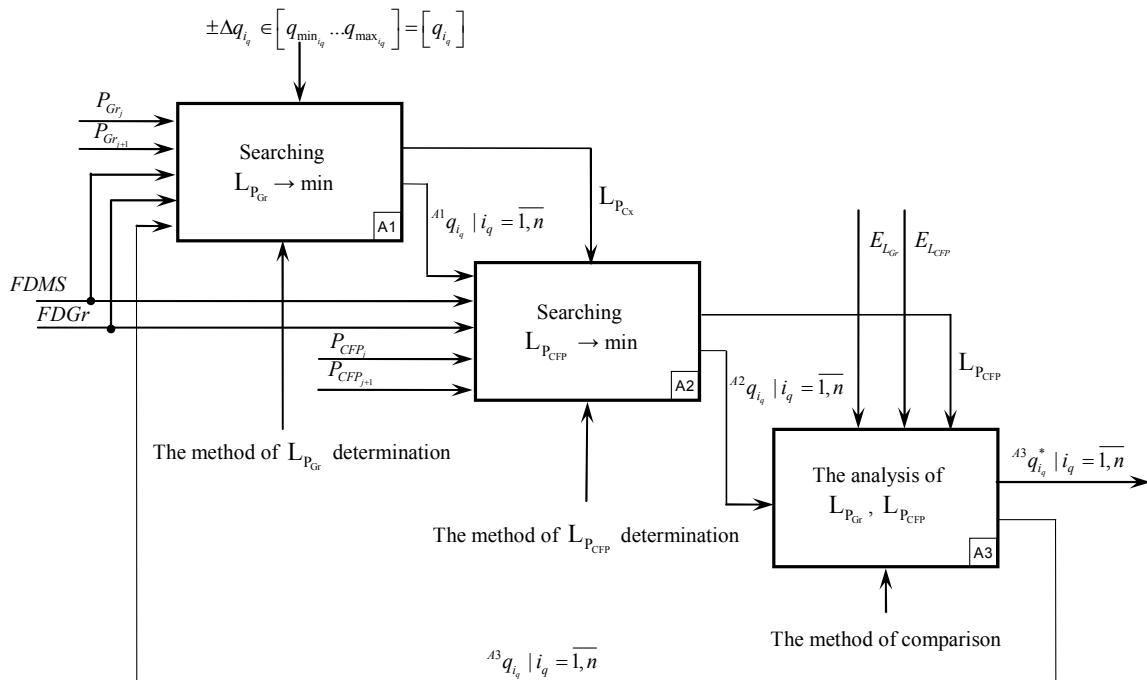


Fig. 1. SADT-diagram of proposed algorithm's work

Briefly the work of proposed algorithm consists of next few steps. The first step is searching the minimum $L_{p_{Gr_{j-(j+1)}}}$ distance between the current j-th and given (j + 1)-th P_{Gr} points. On the second step algo-

rithm searches for the minimum $L_{P_{CFP_j-(j+1)}}$ distance between j -th and $(j + 1)$ -th P_{CFP} points. The content of the third step is comparing the obtained values $L_{P_{Grj-(j+1)}}$ and $L_{P_{CFP_j-(j+1)}}$ with specified acceptable accuracy Gr 's values ($E_{P_{Gr}} \equiv E_{P_{CFP}}$) according to passport data of IR.

The first step (block A1, fig. 1) provides step-changing of each i_q -th MS's GC in the direction from the base (first) MS's link to Gr with the saving of current MS's configuration. Then, for each i_q -th GC should change their local time by the initial step ($\pm \Delta q_{i_q}$), equal to 0.1. The resulting local time converting into GC's value, then the direct problem of kinematics (DPK) is solving based on converted new MS's GC's values and then analyzes the distances between the current Gr 's poles coordinate $P_{Grj/\pm q_i}$ and setted points coordinate P_{Grj+1} (fig. 2) then the option with the lowest difference of received distances values is selecting. So, during comparing process of corresponding parameters of Gr 's moving by $+\Delta q_{i_q}$ and $-\Delta q_{i_q}$ values only the branch with best, ie minimal results, should considered. If the minimum values of two options of GC's changing (with $\tau_{(+\Delta q_{i_q})}$ and $\tau_{(-\Delta q_{i_q})}$) are equals so the steps value should decrease by the $n!$, ie $\Delta q_{i_q} = \Delta q_{i_q} \cdot n!^{-1}$, where n_i – iteration index, and the search operation of the minimum distance between points $P_{Grj/\pm q_i}$ and P_{Grj+1} repeated until the smallest distance will founded or the step reduction will not lead to the reduction of distance between the analyzed j -th and $(j + 1)$ -th points.

The second step (block A2, fig. 1) provides the search of minimal distance between P_{CFP_j} and $P_{CFP_{j+1}}$ points in direction from Gr to MS's base (1-th) link, namely the inverse kinematic problem is solving step by step for each i_q -th GC. The local time serching is same as in step 1.

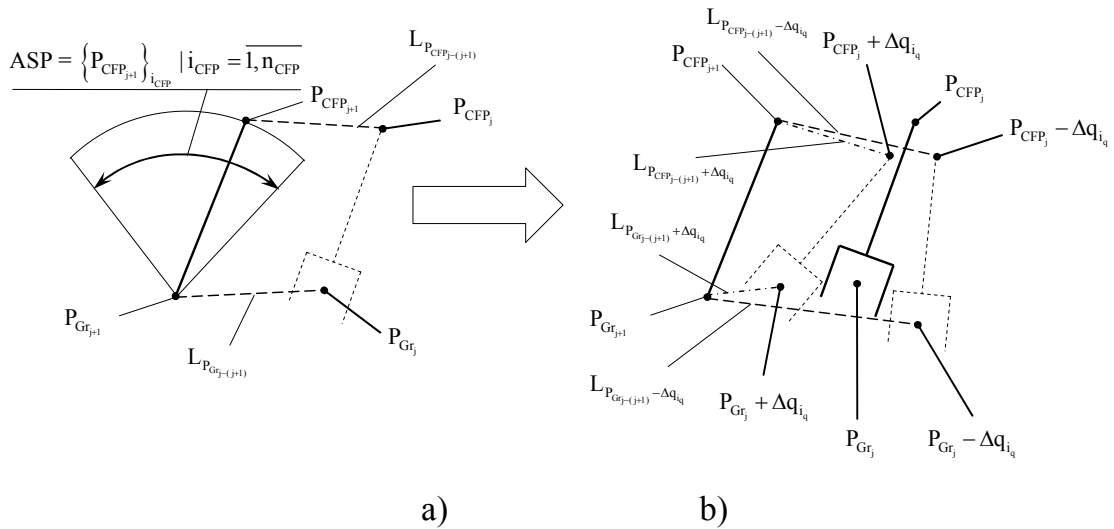


Fig.2. Illustration of new P_{Gr} points coordinates generation by GC's $+\Delta q_{iq}$ and $-\Delta q_{iq}$ values changing (b) within ASP (a)

The third step (block A3, fig. 1) provides the analysis of received values of distances between P_{CFP_j} and $P_{CFP_{j+1}}$, P_{Gr_j} and $P_{Gr_{j+1}}$ points, which should not exceed the values of IR's passport data's accuracy positioning – $E_{CFP} \equiv E_{Gr}$. If the deviation of distances between P_{CFP_j} and $P_{CFP_{j+1}}$, P_{Gr_j} and $P_{Gr_{j+1}}$ points not comply with the condition

$$\left(L(P_{CFP_j} - P_{CFP_{j+1}}) < E_{CFP} \right) \wedge \left(L(P_{Gr_j} - P_{Gr_{j+1}}) < E_{Gr} \right), \quad (1)$$

then the step 1 should be performed, but with current (calculated by step 1, 2) MS's CS. The search continues until the condition (1) will be executed or a moment where on each iteration the values $L(P_{CFP_j} - P_{CFP_{j+1}})$ and $L(P_{Gr_j} - P_{Gr_{j+1}})$ will not decrease.

The results of proposed algorithm's work of KP's solving, that was realized in Delphi programming language, for IR's MS KUKA KR-30, kinematic structure of which is presented at fig. 3 (10 count of links, 6 GC: $q_{i_q} \mid i_q = \overline{1, 6}$), is illustrated at fig. 4 and fig. 5.

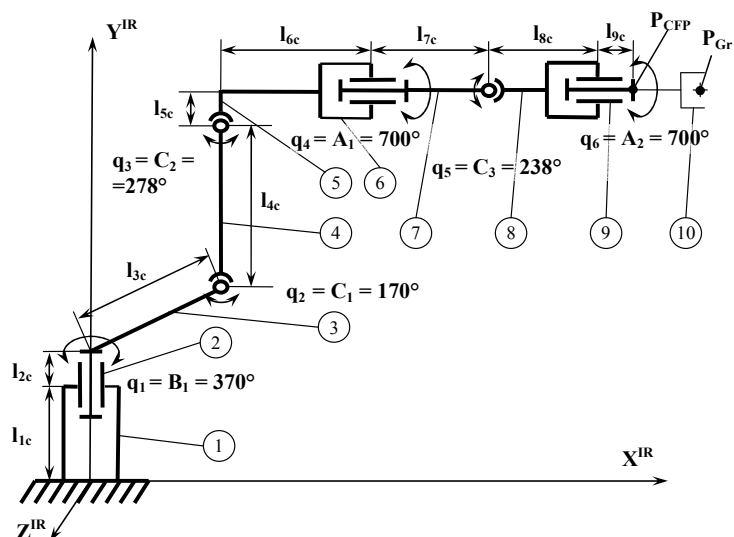


Fig. 3. Illustration of IR's MS KUKA KR-30 kinematic structure

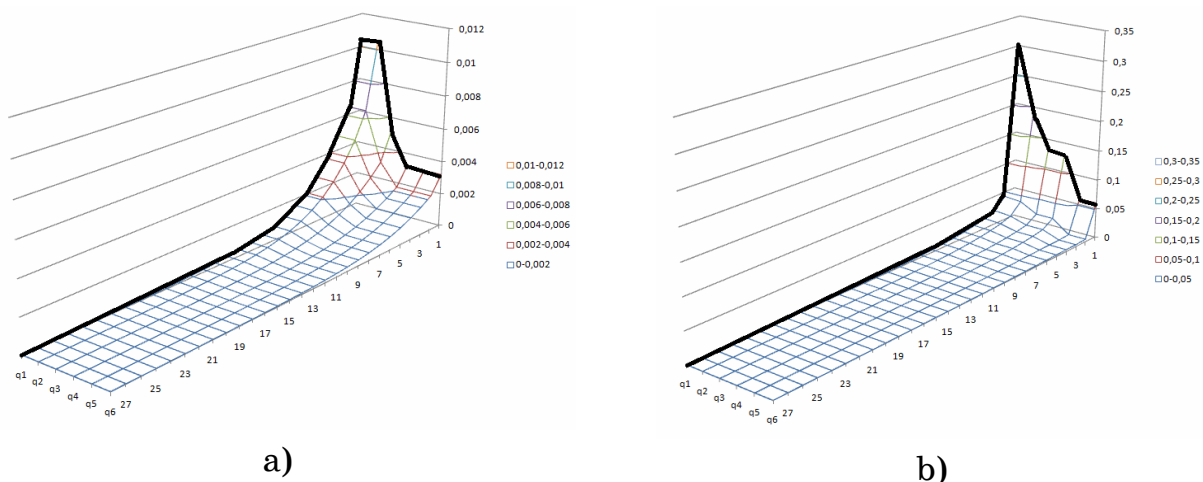
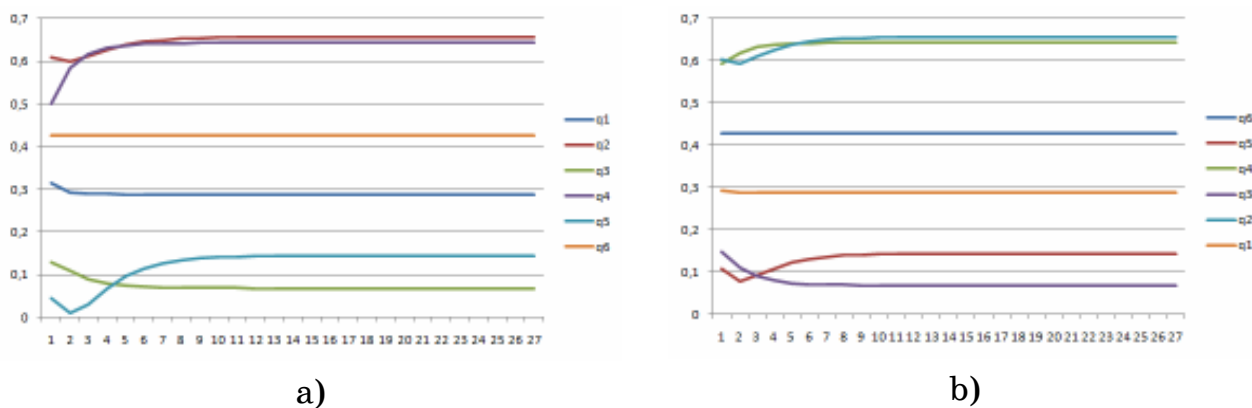
Fig. 4. Illustration of $L_{P_{Grj-(j+1)}}$ (a) and $L_{P_{CFPJ-(j+1)}}$ (b) distances decreasing during the cycle of KP solving with total iteration count $n_i = 28$ 

Fig. 5. Illustration of each MS's GC local times changing during the cycle with 28 iterations of KP solving by fig. 3

Fig. 4 indicates that through actual 28 iterations the received $L_{P_{Gr-(j+1)}}$ value is smallest and equal 0,147 mm, and in further with incrementing the iterations count actually unchanged (fig. 4, a and fig. 5, a).

Fig. 4, b illustrates the $L_{P_{CFPj-(j+1)}}$ difference changing of each th GC ($i_q = \overline{1,6}$) with corresponding local times changing by fig. 5, b and shows that by iterations count $i_L = 28$ the distance $L_{P_{CFPj-(j+1)}} = 0,145$ mm. Note that $E_{CFP} \equiv E_{Gr} = \pm 0,15$ mm [9].

Calculated in proposed way IR's MS's GC are compared with ASP's and LSP's values and used in effective Gr's interaction with OM problems solving.

Conclusions. The analysis of the results for different points $P_{CFP_{j+1}}$ and $P_{Gr_{j+1}}$ coordinates has shown that the decreasing of the distance between analyzed points has changing in first 12 iterations of step 3, as it shown at fig. 4, after that the changing of Δq_{i_q} characterized by thousandths values of $\pm \Delta q_{i_q}$, that are too small and further calculation has not lead to significant changes by condition (1) and therefore ignored.

Thus for increasing the speed of mentioned calculations the number of iterations with GC's values receiving that will satisfy to condition (1) could be reduced (bold line at fig. 4, a and fig. 4, b), which will reduce CPU load at high iterations count (the order of tens of thousands), that defined first of all by each q_{i_q} GC's parameters and their count

The proposed KP's solving algorithm allows fully generate the trajectories of Gr's moving between WP (required for solving geometrically-force and trajectory-dynamic Gr's interactions with OM problems) and has used in automated synthesis of robotic mechanical assembly technologies wich developed in Zhytomyr State Technological University.

REFERENCES

1. Андерсон Д. А. Дискретная математика и комбинаторика / Д. А. Андерсон – Пер. с англ. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2004. – 960 с.
2. Кирилович В.А. Узагальнена функціональна модель промислових роботів / В.А. Кирилович, Р.С. Моргунов // Вісник національного університету "Львівська політехніка" "Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні". – Львів. – 2012. – Вип. №746. – С. 66–70.
3. Кирилович В.А. Методично-програмне забезпечення визначення технологічних параметрів сервісу для тіл обертання / В.А. Кирилович, П.П. Мельничук, Р.С. Моргунов // Науковий вісник Херсонської державної морської академії: Науковий журнал. – Херсон: Видавництво ХДМА. – 2013. – №1 (8). – С.225–232.
4. Корендясев А.И. Теоретические основы робототехники: В 2 кн. : Монография. Кн. 1 / Под ред. С.М. Каплунова. – М. : Наука, 2006. – 383 с.
5. Корендясев А.И. Теоретические основы робототехники: В 2 кн. : Монография. Кн. 2. – М. : Наука, 2006. – 376 с.
6. Мельничук П. П. Задачі технологічної взаємодії схватів промислових роботів з об'єктами маніпулювання в механоскладальних гнучких виробничих комірках / П. П. Мельничук, В. А. Кирилович, Р. С. Моргунов // Збірник наукових праць Житомирського державного технологічного університету "Процеси механічної обробки в машинобудуванні". – Житомир. – 2011. – Вип. №10. – С.24–41.
7. McCarthy J. M. An Introduction to Theoretical Kinematics / J. M. McCarthy. - Cambridge, MA : MIT Press, 1990. – 145 p.
8. Siciliano Bruno. Springer Handbook of Robotics / Bruno Siciliano, Oussama Khatib. – Berlin : Springer, 2008. – 1631p.
9. Kuka Robotics: technical data KR 30-3. [Electronic resource] – the mode of access to the directory: http://roboticturnkeysolutions.com/robots/kuka/datasheet/kr_30.pdf

О.С. Маникаева, Е.А. Арсирый, А.П. Василевская
**МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ САМООРГАНИЗУЮЩЕГОСЯ
СЛОЯ КОХОНЕНА В СИСТЕМАХ НЕЙРОСЕТЕВОГО
РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ
ПО СТАТИСТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ**

Аннотация. При построении систем нейросетевого распознавания образов для принятия решения о состоянии производственной или социальной среды по статистической информации предложено использовать методику машинного обучения на основе кластеризации входного набора признаков, которая предусматривает последовательное выполнение процедур самоорганизации нейронов вычислительного слоя Кохонена, градуировки элементов выходного вектора обучающей выборки и окончательной маркировки нейронов вычислительного слоя Кохонена.

Ключевые слова: машинное обучение, распознавание образов, нейронные сети векторного квантования, самоорганизующиеся слои Кохонена.

Введение. В настоящее время при построении систем информационно-аналитической обработки данных с целью получения не только стандартных отчетов, но и построения правил, зависимостей, тенденций, прогнозов (т.е. извлечения знаний) выделился класс задач связанных с распознаванием состояния (образов) производственной или социальной среды по статистической информации. К примерам таких задач можно отнести: организацию специализированного информационного обслуживания читателей публичной библиотеки в соответствии с оценкой их преимущественных интересов [1], разработку индивидуальной программы переподготовки специалистов на основе оценки их теоретических знаний и практических навыков, а также с учетом требований заказчика [2] или извлечение декларативных знаний по группам организации и условиям труда в цифровом макете предприятия при инициализации проектов по охране труда [3]. Для решения перечисленных и им подобных задач распознавания образов (РО) используется *машинное обучение* – подход, позволяющий на основе *анализа* конечной совокупности объектов (образов), называемой

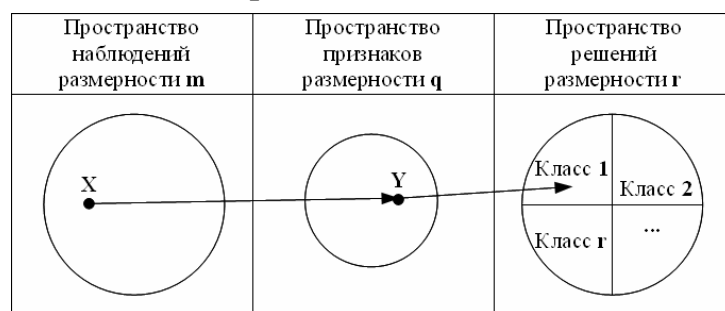
обучающей выборкой, построить алгоритм, способный для любого объекта (образа) выдать достаточно точный его образ (класс). Для измерения *точности* РО вводится некоторый функционал качества.

Актуальность исследований. Известно, что РО определяется как отнесение получаемого образа к определенному классу с помощью выделения существенных признаков, характеризующих этот образ, из общей массы несущественных признаков. Образ представляется как набор из m наблюдений, каждое из которых можно рассматривать как точку x в m -мерном пространстве наблюдений (данных). Извлечение признаков описывается с помощью преобразования, которое переводит точку x в промежуточную точку y в q -мерном пространстве признаков, где $q < m$ [4]. Классификация – преобразование, которое отображает промежуточную точку y в один из классов r -мерного пространства решений (где r – количество классов) (рис 1,а). При этом границы областей пространства решений, которые ассоциируются с определенным классом, формируются в процессе обучения. А точность решения задачи РО зависит от выбора множества признаков и классов, при котором обеспечивается компактное представление образов одного класса в пространстве признаков.

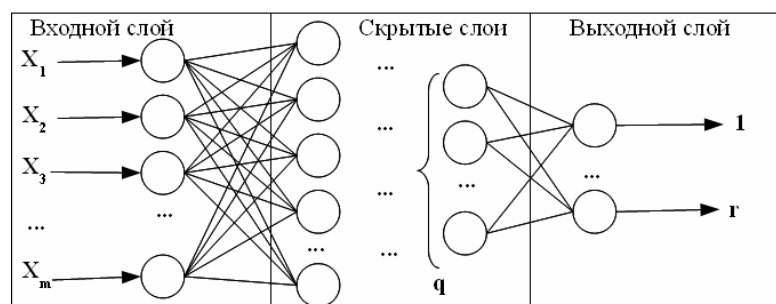
В тех случаях, когда имеющиеся наборы наблюдений недостаточно полны, неоднородны или искажены, применяют обучение распознавания образов на основе нейронных сетей (НС) – нейросетевое распознавание образов (НРО) Системы НРО можно разделить на однородные, состоящие из единой многослойной сети прямого распространения (Multilayer Perceptron), обучаемой с учителем, при этом задача извлечения признаков выполняется нейронами скрытых слоев сети (рис. 1.б) и неоднородные, состоящие из двух сетей кластеризации (извлечения признаков) и классификации, обучаемых без учителя и с учителем соответственно (рис.1.в). Примерами неоднородных сетей являются сети векторного квантования (Learning Vector Quantization), которые являются развитием самоорганизующихся сетей Кохонена и состоят из конкурирующего и линейного слоев [5], а также сети встречного распространения (Counterpropagation Network) сигнала, представляющие собой также двухслойную сеть со слоями Кохонена и Гроссберга [6].

Сложность построения однородных и неоднородных систем НРО для решения практических задач РО по статистической инфор-

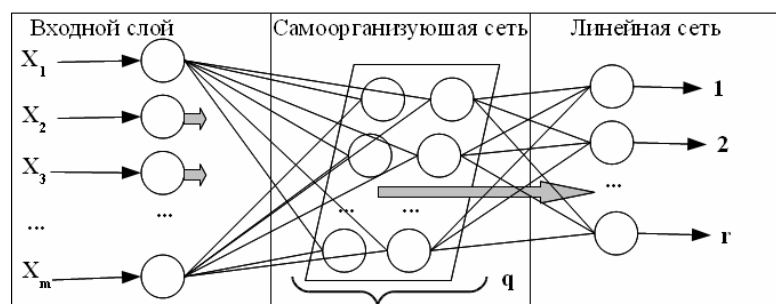
мации связана с необходимостью использования при построении обучающей выборки типа «данные наблюдений – набор признаков – номер класса» априорной информации о количестве классов и множестве признаков, относящихся к заданному классу. Полученные данные наблюдений для таких задач являются слабоструктурированными и неопределенными, потому что собираются из различных источников, интерпретируются с помощью различных и не всегда связанных шкал и часто противоречат друг-другу. А экспертное решение об отнесении образа к определенному классу на основе анализа признаков таких данных является неоднозначным и зависит от квалификации лица, принимающего такое решение.



а



б



в

Рисунок 1 – Схема РО: классический подход (а);
однородное НРО(б); гибридное НРО(в)

Постановка задачи исследований. Для устранения перечисленных проблем при построении систем НРО для решения задачи распо-

знавания состояния производственной или социальной среды по статистической информации предложено использовать методику машинного обучения на основе кластеризации входного набора признаков, которая предусматривает последовательное выполнение процедур самоорганизации нейронов вычислительного слоя Кохонена, градуировки элементов выходного вектора обучающей выборки и окончательной маркировки нейронов вычислительного слоя Кохонена. Реализация процедуры автоматизированной маркировки нейронов самоорганизованного слоя Кохонена позволяет определить формальное соответствие между значением экспертной оценки номера класса и значением номера нейрона победителя градуировочного вектора и, тем самым, снизить субъективность и повысить качество экспертных решений при построении обучающих выборок.

Методика машинного обучения самоорганизующегося слоя Кохонена. Предложенная методика машинного обучения самоорганизующегося слоя Кохонена состоит из 4-х этапов (рис. 2). Рассмотрим их содержание на примере задачи инициализации проекта по охране труда с помощью оценки текущего уровня организации и условий труда на предприятии.

Этап 1: Воспользовавшись предварительно структурированной и представленной в виде электронных опросных форм информацией (набор признаков и оценочных шкал), отражающей уровень организации и условий труда на предприятия, эксперт (инспектор по охране труда) проводит оценку предварительного состояния производственной среды по группам факторов. Так например, к группе «условия труда» относят количественно-качественные факторы, оказывающие влияние на работоспособность и здоровье работника, значения, которых получают с помощью средств мониторинга производственной среды. К таким факторам относятся численно определяемые уровни аэрозольного, электромагнитного, акустического, химического и биологического воздействия, ионизирующего излучения, микроклимата, освещенности и вибрации. В результате анализа данных мониторинга в соответствии с предложенной шкалой, зависящей от уровня предельно допустимой концентрации исследуемого фактора, эксперт оценивает состояние условий труда как: «оптимальное», «допустимое», «вредное», «опасное», «экстремальное»



Рисунок 2 – Методика машинного обучения сомоорганизующегося слоя Кохонена

Электронная опросная форма для проведения предварительной комплексной экспертизы на примере определения уровня аэрозольного воздействия (АВ), как одного из факторов определяющих состоя-

ние производственной среды показана на рисунке 3, а результаты экспертизы в виде X_{ki}, P_k , показаны в таблице 1

Рисунок 3 –Электронная опросная форма для проведения экспертизы уровня АВ

Таблица 1

Экспертная оценка уровня АВ

k	Уровень составляющих фактора x_{ki}				Final level P_k
	disp	conc	time	type	
	x_{k1}	x_{k2}	x_{k3}	x_{k4}	
1	1	1	1	2	1
2	1	1	1	3	1
...	...	...	...	...	...
12	1	2	2	2	2
13	1	2	2	3	2
...	...	...	...	...	...
24	1	2	4	2	3
25	1	2	4	3	3
...	...	...	...	...	...
34	1	3	2	2	4
35	1	3	2	3	4
...	...	...	...	...	...
68	1	3	5	2	5
69	1	3	5	3	5

Этап 2: Для автоматизации проверки качества предварительной экспертизы предложено проводить кластеризацию данных экспертных оценок X_{ki} с помощью самоорганизующегося слоя Кохонена [5-6].

Процесс кластеризации X_{ki} предусматривает последовательное выполнение процедур самоорганизации нейронов вычислительного слоя Кохонена, градуировки элементов выходного вектора обучающей выборки и окончательной маркировки нейронов слоя Кохонена (рис.4).

Процедура самоорганизации 2.1. Классическая процедура самоорганизации вычислительного слоя Кохонена реализована с помощью итеративного алгоритма WTA (Winner Takes All) [5]. Согласно которого на вход слоя Кохонена (рис. 4) последовательно подаются значения векторов из обучающей выборки X_{ki} , $i = \overline{1, n}$, $k = \overline{1, N}$, где, n – количество признаков, а N - количество векторов в выборке.

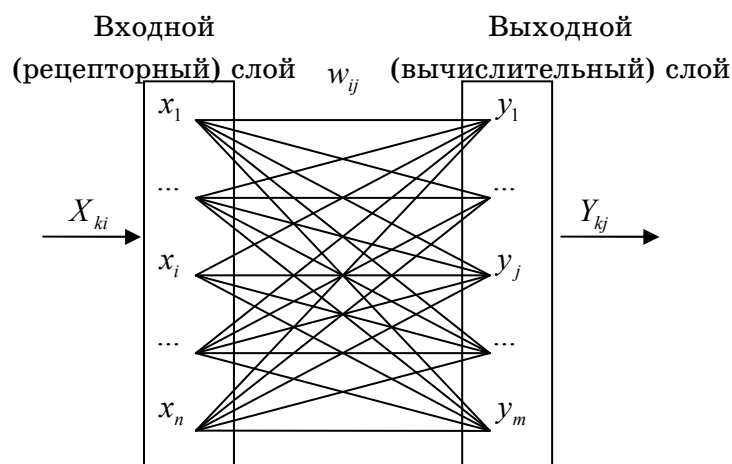


Рисунок 4 – Топология сети Кохонена

Целью самоорганизации является минимизация разницы расстояний:

$$d(x_{ki}, w_{ij}) = \min d(x_{ki}, w_{ij}) \quad (1)$$

между элементами входных векторов x_{ki} и весовыми коэффициентами w_{ij} нейрона-победителя слоя Кохонена, по формуле корректировки:

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + \eta(t)[x_{ki} - w_{ij}(t)] \quad (2)$$

где, $\eta(t)$ - изменяемый во времени коэффициент шага коррекции.

В качестве $\eta(t)$ обычно выбирается монотонно убывающая функция ($0 < \eta(t) < 1$). В качестве меры расстояния используется евклидово расстояние:

$$d(x_{ki}, w_{ij}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{ki} - w_{ij})^2} \quad (3)$$

Процедура градуировки 2.2. При выполнении процедуры градуировки элементов выходного вектора обучающей выборки на вход предварительно самоорганизованного слоя Кохонена последовательно подаются значения векторов из обучающей выборки X_{ki} , где для каждого из них на основе (1) вычисляются значения вектора выходов Y_{kj} , $j = \overline{1, m}$, где m – число нейронов (классов). При этом для каждого k -го вектора из обучающей выборки все значения элементов вектора Y_{kj} равны 0, кроме нейрона-победителя, значение которого равно 1.

Порядковый номер нейрона-победителя j присваивается в качестве значения i -му элементу градуировочного вектора Z_k . Вид результатов процедуры градуировки X_{ki}, Y_{kj}, Z_k при автоматизации извлечения знаний эксперта при проверке качества проведения экспертизы для определения уровня АВ показан в таблице 2.

Таблица 2

Результаты процедуры градуировки

k	X_{ki}				Y_{kj}					Значения градуировочного вектора Z_k
	x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	
1	1	1	1	2	1	0	0	0	0	1
2	1	1	1	3	1	0	0	0	0	1
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
12	1	2	2	2	0	1	0	0	0	2
13	1	2	2	3	0	1	0	0	0	2
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
24	1	2	4	2	0	0	1	0	0	3
25	1	2	4	3	0	0	1	0	0	3
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
34	1	3	2	2	0	0	0	1	0	4
35	1	3	2	3	0	0	0	1	0	4
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
68	1	3	5	2	0	0	0	0	1	5
69	1	3	5	3	0	0	0	0	1	5

Процедура маркировки 2.3. Для определения соответствия между значением итоговой оценки P_k (номер класса) из таблицы 1 и значением номера нейрона победителя градуировочного вектора Z_k , предложена процедура маркировки нейронов слоя Кохонена номерами классов из таблицы предварительной экспертной оценки. Процедура маркировки состоит из 3-х шагов (рис.2).

Шаг 2.3.1. Для всех примеров обучающей выборки формируем двумерную гистограмму $D_{l,j}$ (квадратную матрицу) попарных совпадений номеров нейронов и классов $Z_{kl} = P_{kj}$, где $l, j = \overline{1, m}$. Вид гистограммы $D_{l,j}$, для примера определения уровня АВ, показан в табл.3.

Таблица 3

Двумерная гистограмма $D_{l,j}$

		Номер класса $P_{k,j}$				
		1	2	3	4	5
<i>Номер нейро- на Z_{kl}</i>	1	9	4	0	0	0
	2	1	4	3	2	0
	3	1	4	5	4	0
	4	0	0	1	6	19
	5	0	0	1	4	1

Шаг 2.3.2. Выполняем построчную и постолбцовую корректировку гистограммы $D_{l,j}$, оставляя без изменения только те значения элементов, которые удовлетворяют условию:

$$\begin{cases} \max(D_l) = \max(D_j) \\ l = j \\ \max(D_{lj}) < 0 \end{cases} \quad (4)$$

Остальные значения пересекающихся строки и столбца – обнуляем. Описанная процедура построчно - постолбцовой корректировки двумерной гистограммы выполняется итерационно, пока в каждой строке и столбце останется только одно не нулевое значение. Результат корректировки гистограммы $D_{l,j}$, для примера определения уровня АВ, показан в табл. 4.

Таблица 4

Результат построчно-постолбцовой корректировки гистограммы $D_{l,j}$

		Номер класса $P_{k,j}$				
		1	2	3	4	5
<i>Номер нейро- на Z_{kl}</i>	1	9	0	0	0	0
	2	0	4	0	0	0
	3	0	0	5	0	0
	4	0	0	0	0	19
	5	0	0	0	4	0

Шаг 2.3.3. На последнем шаге процедуры маркировки нейронов слоя Кохонена скорректированная двумерная гистограмма $D_{l,j}$ попарных совпадений преобразуется в таблицу соответствий номеров нейронов и классов для всех примеров обучающей выборки, вид которой для примера определения уровня АВ, показан (табл. 5).

Таблица 5

Окончательная маркировка номера нейрона на основе класса

Z_i	1	2	3	5	4
P_j	1	2	3	4	5

Этап 3: На основе полученной таблицы соответствий номеров нейронов и классов для проверки качества экспертных оценок по всем примерам обучающей выборки рассчитываются ошибки 1 и 2-го рода и их относительные доли истинно положительных случаев и истинно отрицательных случаев [7-8].

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN} \cdot 100\% \quad (5)$$

где TPR - относительная доля истинно положительных случаев (True Positives Rate – TPR); TP – истинно положительные случаи (верно классифицированные положительные примеры); FN – положительные примеры, классифицированные как отрицательные (ошибка I рода).

$$FPR = \frac{FP}{TN + FP} \cdot 100\% \quad (6)$$

где FPR - относительная доля истинно отрицательных случаев (False Positives Rate – FPR); FP - отрицательные примеры, классифицированные как положительные (ошибка II рода); TN – истинно отрицательные случаи (верно классифицированные отрицательные примеры).

Сравнительные значения TPR и FPR рассчитанные при проверке качества экспертных оценок для всех примеров обучающей выборки по всем группам условий труда на предприятии, состояние производственной среды которого оценивается, показаны на рис.5.

Этап 4: Неудовлетворительные значения оценок эксперта (FPR) передаются ему для анализа и выполнения корректировки обучающей выборки, после которой выполняется возврат к этапу 2 (рис. 2) с целью проведения еще одной итерации обучения.

Анализ значений ошибок 1 (рис. 5) и 2-го (рис. 6) рода до и после проведения корректировки показывает повышение относительной доли TPR в среднем на 20% и снижение на 50% FPR для всех групп условий труда. Особенно снижение FPR заметно для уровней химического и биологического воздействия (рис. 6).

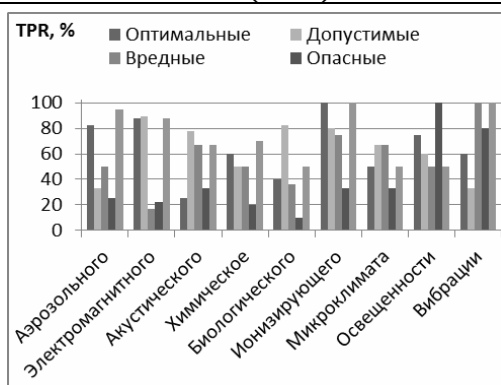
Выводы. Таким образом, апробация разработанной методики машинного обучения на основе кластеризации входного набора признаков с использованием маркировки нейронов конкурирующего слоя

Кохонена и возможностью проверки качества обучения и корректировки обучающей выборки показала повышение относительной доли правильных экспертных оценок на 20% и снижение на 50% ложных оценок по всем группам условий труда.

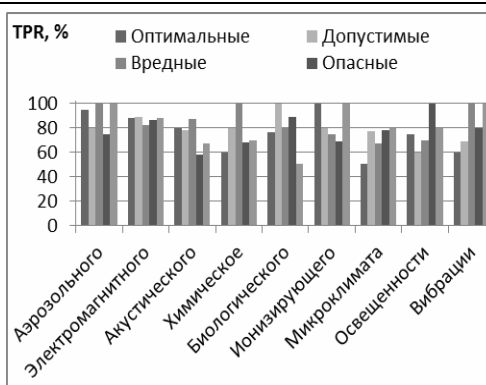
Для подтверждения целесообразности использования только конкурирующего слоя Кохонена вместо сложных неоднородных сетей векторного квантования или встречного распространения при построении систем нейросетевого распознавания образов для принятия решения о состоянии производственной или социальной среды по статистической информации был проведен ряд экспериментальных исследований. Так, на рисунке 7 и 8 показаны значения ошибок первого и второго рода при использовании на этапе 2 предлагаемой методики для первой и второй итерации сети векторного квантования LVQ.

Моделирование выполнялось с помощью функций библиотеки NNTools пакета Matlab. Сеть LVQ состоит из двух слоев первого - конкурирующего и второго – линейного. При создании LVQ требуется прямое задание соотношения кластеров первого слоя с целевыми классами второго. Это вынуждает эксперта использовать некоторую априорную информацию о состоянии исследуемой производственной или социальной среды. Как видим, использование сети LVQ позволило повысить только на 5% относительную долю правильных экспертных оценок (рис.7) и снизить на 20% относительную долю ложных оценок (рис. 8) в среднем по всем группам условий труда. Это соответственно на 15% и 30% хуже чем при аналогичном использовании одного конкурирующего слоя Кохонена.

Кроме того, проведенные эксперименты показали, что использование предложенной методики машинного обучения самоорганизующегося слоя Кохонена при построении систем нейросетевого распознавания образов для решения практических задач оценки состояния производственной и социальной среды позволяет снизить требования к предварительной обработке данных из обучающих выборок и к квалификации лица принимающего решения при анализе этих данных.

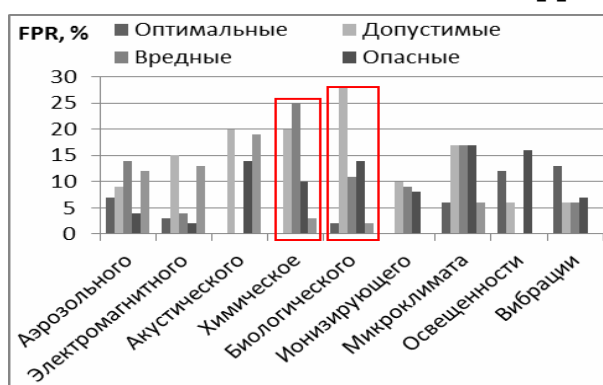


а

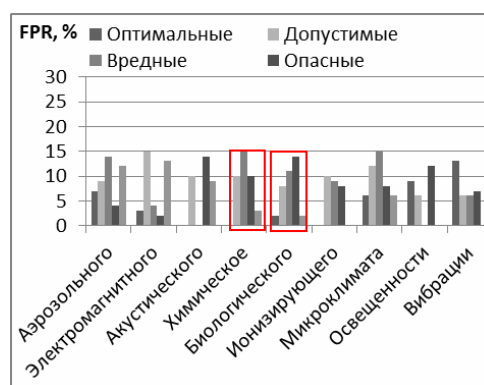


б

Рисунок 5 – Сравнительные результаты по TPR до (а) и после (б) корректировки

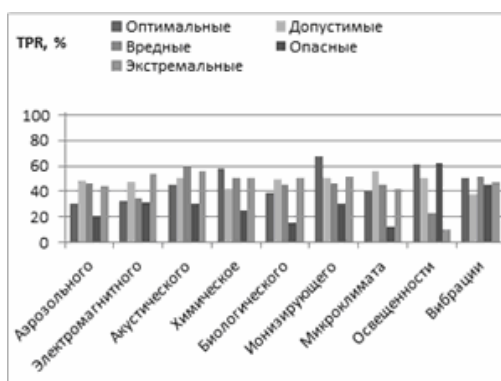


а

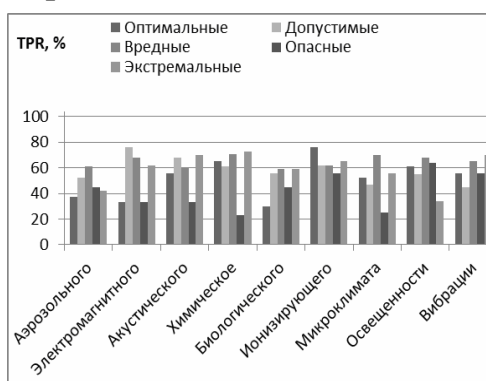


б

Рисунок 6 – Сравнительные результаты по FPR: до – а и после – б корректировки



а



б

Рисунок 7 – Показатели качества экспертных оценок TPR до (а) и после (б) корректировки, при использовании гибридной классификации с помощью сети LVQ

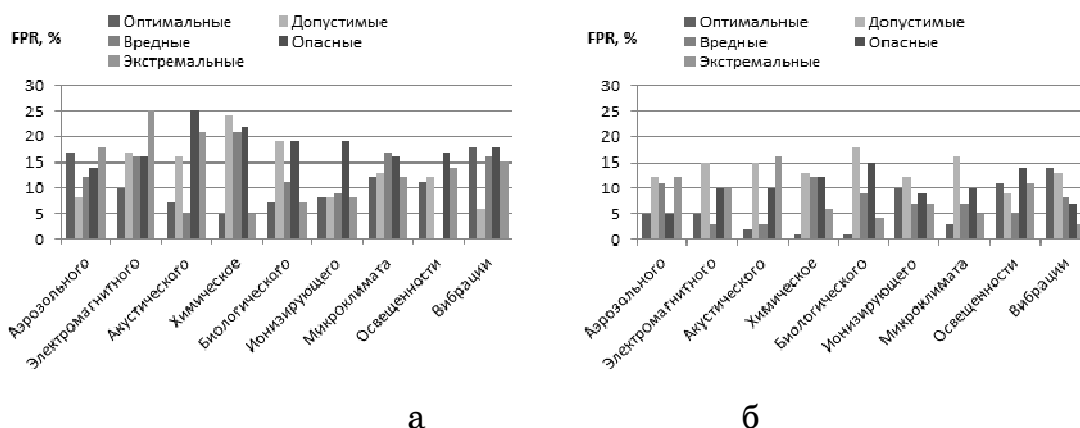


Рисунок 8 – Показатели качества экспертных оценок FPR до (а) и после (б) корректировки, при использовании гибридной классификации с помощью сети LVQ

ЛИТЕРАТУРА

1. Арсирий Е.А. Нейросетевое распознавание образов читателей публичной библиотеки для организации специализированного библиотечного обслуживания/ Арсирий Е.А , Саенко А.А // Труды Одес. политех. Ун-та. – 2011. – Вып.1(35). С.118-124.
2. Арсирий Е.А. Нейросетевое формирование интегральной профессиональной характеристики в системе дистанционного обучения MOODLE/ Арсирий Е.А , Жиленко Е.Г. // Труды Одес. политех. Ун-та. – 2009. – Вып.2/32. С.161-166.
3. Арсирий Е.А. Автоматизация представления и извлечения декларативных знаний в цифровом макете предприятия при инициализации проектов охраны труда /Арсирий Е.А., Антощук С.Г., Маникаева О.С. //Электротехнические и компьютерные системы – 19(95), 2015.С.266-27
4. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс // М.: ООО “И.Д. Вильямс”— С. Хайкин: 2-е изд., испр., пер. с англ. / Под ред. Н.Н. Куссуль. 2006. С. 1104.
5. Кохонен Т. Самоорганизующиеся карты [Текст] / Т. Кохонен; пер. 3-го англ. изд. – М. : БИНОМ Лаборатория знаний, 2008. – 655с
6. Уоссерман Ф. Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика [Текст] /Ф. Уоссерман ; пер. с англ. – М. : Мир, 1992. – 240 с.
7. Паклин Н. Логистическая регрессия и ROC-анализ – математический аппарат. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.basegroup.ru/library/analysis/regression/logistic> (дата доступа 25.04.2015).
8. Davis J., Goadrich M. The Relationship Between Precision-Recall and ROC Curves // Proc. Of 23 International Conference on Machine Learning, Pittsburgh, PA, 2006.

С.А. Рожков

ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОСЕТЕВЫХ СТРУКТУР

Аннотация. В статье рассматривается задача распознавания оптических образов в условиях неопределенности предъявления и возмущений в пространстве оригинала. В основу работы положен метод компенсации входных информационных потоков. Показано, что в системе распознавания в качестве фотопреобразователя возможно использовать нейронную сеть с входным сигналом, который модулирует матрицу весов, при этом входной вектор генерируется как строка эталона.

Ключевые слова. Система распознавания, входной вектор,, оптический образ, матрица весов

Постановка проблемы

При автоматизации контроля качества на технологических производствах существует проблема создания таких систем контроля, которые могли бы обнаруживать и распознавать сложные дефекты тканей с малыми уровнями соотношения сигнал-шум [1, 2]. Создание современных систем автоматической разбраковки тканей применительно к телевизионным методам съема информации и широкое внедрение этих систем сдерживается целым рядом факторов: необходимостью разработки специальных методов и средств обнаружения сигналов дефектов, обладающих малым отношением сигнал-шум; значительными потоками информации в системах обработки сигналов; отсутствие приемников излучения фотоэлектрического типа с необходимыми кривыми спектральной чувствительности; высокой стоимостью известных систем контроля качества.

Анализ последних исследований

Особенность построения систем распознавания образов заключается в том, что они строятся как системы преобразования информации, что определяет их чувствительность к условиям предъявления входных образов. С другой стороны, инвариантность к возмущениям обеспечивают системы, которые построены с использованием обрат-

ных связей – системы по отклонению [5, 6]. При этом в задаче контроля следует учитывать и специфику объекта контроля – ткань, что требует применения методов оптимальной фильтрации. Такой подход к решению задачи обеспечивает значительное увеличение отношения сигнал–шум для дефектов основных нитей ткани и дефектов, связанных с изменением окраски тканей, загрязнениями.

Современные методы анализа состояния объектов контроля базируются на использовании оптимальных процедур построения оценок состояния, а именно:

- сглаживание, где, как правило, применяют нереккуррентные методы;
- фильтрация, где при синтезе систем управления наиболее часто используются рекуррентные методы;
- прогноз используются там, где нужна экстраполяция измерительной информации.

В общем случае оценивание является задачей восстановления состояния системы по информации о ее входах и выходах, причем задача будет разрешима только в случае, когда между данными вход–выход и состояниями можно установить однозначное соответствие.

Процедура поиска оптимальной, в смысле минимальной среднеквадратической ошибки, структуры фильтра для стационарной задачи в одномерном случае строится с использованием целевого функционала [2, 4]:

$$M\{\varepsilon^2\} = M\left\{\left[y^*(t) - \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau)Y(t-\tau)d\tau\right]^2\right\} \quad (1)$$

где: $y(t) = f(t) + \vartheta(t)$ – аддитивная смесь сигнала $f(t)$ и шума $\vartheta(t)$, $h(\tau)$ – импульсная весовая функция системы распознавания, $M\{\varepsilon^2\}$ – математическое ожидание ошибки, $y^*(t)$ – сигнал без шумов.

При этом задача $h(\tau) \rightarrow \min M\{\varepsilon^2\}$ имеет решение, определяемое интегральным уравнением Винера–Хопфа [4]:

$$R_{fy}(\tau)d\tau = \int_0^{\infty} h(\tau)R_y(\tau-\gamma)d\gamma$$

где: R_{fy} – взаимно корреляционная функция искомого сигнала и сигнала с шумом, R_y – автокорреляционная функция сигнала.

Реализация методов распознавания изображений, основанных на быстром преобразовании Фурье (БПФ), не удовлетворяют требованиям, предъявляемым к современным системам распознавания, которые работают в реальном масштабе времени.

Предлагается система компенсации входных информационных потоков, с помощью которой возможно скомпенсировать входное воздействие за счет генерации эталонных сигналов.

Система компенсации входных потоков информации

Система предназначена для распознавания сложных образов, фильтрации сигналов дефектов тканей в автоматической системе разбраковки тканей с разнооттеночностью и с выделением признаков классов дефектов. Задача ориентирована на создание системы автоматической разбраковки тканей со сложным рисунком. Если рассматривать потоки информации образа J_o и эталона J_z как встречные с мерой отклонения J_ε , где $J_\varepsilon = J_\varepsilon(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \Omega_i, t)$ – условная информация $J_{o\bar{z}}$, то возможна постановка задачи оптимального управления для эталона $\Omega_i: \mathbf{x}^*, \mathbf{u}^* \rightarrow \min J_\varepsilon$ решение которой позволяет решить задачу распознавания в классе образов $\Omega: \Omega_i \rightarrow \inf J_\varepsilon$.

На рис. 1 показана структурная схема системы, полученная при таком подходе. В качестве отклонения выходного сигнала объекта от сигнала модели выступает J_ε – условная информация связи между потоком J_o и потоком J_z .

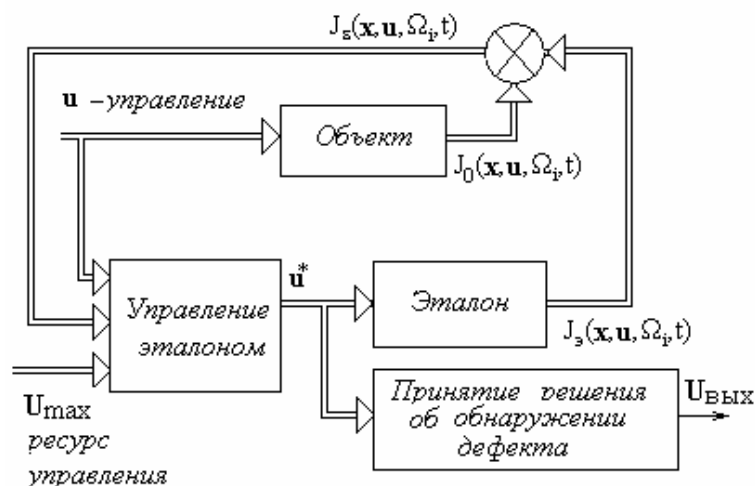


Рисунок 1 - Структурная схема системы оптимальной фильтрации

Используя идею метода допустимых преобразований [6], определим удобный для наблюдения параметр, однозначно связанный с J_ε и следуя рекомендациям [5], рассмотрим корреляционную меру бли-

зости между эталонным ω_i^* и предъявленным образом ω_i . При этом апертурное ограничение, связанное с превышением геометрических размеров поля контроля над "окном" датчика, определяет введение активного сканирующего движения датчика в поле контроля.

Сигналы эталона $f^*(\mathbf{x})$ и объекта $f(\mathbf{x})$ зависят от закона сканирующего движения в пространстве эталона как $\mathbf{x}_s = \mathbf{x}_s(t)$ и закона сканирования в пространстве объекта $\mathbf{x}_o = \mathbf{x}_o(t)$. Очевидно, при усреднении по реализациям, расстояние между эталоном и объектом следующим образом:

$$\rho^* = \max_{\Delta \mathbf{x}} \rho(\omega_i, \omega_i^*, \Delta \mathbf{x}) = \max_{\Delta \mathbf{x}} M \left\{ f^0(\mathbf{x}) f^0(\mathbf{x}) \right\} = \max_{\Delta \mathbf{x}} \iint_{S\omega} f^0(\mathbf{x}) f^0(\mathbf{x} + \Delta \mathbf{x}) dS,$$

где: $f^0(\mathbf{x})$, $f^0(\mathbf{x})$ – центрированные сигналы эталона и объекта, $S\omega$ – область чувствительности датчика, $\Delta \mathbf{x}$ – пространственный сдвиг между эталоном и изображением.

После усреднения по времени получим среднее значение отклонения объекта и эталона:

$$\overline{\rho^*} = \max_{\Delta \mathbf{x}} \frac{1}{T} \int_0^T \rho^* dt = \iint_{S\omega} \left(\max_{\Delta \mathbf{x}} \frac{1}{T} \int_0^T f(\mathbf{x}_o(t)) \cdot f^*(\mathbf{x}_s(t) + \Delta \mathbf{x}) dt \right) dS \quad (1)$$

Пространственный сдвиг $\Delta \mathbf{x}$ в области $S\omega$ для сигнала объекта определяет параллельное представление изображения объекта в окне $S\omega$. При этом, при условии совпадения объекта и эталона $f=f^*$ существует $\Delta \mathbf{x}^*$, при котором:

$$\Delta \mathbf{x}^* \rightarrow \sup_{\Delta \mathbf{x} \in S\omega} \left(\frac{1}{T} \int_0^T f(\mathbf{x}_o(t) + \Delta \mathbf{x}) \cdot f^*(\mathbf{x}_s(t)) dt \right) dS, \quad \Delta u = 0. \quad (2)$$

В данной задаче учитывается неопределенность совмещения в пределах $S\omega$. Поэтому условие (2) переходит в условие $\Delta \mathbf{x} \in S\omega$, $\Delta \mathbf{x} = \text{const}$. Это позволяет поставить двойственную задачу при ограничениях на управление эталоном $\Delta \mathbf{u}^*(t) \rightarrow \Delta \mathbf{x} = \text{const}$. Ограничение на управление $\Delta \mathbf{u}^*(t) \in \Omega$ определяется требованием связности окрестности образа, то есть, если деформации не превышают допустимых значений, то затраты на управление не должны превышать допустимого ресурса управления.

Таким образом, если задача оптимального управления (2) при ограничениях $\Delta \mathbf{x} = \text{const}$ и $\Delta \mathbf{u}^*(t) \in \Omega$ имеет решение, то образы, поро-

дающие сигналы f и f^* , будут близкими. При этом, чем меньше затраты на управление, тем ближе образы ω_i^* и ω_i . Это дает алгоритм решения задачи распознавания:

$$\omega_i^* \rightarrow \inf_{x \in S\omega} \Delta u^* . \quad (3)$$

Следовательно, выполнение условий затухания управления, постоянства координат корреляционного максимума $\Delta x = \text{const}$ и условие совпадения эталона и объекта $f = f^*$ позволяют достигнуть supp^* .

Использование нейронной сети в качестве чувствительного элемента системы

Наибольшую сложность при решении задачи распознавания вызывает реализация алгоритма определения положения корреляционного максимума. Для решения данной задачи необходимы параллельные вычисления большого числа корреляционных функций [3, 7]. Наибольшую степень параллельности для данного процесса обеспечивает нейронная сеть, имеющая достаточно простую структуру (рис. 2).

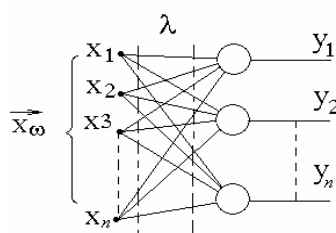


Рисунок 2 - Однослойная нейронная сеть

В общем случае для простой сети вектор входного сигнала преобразуется в вектор выхода умножением на матрицу весов, хранящую информацию о распознаваемых образах (4)

$$Ax_{\omega} = y, \quad a_i \leftrightarrow \varpi_i \quad (4)$$

Размерность вектора входа значительно меньше размерности памяти $\dim x = n$; $\dim A = n \times n$, где строки матрицы весов представляют собой набор эталонов распознаваемых образов. Таким образом, структурно работа сети представляет преобразование сигнала системой (рис. 3).

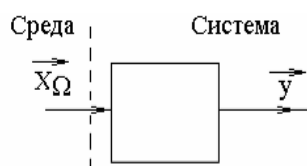


Рисунок 3 - Взаимодействие системы с внешней средой

Данный подход предполагает высокую степень параллельности вычислений, что реально возможно только при аналоговой обработке сигнала. Однако процесс вычисления традиционно реализуется как последовательный и достоинства алгоритма исчезают. С другой стороны, можно реализовать матрицу фотоприемников, обрабатывающую сигнал по такому же алгоритму, с той лишь разницей, что входной образ отражается матрицей весов (5)

$$A_{\omega} \mathbf{x} = \mathbf{y}. \quad (5)$$

В этом случае входной вектор должен генерироваться как строка ожидаемого изображения, а реакция будет определяться по компонентам выходного вектора:

$$\sum_{i=1}^n a_{ij} x_i = y_j \quad (6)$$

Структура сети в этом случае не изменяется, но входным сигналом являются значения весов (рис. 4).

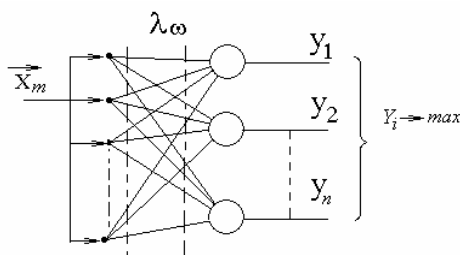


Рисунок 4 - Сеть при входе по матрице весов

В этом случае существенно то, что в замкнутой системе сеть выступает как элемент сравнения, где имеется сигнал из системы, а выходной вектор несет информацию о степени совпадения входного образа и эталона, а взаимодействие системы с внешней средой представляет компенсацию внешнего потока информации от среды и внутреннего потока информации от эталона (рис.5).

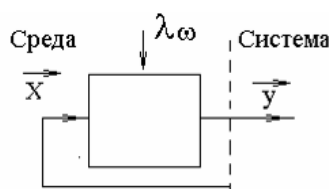


Рисунок 5 - Взаимодействие системы с компенсацией информации

Реализация матрицы входного образа должна допускать центрирование на скользящее среднее. Так же возможно центрирование и строки эталона.

$$\tilde{a}_{ij} = a_{ij} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij}; \quad \tilde{x}_i = x_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i.$$

В таком случае можно представить каждый из компонентов выходного вектора как оценку корреляции строки входного образа и эталона (7).

$$\sum_{i=1}^n \tilde{a}_{ij} \tilde{x}_i = y_j \rightarrow y_i \approx R_{\text{оsx}}. \quad (7)$$

Если во входном сигнале содержится строка, соответствующая ожидаемому образу входного сигнала, то получим максимальное значение оценки корреляции строки, что подтверждает гипотезу о соответствии входного образа эталону $\mathbf{x} \in \mathfrak{W} \rightarrow R_{\text{оsx}} \rightarrow \max$. В данном случае необходимо введение подсистемы управления, которая обеспечивает стабилизацию положения выбираемых строк, как в горизонтальном, так и вертикальном направлениях:

$$\begin{aligned} u_x, \quad \mathbf{x}(u_x), \quad u_x \rightarrow \max y_i, \quad i \neq \text{var}; \\ u_y, \quad \mathbf{x}(u_y), \quad u_y \rightarrow \max y_i, \end{aligned}$$

где u_x, u_y – управление $\mathbf{x}$ и $\mathbf{y}$.

Введение ограничений на ресурс управлений обеспечивает сохранение связности точек входного образа и эталона.

$$(u_{x \max}, u_{y \max}), \quad y_i = \max, \quad \begin{cases} |u_x| < u_{x \max} \\ |u_y| < u_{y \max} \end{cases} \rightarrow \mathbf{x} \in \mathfrak{W}.$$

При наличии подсистемы стабилизации корреляционного максимума появляется возможность достаточно просто генерировать строки образа, являющегося гипотезой. При этом, если ресурс управления достаточен, можно утверждать о непротиворечивости входного образа и выдвинутой гипотезы.

В данном случае, процесс распознавания возможно разбить на три этапа: а) выдвижение гипотезы с учетом контекста; б) генерация эталонного сигнала и в) стабилизация корреляционного максимума на фотоприемнике. Существенным моментом в данном случае является тот факт, что данные процессы распараллелены. Действительно, после выдвижения гипотезы, генерация эталона идет самостоятельно до полного завершения или до момента потери управления по превышению допустимого ресурса управления для данного образа.

Работа подсистемы стабилизации корреляционного максимума не требует анализа до момента завершения генерации эталона или до

момента потери управления. Работа подсистемы выдвижения гипотезы не задействована до конца процедуры проверки. Однако момент потери управления связан с генерацией эталона и для корректировки гипотезы предоставляются данные об области несоответствия эталона и объекта. В случае, когда матрица фотоприемников не покрывает весь объект или входной образ является только частью более сложного изображения $\varpi \subset \Omega$ можно ввести дополнительные сканирующие движения как в пространстве входного образа, так и в пространстве эталона $\varpi^* \Rightarrow \mathbf{x} = \mathbf{x}(\varphi_x(t), \varphi_y(t)) = \mathbf{x}(\varphi(t))$. При справедливости выдвинутой гипотезы управления сканирование входного пространства и сканированием эталона различаются на управление необходимое для устранения искажений входного образа $\mathbf{u}_\Delta(t) = \mathbf{f} - \varphi$. Следовательно, необходимо ограничение ресурса управления, для обеспечения проверки условия связности точек входного образа и эталона. Если на всей траектории выполняется условие $\mathbf{u}_{\Delta\max} > \mathbf{u}_\Delta$, то между эталоном и образом нет нарушений связности и условия подтверждения гипотезы принимают вид

$$y_i = \max, \quad |\mathbf{u}_\Delta| < \mathbf{u}_{\Delta\max}, \quad \begin{cases} |u_x| < u_{x\max} \\ |u_y| < u_{y\max} \end{cases} \rightarrow \varpi^* \in \Omega.$$

В случае сложного изображения возможна параллельная работа нескольких анализаторов, при этом генерация эталонов ведется одновременно по нескольким строкам. Однако условия связности и ограничение ресурсов остается единым для данного образа, что значительно сокращает ресурс памяти, требуемый для вычислений.

Таким образом, развитие методов топологического анализа, корреляционных методов, методов эластичного эталона и алгоритмов нейронных сетей с использованием известных методов теории управления предполагает возможность создания систем распознавания оптических образов, инвариантных относительно возмущений в пространстве изображений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Катус Г.П. Восприятие и анализ оптической информации автоматической системой [Текст]. – М.: Машиностроение, 1986.–416 с.
2. Системы технического зрения (принципиальные основы, аппаратное и математическое обеспечение) /А.Н. Писаревский, А.Ф.

- Чернявский, Г.К. Афанасьев и др.; Под общ. ред. А.Н. Писаревского, А.Ф. Чернявского [Текст]. –Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1988. –424 с.
3. Бодянский Е.В., Руденко О.Г. Искусственные нейронные сети: архитектуры, обучение, применения [Текст]. –Харьков: Телетех, 2004. –369.
4. Хорн Б.К.П. Зрение роботов : Пер. с англ. [Текст]. – М.: Мир, 1989. – 487 с.
5. Дж. Ту, Р. Гонсалес. Принципы распознавания образов / Пер. с англ. И.Б.Гуревича, под ред. Ю.И.Журавлева. [Текст]. –М.: Мир, 1978, – 407 с.
6. Рожков С.А. Использование метода компенсации информационных потоков при создании систем автоматического распознавания [Текст] / С. А. Рожков, А. П. Храпливый, Т. И. Терновая, Д. А. Бражник //Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. –1998. – №2. – С.93–100.
7. Рожков С.А. Использование нейросетевых структур для построения систем распознавания образов [Текст] / С. А. Рожков, Д. А. Бражник//Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 2004. – № 2(14). – С.247 – 253.

Я.В. Мянновская, Ю.С. Пройдак, А.В. Бабенко, В.Ю. Камкин
**ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛООБМЕН КАПЕЛЬ
МЕТАЛЛА ПРИ ДВИЖЕНИИ В СЛОЕ ШЛАКА**

Аннотация. Проведенный анализ результатов материальных и тепловых балансов выплавки марганцевых ферросплавов показывает, что с отвальными шлаками теряется 5-8% ферросплавов в виде запутавшихся корольков. Интенсивность массообмена между каплями металла и шлаком связана с режимом движения капли и кинетическими характеристиками фаз, находящихся во взаимодействии. Доказано, что независимо от начальной температуры капель металла, за время их осаждения в шлаке они приобретают температуру шлака.

Ключевые слова: металл, шлак, теплообмен, гидродинамика.

Введение

Эффективность ферросплавных процессов производства марганцевых сплавов оценивается одним из главных показателей - достижение максимального полезного извлечения марганца в сплав, что достигается уменьшением его потерь с отвальным шлаком и улетом в газовую фазу.

В физико-химических процессах ферросплавного производства особенно важна роль шлаков и флюсов. В расплавленных шлаках значительная часть электрической мощности, подводимой в ванну печи в режиме сопротивления, превращается в теплоту. Формирование шлака определенного состава обеспечивает условия для достижения высокой термодинамической активности MnO . Создаются условия для более полного осаждения металлической фазы, которая формируется из восстановленных марганца и кремния. Однако в реальных ферросплавных процессах содержание оксидных соединений марганца в отвальных шлаках в пересчете на марганец может достигать 14-16% [1]. Анализ результатов материальных и тепловых балансов выплавки марганцевых ферросплавов показывает, что с от-

вальными шлаками теряется также до 5-8% ферросплавов в виде запутавшихся корольков металла. Их количество в шлаке определяется плотностью металла и шлака, межфазным натяжением на границе их раздела, адгезией фаз, вязкостью шлака. Оптимальные величины этих физических свойств в значительной степени зависят от химического состава контактирующих фаз [2, 3].

Постановка проблемы

Жидкие металлургические шлаки представляют собой сложный объект для экспериментального и теоретического исследования. Высокие температуры, сложный химический состав, множество прямых и побочных реакций, как между компонентами шлака, так и при взаимодействии с окружающей средой, усложняют получение точных и достоверных данных о физико-химических свойствах и строении жидкого шлака [4 - 6]. Содержание в шлаке соединений различной природы и вероятностного характера химической связи между компонентами, склонности ряда оксидов к образованию неорганических полимерных структур [2] затрудняет описание физико-химические свойств шлаков. Это приводит к использованию для оценки реакционной способности шлака эмпирических корреляционных соотношений. Изучение вязкости являлось и является предметом пристального внимания исследователей [7 - 13]. Результатом таких исследований явилось разработка моделей вязкости.

Анализ исследований и публикаций

Авторы [11] отмечают, что вязкость шлаков чрезвычайно чувствительна к размеру ионов, а также воздействию электростатических взаимодействий, и тем самым структуре шлаков. Систему шлак в металлургическом процессе часто составляют многочисленные компоненты. Оксиды в стальных шлаках обычно представлены Al_2O_3 , CaO , Cr_2O_3 , MgO , MnO , SiO_2FeO . Большинство из этих оксидов также являются важными компонентами в шлаках цветных металлов [12]. Оксиды SiO_2 , P_2O_5 и B_2O_3 обладают сильными, высококовалентными связями металл-кислород создают сетевые структуры, что приводит к высокой вязкости расплава. С добавлением щелочных и щелочноземельных оксидов, Li_2O , Na_2O , K_2O , MgO , CaO , а также другие оксиды

двухвалентных как MnO и FeO , сеть ломается и, следовательно, вязкость постепенно уменьшается. Величина эффекта сильно зависит от компонентов и их пропорции, присутствующих в шлаке. Амфотерные оксиды, такие как Al_2O_3 , Fe_2O_3 , могут действовать либо как оксиды образующие сеть, либо как разрушающие ее [8, 11].

Сложные взаимодействия между катионами и анионами делает прогнозирование и моделирование вязкости шлака проблематичным. Неопределенность в измерениях для многих шлаков составляет около $\pm 20\%$. Разбег приводимых значений вязкости для $<10\%$ [14]. Математические модели могут быть использованы для прогнозирования величин вязкости в зависимости от основных переменных и для выбора условий процесса и оптимизации производительности [15]. Классификация различных моделей и их характерных особенностей была представлена в работах [15,16]. Неоднозначность объяснения закономерностей изменения вязкости связана с существованием сложной зависимости электронной и кристаллографической структуры. В основном это связано с изменениями в размере и характере связывания кремнекислородных полиэдров в зависимости от химического состава расплава. Это приобретает важное значения для оценки показателей восстановления элементов из расплавов [6].

Постановка задач исследования

Процессы выплавки марганцевых ферросплавов связаны с процессами переноса: диффузия (массоперенос), вязкое течение оксидных расплавов и металла, электропроводность (перенос заряда). В связи с этим актуальной является задача определения гидродинамики и массообмена при взаимодействии твердых и жидких фаз при получении марганцевых ферросплавов. Для оценки показателей процесса получения ферромарганца выполнен расчет прогрева капель металла при его движении в отвальном шлаке химического состава, % мас.: $Mn-12,8$; $SiO_2-33,9$; $CaO-37,1$; $MgO-3,5$; $Al_2O_3-2,76$.

Гидродинамика и теплообмен между каплями металла в слое шлака

Углеродотермическое восстановление оксидов марганца из руды идет обычно в присутствии железа, в результате чего возникает жидкая металлическая фаза $Mn-Fe-C$, что существенно влияет на термодинамику и кинетику процесса. Однако, процесс восстановления манганозита может сопровождаться образованием легкоплавкой

эвтектики MnO-SiO_2 при контакте MnO с SiO_2 руды или кремнеземом шихты [17, 18]. В этом случае наряду с локальными объемами первичного металлического сплава также возникают объемы жидкого шлака, которые при своем стекании в ванну печи могут взаимодействовать с твердыми шихтовыми материалами. Наиболее вероятными местами возникновения локальных объемов металлической фазы являются места непосредственного контакта MnO с углеродом кокса, а также поверхность контакта шлаковой фазы с углеродистым восстановителем.

Возникновение объемов шлаковой фазы возможно за счет образования легкоплавкой эвтектики непосредственно из марганцевой руда как на поверхности самой руды, содержащей кремнезем, так и при образовании легкоплавкой эвтектики в местах контакта марганцевой руда и SiO_2 кремнезема. При своем движении вниз локальные объемы металла, а также и шлака, могут сливаться в более крупные объемы, которые растекаются в виде пленок по кускам твердых шихтовых материалов и при своем движении вниз взаимодействуют с ними. При этом возможно взаимодействие пленок металла и шлака как с кусками кокса, так и с кусками других шихтовых материалов.

Стекающие пленки шлака и металла в конце своего движения образуют капли металла и шлака, которые при своем отрыве от твердая кусковых шихтовых материалов попадают в слой шлака. Капли шлака ассимилируются жидким шлаком, увеличивая его массу, а капли металла при своем движении через слой шлака взаимодействуют с ним. Отрыв капель металла может происходить как на границе твердое-газ, так и на границе твердое-шлак. В ванне печи в результате этих процессов формируются объемы металла и шлака, на поверхности раздела которых также может происходить массообмен между ними.

Таким образом, в зоне плавления и восстановления руднофлюсовой шихты при стационарном состоянии процесса можно определить шесть открытых систем, взаимодействующих между собой. Ос-

новные способы массообмена реализуются при следующих взаимодействиях: взаимодействие капель металла, оседающих в слое шлака; взаимодействие капель металла с омывающим их газовым потоком; взаимодействие на плоской границе раздела шлак- металл в ванне печи: прямое восстановление пленок оксидного расплава, стекающих по кускам углеродистого восстановителя; науглероживание пленок металла при их стекании по кускам углеродистого восстановителя; косвенное восстановление пленок оксидного расплава в потоке газа.

Интенсивность массообмена между каплей металла и шлаком, в котором она осаждается, связана с режимом движения капли и кинетическими характеристиками взаимодействующих сред. Режим движения капли определяется величиной числа $Re = w \cdot d_k / \nu$, которое зависит от характерного размера капли (d_k), скорости ее движения (w) и вязкости шлака (ν), в котором она осаждается. В связи с этим возникает необходимость определения отрывного диаметра капель металла. Расчет отрывного диаметра капель производился по выражению

$$d_k = 1,75 \cdot \sqrt[3]{C(Q_k) \cdot \frac{\sigma}{g(\rho_m - \rho_{ш})}}, \quad (1)$$

где $C(Q_k)$ – функция, зависящая от величины краевого угла смачивания; σ – поверхностное натяжение на границе металл-шлак; ρ_m и $\rho_{ш}$ плотности металла и шлака. Неопределенность формы кусков твердых шихтовых материалов не позволяет однозначно рассчитать отрывной диаметр капель металла. В связи с этим определяли возможные минимальный и максимальный отрывной диаметр капель, образование которых может происходить на границе газ-твердое и на границе металл-шлак соответственно. В расчете приняты по данным [19] значения функции $C(Q_k)$ в пределах 0,5-0,9. Приняты следующие пределы значений поверхностного натяжения (температура 1500°C): для металла - 0,7-0,8 Н/м, для шлака 0,3 - 0,35 Н/м, кинематическая вязкость $2 \cdot 10^{-4}$ - $5,7 \cdot 10^{-4}$ м²/с. Плотность металла - 6000 кг/м³, плотность шлака 2700-2900 кг/м³. Для дальнейших расчетов отрывные диамет-

ры капель, рассчитанные по выражению (1), составляют: для металла 4,5-9 мм, для шлака 4,5-7 мм

Согласно [20], режим перемещения капель металла через шлак может быть определен по предельным значениям числа Архимеда. Для принятых значений отрывного диаметра капель и вязкости определено минимальное значение числа $Ar = 2,94$, что указывает на ламинарный режим движения капель, и максимальное значение числа $Ar=190,7$, что соответствует переходному режиму движения. Скорость осаждения капель металла при ламинарном режиме движения составляла 0,06 м/с, для переходного – 0,08 м/с. Число Re для найденных скоростей движения составляет 0,45 (для ламинарного движения $Re<2$) и 3,5 (для переходного режима $2<Re<500$). Время осаждения капли металла через слой шлака толщиной около 200 мм составляет 2,5 - 4 с.

Частота образования капель металла рассчитывали из часовой производительности ферросплавной печи секундный съём металла на 1 м² площади пода составляет 0,023-0,025 кг/(м²·с), или $3,8 \cdot 10^{-6}$ - $4 \cdot 10^{-6}$ м³/(м²·с). При кратности шлака 0,9-1,1 объем шлака составляет $8 \cdot 10^{-6}$ - $8,5 \cdot 10^{-6}$ м³/(м²·с). Для капель металла радиусом 0,002-0,0045 м объемы капель $3,3 \cdot 10^{-8}$ - $4 \cdot 10^{-7}$ м³. При этом частота образования капель металла будет находиться в пределах 10-120 ед./(м²·с). Для капель шлака радиусом 0,002-0,0035 м объемы капель составляют $3,4 \cdot 10^{-8}$ - $1,8 \cdot 10^{-7}$ м³. Частота образования капель шлака 50-250 ед/м²·с).

При осаждении капель металла в слое шлака протекают процессы тепло- и массообмена между каплями и шлаком. В связи с тем, что размер капель невелик, конвективными потоками в их объеме можно пренебречь. При этом процессы нестационарного тепло- и массообмена могут быть описаны уравнениями молекулярной теплопроводности и молекулярной диффузии для шара. Поскольку капля металла перемещается в шлаке, приняты граничные условия 3 рода для процессов теплообмена. Физические свойства среда, в которой происходит передача теплоты или

вещества, характеризуются значением критерия Прандтля. Для процесса внешней теплоотдачи использовали критерий Нуссельта. Характер движения газа или жидкости определяется значением критерия Рейнольдса. Для дальнейших расчетов принято наиболее часто используемое в литературе уравнение (2), приведенное в [21]

$$Nu = 2 + 0,60 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \quad (2)$$

Для оценки результатов теплообменных процессов определяли безразмерные средние температуры, которые характеризовали степень завершенности процесса. Для капель металла диаметром 4,5-9мм, которые реально могут образоваться в процессе плавки и осаждающихся в шлаке, значение $Nu = 9-10$, значение числа $Bi = 8-12$, что соответствует смешанному лимитированию внешним и внутренним теплообменом. При среднем времени пребывания капли металла в шлаке 2-4 с, значение числа Fo для предельных диаметров капли составляет 4-20.

Вывод

Расчет завершенности процесса свидетельствует о полном завершении процесса теплообмена между каплями металла и шлаком. Таким образом, независимо от начальной температуры капель металла за время осаждения их в шлаке они приобретают температуру шлака. При этом капли металла осуществляют перемешивание шлака в ламинарном режиме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Metallurgia марганца Украины / Б.Ф.Величко, В.А.Гаврилов, М.И.Гасик,, С.Г.Грищенко и др. Под общей и научной редакцией М.И.Гасика. – К.:Техника, 1996. – 472 с.
2. Есин О.А. О полимерной модели расплавленных силикатов и других оксидов //Сталь. 1979. - №7. С. 497-500.
3. Приходько Э.В. Моделирование структуры при исследовании связи между составом и свойствами оксидных расплавов// Изв. АН. Неорганические материалы. – 1980.-№5. – С.900-906.
4. Зайцев А.И., Могутнов Б.М., Шахпазов Е.Х. Физическая химия металлургических шлаков. М.: Интерконтакт Наука. 2008. 352 с.
5. Зайцев А.И., Могутнов Б.М. Жидкие шлаки как ассоциированные растворы. Фундаментальные исследования физикохимии металлических расплавов. - М.: ИКЦ «Академкнига», 2002. - С. 228-246.
6. Гасик М.И., Зубанов В.Т., Поляков О.И. О применении фундаментальных соотношений к расчету свойств металлических и оксидных ферросплавных распла-

- вов//Интенсификация электроферросплавных процессов и повышение качества продукции. – Днепропетровск: Промінь, 1985. - С. 17-18.
7. Исследование вязкости и электропроводности шлаков силикомарганца с повышенным содержанием глинозема. Чубинидзе Т.А., Майсурадзе Г.Д., Бейдер Г.Д. – В кн.: Физикохимия и металлургия марганца. М.: Наука, 1983. С. 20-23.
 8. Исследование вязкости передельного шлака бесфлюсовой плавки углеродистого ферромарганца. Ракитина Н.И., Туркина Н.А., Морозов А.А., Дашевский В.Я., Карязина И.Н., Кашин В.И. В кн.: Физикохимия и металлургия марганца. М.: Наука, 1983. С. 16-20.
 9. Некоторые особенности шлакового режима электроплавки углеродистого ферромарганца Н.П.Лякишев, В.Я.Щедровицкий. В кн. Физико-химические исследования малоотходных процессов в электротермии. М.: Наука, 1985. С.31-36.
 10. М.И.Гасик, М.М.Гасик, А.Н.Овчарук. Термодинамика процессов восстановления при выплавке передельного силикомарганца. Современные проблемы металлургии. Научные труды. Выпуск 1. –С. 74-89.
 11. Э.В.Приходько, Д.Н.Тогобицкая. Роль информационных технологий в повышении качества металлопродукции. Современные проблемы металлургии. Том 3. // По материалам научно-практической конференции «Проблемы и перспективы получения конкурентоспособной продукции в горно-металлургическом комплексе Украины. – Днепропетровск: Системные технологии, 2001. – С.450-462.
 12. Тогобицкая Д.Н. Информационно-математическое моделирование шлаковых и железоуглеродистых расплавов// Металлургическая и горнорудная промышленность. 1998. - №4. С. 7-10.
 13. Математическое моделирование серопоглозительной способности шлаков при внепечной обработке стали. Надточий А.А., Сокур Ю.И., Камкина Л.В., Безшкуренко А.Г.//Системные технологии. – 5(94). - 2014. С.170-177.
 14. Seetharaman, S., Mukai, K. and DuSichen. Viscosities of slags - an overview . VII-International Conference on Molten Slags Fluxes and Salts, The South African Institute of Mining and Metallurgy, 2004.
 15. Kondratiev, A., Jak, E. and Hayes, P.C. Predicting Slag Viscosities in Metallurgical Systems. Journal of Metals, November, 2002, pp. 41-45.
 16. Mills, K. The estimation of slag properties . Short course presented as part of Southern African Pyrometallurgy 2011, 7th of March, 2011.
 17. Опыт разработки математических моделей металлургических процессов с учетом неравновесности основных реакций / Л.В. Камкина, Я.В. Стомба, Ю.С. Пройдак // Системные технологии. - №2 (73). – 2011. - С. 22-31.
 18. Камкина Л.В., Ростовцев С.Т., Анкудинов Р.В. Исследование кинетики восстановления элементов в шихтах $MnO-SiO_2-C$ //Известия АН СССР. - 1977. - №1.- С.22-27.
 19. Тепловые процессы при электрошлаковом переплаве//Под ред. Б.И.Медовара//К.: Наукова думка. – 1978. 304 с.
 20. Касаткин А.Г. Основные процессы и алгоритмы химической технологии//М.: Наука. – 1973. 752 с.
 21. Берд Р., Стьюарт В., Лайтфут Е. Явления переноса//М.: Химия. – 1974. 696 с.

И.В. Жуковицкий, О.И. Егоров

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПОЕЗДОВ В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Аннотация. Построение информационно-управляющих систем, как в пределах станции, так и на прилегающих к ней путях, тесно связаны с системами идентификации. В работе рассматривается метод идентификации, определяющий статические характеристики вагонов поезда и поезда в целом с использованием железнодорожной автоматики и информационных систем верхнего уровня. Для апробации метода идентификации используется имитационное моделирование. На основании анализа результатов имитационного моделирования разработанный метод идентификации поездов с использованием ТГНЛ показал высокую надежность и правильность работы.

Ключевые слова: метод идентификации, идентификация подвижного состава, контрольный участок, межосевые расстояния, точечный путевой датчик.

Введение. Идентификация подвижных единиц может заключать в себе определение различных характеристик, таких как количество осей, количество вагонов, их осноть, тип, номенклатурные номера вагонов, динамические характеристики движения и т.д.

Повышение точности определения различных параметров, характеризующих подвижной состав, приведет к непосредственному улучшению качества управления вагонопотоками. А это, в свою очередь, отразится на уменьшении себестоимости грузоперевозок, увеличении рациональности использования вагонов, освобождении людских ресурсов, повышении безопасности движения на железных дорогах и т.д. Хотя на сегодняшний день существует множество различных предложений решения той либо иной задачи идентификации – нельзя сказать, что этот вопрос является закрытым. Многие организации, как за рубежом, так и в нашей стране постоянно ведут работу над созданием новых и модернизацией существующих методов идентификации.

В связи с этим многие задачи автоматизации технологических процессов на железнодорожном транспорте тесно связаны с идентификацией подвижных единиц [1-3].

Анализ публикаций и цель работы. Существуют системы идентификации подвижных единиц, использующие средства железнодорожной автоматики (точечные путевые датчики, рельсовые цепи и т.д.) установленные на железнодорожном полотне и образующие контрольный участок. Подобные системы позволяют определить количество осей, осность и количество подвижных единиц, расстояния между осями подвижных единиц и, как результат, тип подвижных единиц [4, 5]. Результаты идентификации таких систем сильно зависят от многих факторов, таких как скорость и ускорение движения, точность фиксации колеса датчиком и т.д., что в свою очередь влияет на их достоверность. Поэтому такие системы имеют ограниченный круг применения.

В последние десятилетия, как в нашей стране, так и в странах ближнего зарубежья, много внимания уделялось развитию систем автоматического считывания информации с подвижных единиц с использованием специальных датчиков (преимущественно – пассивных радиодатчиков) [6, 7]. Внедрение таких систем позволило бы решить множество задач автоматизации процессов контроля и управления на железнодорожном транспорте. Однако данные системы оказались слишком дорогостоящими и трудоемкими, с точки зрения их внедрения и сопровождения. На сегодняшний день они находятся в «замороженном» состоянии.

В последнее время наметилась тенденция использования систем спутниковой навигации для слежения за перемещением подвижных единиц по железнодорожным дорогам в нашей стране и за рубежом [8, 9]. Однако, идентификация всех подвижных единиц, входящих в состав поезда, требует установки навигационных датчиков на каждую подвижную единицу. Это оказывается дорого и неэффективно.

Целью данной работы является разработка метода идентификации поезда с минимальными материальными затратами, простотой внедрения и обслуживания и обеспечивающего высокий уровень достоверности идентификации. Задача идентификации поезда актуальна во многих информационных системах, отображающих состояния тех-

нологических процессов на железной дороге. В данном случае решается задача идентификации конкретного поезда при подходе к сортировочной станции.

Предлагаемые решения. Выполнив анализ выше описанных методов идентификации, было принято решение об использовании интегрального подхода к решению поставленной задачи. При идентификации поезда используются контрольный участок, позволяющий определить количество и возможный тип подвижных единиц поезда и информация автоматизированных систем верхнего уровня. Информация о каждом поезде представлена в виде телеграммы натурального листа поезда (ТГНЛ), с указанием всех вагонов входящих в его состав и их номеров. На основании набора ТГНЛ поездов и идентифицированных параметров поезда устанавливается соответствие данного поезда и ТГНЛ. Решение данной задачи выполнено на основании исследованной погрешности идентификации подвижных единиц и разработанных методов идентификации [10, 11].

Решение данной задачи возможно несколькими способами, а именно:

- по подсчитанному количеству осей в поезде;
- по определенному количеству вагонов и их осности;
- по выявленным «опорным» вагонам;
- по рассчитанным межосевым расстояниям как средство определения типа вагонов.

При использовании первого и второго из этих способов необходим контрольный участок с одним точечным путевым датчиком [12], для третьего и четвертого способов – три.

Идентификация поезда с использованием первых трех способов является наиболее простой и более надежной, с точки зрения вероятности правильной идентификации параметров поезда, проходящего контрольный участок. Но при этом результаты идентификации поезда менее информативны, так как значения идентифицируемых параметров часто подходят к разным поездам. Под понятием «опорный» вагон в данном случае необходимо понимать вагон с определенным местом расположения в составе поезда и однозначно идентифицированным. Такой вагон должен быть только в идентифицируемом поезде, например транспортер. Идентификация по последнему способу имеет вероятностный характер, который зависит от точности расчета

межосевых расстояний и правильности определения типа вагонов. Данный способ является наиболее информативным, позволяющим определить до 4 цифр номера каждого вагона в поезде. Поэтому именно алгоритм этого способа идентификации и был выбран в качестве главного.

Определение типа подвижной единицы производится по определенному расстоянию между внутренними осями подвижных единиц. Но в ряде случаев разница между этими расстояниями для разного типа подвижных единиц очень мала, либо вообще равна нулю [13, 14]. Поэтому при идентификации подвижных единиц возможен вариант с разделением всех подвижных единиц на группы. При делении на группы учитываются точность определения межосевых расстояний. Так, при точности определения межосевых расстояний равной 50 мм получаются одна группа из трех подвижных единиц, три – из двух, а все остальные группы содержат по одной подвижной единице. То есть, в этом случае происходит идентификация подвижной единицы с точностью до определения группы. Количество групп и их состав может меняться в зависимости от точности идентификации.

Контрольный участок предназначен для определения межосевых расстояний подвижных единиц. Структурная схема участка, предлагаемого метода определения типа подвижных единиц, по средству определения межосевых расстояний, схематически представлена на рис. 1.



Рисунок 1 – Структурная схема участка определения межосевых расстояний

Три контрольные точки – КТ1, КТ2 и КТ3 (точечные путевые датчики) расположены на расстоянии L друг от друга. Таймеры Т12 и Т23 определяют временные интервалы t_{12} и t_{23} между наездом колеса подвижной единицы на контрольные точки КТ1 – КТ2 и КТ2 – КТ3

соответственно. Полученные значения t_{12} и t_{23} необходимы для определения начальной скорости наезда колесной пары на каждую из контрольных точек V_1 , V_2 и V_3 измерительного участка и ускорения движения. Таймеры Т1, Т2 и Т3 определяют временные интервалы t_1 , t_2 и t_3 между наездом смежными колесами колесных пар на контрольные точки КТ1, КТ2 и КТ3. Эти данные необходимы для определения межосного расстояния между смежными колесными парами. При этом трехкратное определение межосевого расстояния позволяет увеличить точность его измерения. Вычисленное межосевое расстояние будет равно среднему арифметическому трех измерений.

Для определения типа подвижной единицы используем вероятностный подход. В работе [11] приведена функциональная зависимость ошибки определения межосевого расстояния от структуры участка, параметров технических средств и объекта идентификации. Используя данную формулу и применив правило трех сигм, определяем интервал возможных значений измеренной величины. Далее определяем, какие из подвижных единиц попадают в определенный интервал. Для этого необходимо использовать базу данных о подвижных единицах, содержащую их межосевые расстояния. Ошибка определения межосевых расстояний подчиняется нормальному закону распределения с плотностью вероятности

$$f(S) = \frac{1}{\sigma_{\Delta S} \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{S^2}{2 \cdot \sigma_{\Delta S}^2}}, \quad (1)$$

где S – межосевое расстояние подвижной единицы; $\sigma_{\Delta S}$ – среднее квадратическое отклонение ошибки определения межосевого расстояния.

В качестве идентифицируемой подвижной единицы может быть любая подвижная единица, для которой верно неравенство

$$S - 3 \cdot \sigma_{\Delta S} < S' < S + 3 \cdot \sigma_{\Delta S}, \quad (2)$$

где S – расстояние между внутренними осями подвижной единицы по каталогу; S' – замеренное расстояние между внутренними осями подвижной единицы.

Результатом идентификации, с использованием данного метода, является точное определение типа подвижной единицы или ограниченной группы, к которой она относится.

Общий алгоритм идентификации поезда в целом состоит из его повагонной идентификации. На основании определенных характеристик вагона формируется набор его возможных инвентарных номеров. Также формируются возможные номера вагонов для каждого из анализируемых поездов. Далее выполняется сравнение данных об инвентарных номерах вагонов из ТГНЛ с вагонами каждого из поездов. Так как каждому типу подвижной единицы соответствует свой особый признак в инвентарном номере, то на основании проведенного сравнения возможно определить искомый поезд. В случае, когда в группе поездов находятся два и более одинаковых поезда (что очень маловероятно), по характеристикам вагонов результатом идентификации будет несколько решений.

Описанный метод идентификации поезда приемлем только в случае, когда состав вагонов поезда полностью соответствует данным ТГНЛ. Данные ТГНЛ формируются на поезд при его формировании и отправке с сортировочной станции. При движении поезда к следующей сортировочной станции, возможно его изменение по составу вагонов, вызванное выполнением различных технологических операций. Это могут быть операции по добавлению или отцеплению вагона или группы вагонов на промежуточных станциях. При этом возможно, что необходимые корректировки в ТГНЛ будут внесены с опозданием. В результате чего состав вагонов поезда не будет соответствовать первоначальным данным ТГНЛ. Выполнение подобных технологических операций требует корректировки алгоритма идентификации.

Было рассмотрено выполнение следующих операций, изменяющих состав поезда:

- добавление в конец поезда вагона или группы вагонов;
- отцепление с конца поезда вагона или группы вагонов;
- отцепление вагона или группы вагонов внутри поезда;
- изменение последовательности вагонов в поезде (смена «головы» и «хвоста» местами).

Первые два вида операций вполне могли быть запланированы ранее, третий вид операций связан с возможными техническими неполадками вагонов. В результате подобных изменений состава поезда процесс идентификации необходимо рассматривать как выявление максимально правдоподобного решения из конечного числа возмож-

ных. Для этого в алгоритм идентификации поезда вводится коэффициент качества идентификации, согласно которому определяется количество возможных несоответствий состава поезда и данных ТГНЛ.

Окончательный алгоритм идентификации состоит из следующих операций:

- сравнение данных ТГНЛ поездов и данных повагонной идентификации поезда;
- подсчет количества совпадений («попаданий») данных ТГНЛ поездов и данных повагонной идентификации поезда;
- процесс подсчета совпадений выполняется до окончания списка вагонов ТГНЛ или до момента, когда количество несовпадений («промахов») превысит значение коэффициента качества идентификации;

В результате выполнения данного алгоритма идентификации будет выбран поезд, имеющий максимальное количество «попаданий».

Расчет показателя качества идентификации для каждого из поездов выполняется по следующей формуле:

$$Q_j = \frac{M_j}{\sum_{j=1}^N M_j}, \quad (3)$$

где Q_j – показатель совпадений для j -го поезда; M_j – количество «попаданий» для j -го поезда; N – количество идентифицируемых поездов.

В данном алгоритме особое внимание стоит уделить выбору значения показателя качества идентификации, т.к. именно этот показатель влияет на конечный результат идентификации.

Для правильной идентификации поезда данный алгоритм необходимо выполнять дважды для каждой ТГНЛ. В первый раз вагоны анализируются в порядке, который указан в ТГНЛ, во второй раз в обратном порядке. Это необходимо для случая изменения «хвоста» и «головы» поезда.

Моделирование предложенного алгоритма. Для апробации и проверки правильности работы метода идентификации поезда с использованием ТГНЛ было выбрано имитационное моделирование.

Разработанная имитационная модель содержит информацию о более чем 50-ти поездах. Данные о поездах были получены из информационных систем станции Запорожье-Левое за двое суток.

На основании анализа результатов имитационного моделирования разработанный метод идентификации поездов с использованием ТГНЛ показал высокую надежность и правильность работы. Данный метод не критичен к следующим факторам:

- высокая погрешность работы датчика (проводились эксперименты с погрешностью датчика до 80 мм);
- сбой одного из трех датчиков;
- количество идентифицируемых поездов в группе;
- скорость и ускорение движения поезда;
- изменение состава поезда в процессе его следования.

При применении метода следует уделить особое внимание выбору коэффициента качества идентификации.

В случае нахождения в группе двух и более одинаковых по характеристикам межосевых расстояний поездов, соответствующих идентифицируемому поезду, результат идентификации будет содержать несколько решений. При этом идентифицируемый поезд однозначно будет одним из результатов.

Выводы. Результатом данной работы является разработанный метод идентификации поезда на трехточечном контрольном участке с использованием дополнительной информации от информационной системы на основе вероятностного подхода. Данный метод идентификации позволяет автоматизировать ввод информации о поездах, прибывающих на станцию, дает возможность оперативного получения информации.

Моделирование процесса прибытия поездов на станцию на основании реальных статистических данных доказал работоспособность метода даже при сбоях в станционном оборудовании и неточностях в дополнительной информации (ТГНЛ), которая поступает от информационной системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wagon-flow allocation optimization of stage plan at marshaling station in consideration of different size limitations of departure trains / H.-D. Li, S.-W. He, Y. Jing, S. Wang // J. of the China Railway Society. – 2012. – Vol. 34, № 7. – P. 10–17.

2. Вернигора Р.В., Єльнікова Л.О. Аналіз інтенсивності вантажних поїздопотоків на сортувальних станціях України // Зб. наук. праць ДНУЗТ: Серія “Транспортні системи і технології перевезень”, Вип. 6. – Д.: ДНУЗТ, 2013. – с. 32-35
3. Лаврухін, О. В. Побудова моделі оптимізації пропуску поїздів на підходах до сортувальної станції [Текст] / О. В. Лаврухін, П. В. Долгополов, Ю. В. Доценко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків: 2013. – Вип. 64. – С. 15–17.
4. А. с. № 1652157 СССР, МКИ5 В 61 L 1/16. Устройство для распознавания типа подвижной единицы подвижного состава / Попов О. С., Унтилов В. П., Воронько В. А., Котелевец В. Н., Яценко В. И. (СССР). – 4671968/11; заявл. 03.04.89; опубл. 30.05.91, Бюл. № 20, 6 с.
5. А. с. № 1787845, МКИ5 В 61 L 1/16. Устройство для опознания типа вагонов / Захаров В. А., Черненко В. М. – 4721169/11; заявл. 31.05.89; опубл. 15.01.93, Бюл. № 2, 3 с.
6. Система автоматической идентификации транспортных средств “Пальма” / В. В. Белов, В. А. Буянов, М. Д. Рабинович и др. // Железнодорожный трансп. – 2002. – № 8. – С. 54–59.
7. Филатов А. Система автоматической идентификации железнодорожного подвижного состава / А. Филатов // Железнодорожный трансп. – 1999. – № 9. – С. 68–70.
8. European Space Agency [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.esa.int.
9. Информационно-аналитический центр контроля ГЛОНАСС и GPS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.glonass-center.ru.
10. Егоров, О. И. Исследование погрешности определения типа подвижных единиц на железнодорожном транспорте / О.И. Егоров // Зб. наук. пр. Київського ун-ту економіки і технологій трансп.–2003.–Вип.4.–С. 36–41.
11. Жуковицкий, И. В. Автоматизированная идентификация подвижных единиц и поезда в целом / И. В. Жуковицкий, О. И. Егоров // Информац.-керуючі системи на залізн. трансп. – 2012. – № 6. – С. 77–82.
12. Егоров О. И. Метод определения осности и количества подвижных единиц в отцепе / О. И. Егоров // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 1999. – № 4. – С. 6–8
13. Раков, В. А. Локомотивы и моторвагонный подвижной состав железных дорог Советского Союза (1976-1985) / В. А. Раков. – Москва : Транспорт, 1990. – 238 с.
14. Грузовые вагоны колеи 1520 мм железных дорог СССР. Альбом. – Москва : Транспорт, 1989. – 173 с.

УДК 519.6

И.И. Коваленко, Е.А. Антипова, С.А. Устенко

ВЫБОР РЕШЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕОРИИ ДЕЗЕРА-СМАРАНДАКЕ В УСЛОВИЯХ НАЛИЧИЯ СЛОЖНЫХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ

Аннотация. В работе рассмотрена возможность применения теории правдоподобных и парадоксальных рассуждений для выбора решений в условиях наличия сложных неопределенностей, которые порождаются противоречивыми экспертными свидетельствами.

Ключевые слова: сложные неопределенности, экспертные свидетельства, массы уверенности, гибридная модель, свободная модель.

Постановка проблемы

Различные решения принимаются, как правило, в условиях неполного информационного описания предметных областей (объектов, явлений, проектов, систем), что вызывает появление различных неопределенностей (НЕ-факторов).

В настоящее время к числу наиболее изученных НЕ-факторов относятся неполнота, неопределенность, недоопределенность, неточность, нечеткость, неупорядоченность и др. [3]. Учет перечисленных НЕ-факторов при принятии решений, выполняется посредством их моделирования с применением теории вероятностей, теории нечетких множеств и нечетких отношений, теории грубых множеств и др.

Вместе с тем, на практике могут возникать ситуации, в которых одновременно могут присутствовать различные формы незнания, например, комбинация неопределенности и неточности, которые получили название сложных (специфических) неопределенностей [8]. Например, при проведении экспертизы необоснованно были выбраны методы выявления (генерации) экспертной информации (фактор порождает ситуацию неточности); при проведении анализа экспертной информации не была учтена компетентность экспертов (фактор порождает неопределенность в достоверности полученных экспертных оценок). Кроме того, необходимо учитывать тот факт, что в процессе

проведения экспертизы экспертные оценки ω могут характеризоваться различными формами взаимодействия.

Формы таких взаимодействий могут иметь различный характер — они могут быть согласованными ($\omega_1 = \omega_2 = \dots = \omega_n$), совместимыми ($\omega_1 \subseteq \omega_2 \subseteq \dots \subseteq \omega_n$), могут произвольным образом объединяться ($\omega_1 \cup \omega_2 \cup \dots \cup \omega_n$) и пересекаться ($\omega_1 \cap \omega_2 \cap \dots \cap \omega_n$). Для моделирования указанных форм взаимодействий может быть использована теория свидетельств Демпстера-Шейфера (ТДС), рассмотренная в работе [8]. Основу данной теории составляет следующая концепция. Имеется множество элементов $\Omega = \{\omega_i | i = \overline{1, n}\}$, называемое основой анализа. Предполагается, что Ω представляет собой множество исчерпывающих (всех возможных в данной ситуации) элементов и взаимно исключаемых (уникально определенных и отличных от других) элементов ω_i . При этом априори известно, что только единственный элемент $\omega_0 \in \Omega$ является истинным в каждой конкретной ситуации.

На основе анализа Ω могут быть сформированы произвольные подмножества элементов $A_i \in \Omega$ при предположениях (свидетельствах), что ω_0 может принадлежать каждому из этих подмножеств.

Однако на практике достичь взаимоисключаемости удастся не всегда — некоторые элементы могут в значительной степени перекрываться друг другом, поэтому выделить полностью различающиеся элементы не представляется возможным. Теория, которая позволяет обращаться с такими сложными неопределенными ситуациями, получила название теории Дезера-Смарандаке. В литературе она еще называется теорией правдоподобных и парадоксальных рассуждений [6,7,8].

Анализ публикаций и последних достижений

Первые НЕ-факторы, получившие название «нечеткость» или «неточность», были определены и изучались в рамках проблематики нечеткой математики, основателем которой является Лотфи Заде [2]. Однако целенаправленные системные исследования НЕ-факторов начались с работ А.С. Нариньяни, в которых введено понятие и дана содержательная их трактовка [1,4]. В работе [3] сделана попытка систематизации наиболее изученных НЕ-факторов и методов их моделирования. К числу работ последних лет, которые посвящены методам

анализа сложных (специфических) неопределенностей, относятся [5,6,7,8 и др.]. В этих работах рассматриваются основы теории свидетельств Демпстера-Шейфера и теории правдоподобных и парадоксальных рассуждений Дезера-Смарандаке, а также вопросы их применения. Следует указать на то, что данные теории являются малоизвестными широкому кругу пользователей. Особенно это касается второй из них, которая была создана в начале XXI века двумя учеными: Смарандаке и Дезера. Первая публикация об основах теории появилась в 2001 году, а в 2004 году был опубликован первый сборник работ, в котором в систематизированной форме были изложены основы этой новой теории.

Изложение основного материала

В соответствии с работами [6,7,8] рассмотрим основные положения теории Дезера-Смарандаке (ТДС).

ТДС рассматривает множество Ω , называемое основой задачи, только как множество исчерпывающих элементов $\Omega = \{\omega_i | i = \overline{1, n}\}$. Элементы основы задачи перекрывают друг друга, соответственно условие исключения уже не поддерживается, и имеет место единственное предположение исчерпываемости. Графическое представление основы задачи в теории правдоподобных и парадоксальных рассуждений (ТДС) дано на рис.1.

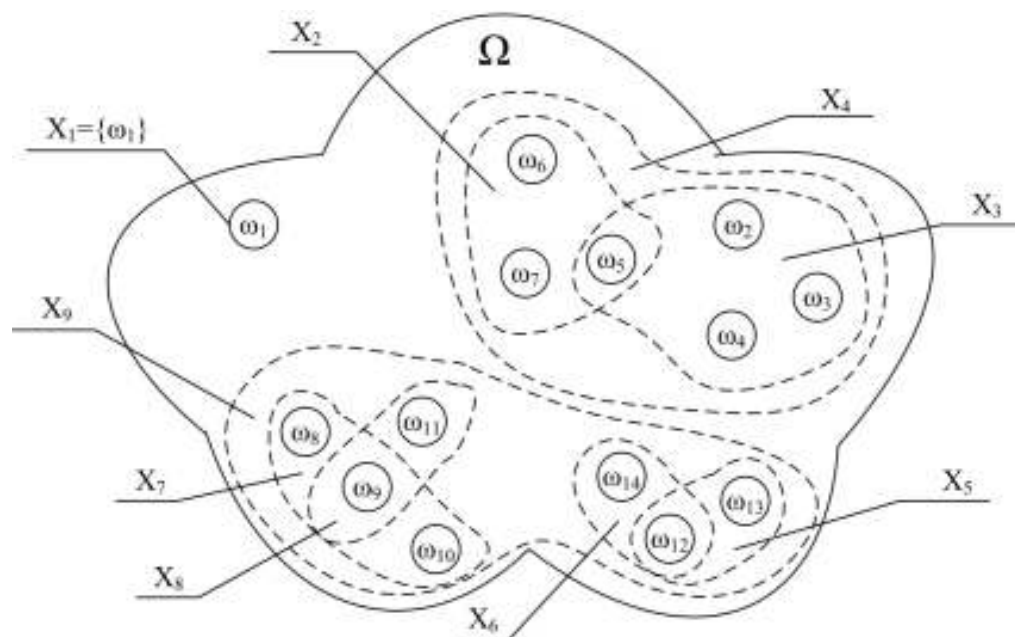


Рисунок 1 - Представление основы задачи в ТДС

На данном рисунке основа задачи Ω представлена следующими подмножествами:

$$\begin{aligned}
X_1 &= \omega_1; \quad X_2 = (\omega_5 \cup \omega_6 \cup \omega_7); \\
X_3 &= (\omega_2 \cup \omega_3 \cup \omega_4 \cup \omega_5); \\
X_4 &= X_2 \cap X_3 = (\omega_5 \cup \omega_6 \cup \omega_7) \cap (\omega_2 \cup \omega_3 \cup \omega_4 \cup \omega_5); \\
X_5 &= (\omega_{12} \cup \omega_{13}); \quad X_6 = (\omega_{12} \cup \omega_{14}); \\
X_7 &= (\omega_8 \cup \omega_{10}); \quad X_8 = (\omega_9 \cup \omega_{11}); \\
X_9 &= (X_5 \cap X_6) \cup (X_7 \cap X_8) = \\
&= ((\omega_{12} \cup \omega_{13}) \cap (\omega_{12} \cup \omega_{14})) \cup ((\omega_8 \cup \omega_{10}) \cap (\omega_9 \cup \omega_{11}));
\end{aligned}$$

Число возможных подмножеств D на множестве Ω составит $|D^\Omega|$, включая пустое множество $\emptyset$. Так, например:

- при $n=0$, имеем $D^\Omega = \{a = \emptyset\}$ и $|D^\Omega| = 1$;
- при $n=1$, имеем $\Omega = \{\omega_1\}$, $D^\Omega = \{a_0 = \emptyset, a_1 = \omega_1\}$ и $|D^\Omega| = 2$;
- при $n=2$, имеем $\Omega = \{\omega_1, \omega_2\}$,

$$D^\Omega = \{a_0 = \emptyset, a_1 = \omega_1 \cap \omega_2, a_2 = \omega_1, a_3 = \omega_2, a_4 = \omega_1 \cup \omega_2\} \text{ и } |D^\Omega| = 5.$$

На основе задачи Ω экспертом могут быть выделены подмножества $X_i \subseteq D^\Omega, i = \overline{1, |D^A|}$, удовлетворяющие следующим условиям:

1. $X_i = \{\emptyset\}$;
2. $X_i = \{\omega_i\}$ - экспертом выделена одна альтернатива $\omega_i \in \Omega$;
3. $X_i = \{\omega_i \mid i = \overline{1, p}\}$, $p < n$ - экспертом выделено p альтернатив $\omega_i \in \Omega$;
4. $X_i = \Omega = \{\omega_i \mid i = \overline{1, n}\}$ - у эксперта возникли трудности с выбором (все альтернативы равноценны);
5. Если $(X_i, X_j) \subset D^A$, тогда $(X_i \cap X_j) \in D^A$ и $(X_i \cup X_j) \in D^A$.

Таким образом, по результатам экспертного опроса может быть сформирована система подмножеств $X = \{P_j \mid j = \overline{1, m}\}$, отражающая выбор всех экспертов $E = \{E_j \mid j = \overline{1, m}\}$, где $P_j = \{X_l \mid l = \overline{1, k}\}$ - система подмножеств, сформированная экспертом $E_j (K = |D^\Omega| - 1, X_l \subseteq D^\Omega)$.

В основе ТДС лежат два вида моделей: свободная и гибридная. Свободная модель строится на множестве всех возможных подмножеств гипер множества D^Ω .

Пусть, например, $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \omega_3\}$, тогда число возможных подмножеств D^Ω составит $|D^\Omega| = 19$. Соответственно на основе одной группы экспертных свидетельств можно сформировать следующие подмножества $X_i \subseteq \Omega, i = \overline{0,18}$:

$$\begin{aligned}
 X_0 &= \{\emptyset\}; & X_9 &= \omega_1; & X_{10} &= \omega_2; & X_{11} &= \omega_3; \\
 X_1 &= \omega_1 \cap \omega_2 \cap \omega_3; & X_{12} &= (\omega_1 \cap \omega_2) \cup \omega_3; \\
 X_2 &= \omega_1 \cap \omega_2; & X_{13} &= (\omega_1 \cap \omega_3) \cup \omega_2; \\
 X_3 &= \omega_1 \cap \omega_3; & X_{14} &= (\omega_2 \cap \omega_3) \cup \omega_1; \\
 X_4 &= \omega_2 \cap \omega_3; & X_{15} &= \omega_1 \cup \omega_2, \\
 X_5 &= (\omega_1 \cup \omega_2) \cap \omega_3; & X_{16} &= \omega_1 \cup \omega_3; \\
 X_6 &= (\omega_1 \cup \omega_3) \cap \omega_2; & X_{17} &= \omega_2 \cup \omega_3; \\
 X_7 &= (\omega_2 \cup \omega_3) \cap \omega_1; & X_{18} &= \omega_1 \cup \omega_2 \cup \omega_3; \\
 X_8 &= (\omega_1 \cap \omega_2) \cup (\omega_1 \cap \omega_3) \cup (\omega_2 \cap \omega_3);
 \end{aligned} \tag{1}$$

Каждому из перечисленных X_i экспертами назначаются основные массы уверенности $m_i(X_i)$, которые комбинируются по правилу Дезера-Смарандаке (DS):

$$m_{DS}(X) = \sum_{\substack{X_1, \dots, X_m \subseteq D^\Omega \\ X_1 \cap \dots \cap X_m = X}} \prod_{i=1}^m m_i(X_i) \tag{2}$$

Это правило отражает конъюнктивный консенсус между основными назначениями уверенностей при произвольном m ($m > 2$) независимых групп свидетельств.

Основным недостатком свободной модели является то, что уже при числе элементов основы задачи $n \geq 4$ размерность задачи становится очень большой. Однако в реальных задачах число элементов намного меньше, чем число всех возможных подмножеств D^Ω . Это позволило авторам теории предложить гибридную модель, которая формируется на предположениях о возможности введения ограничений на различные элементы свободной модели.

Например, введем в рассмотренную модель (1) ограничения $\omega_1 \cap \omega_3 = \emptyset$ и $\omega_2 \cap \omega_3 = \emptyset$, т.е. пересекаются лишь элементы ω_1 и ω_2 .

С учетом этого получим гибридную модель ТДС:

$$\begin{aligned}
X'_1 &= \emptyset; & X'_4 &= \omega_2; & X'_7 &= \omega_1 \cup \omega_2; \\
X'_2 &= \omega_1 \cap \omega_2; & X'_5 &= \omega_3; & X'_8 &= \omega_1 \cup \omega_3; \\
X'_3 &= \omega_1; & X'_6 &= (\omega_1 \cap \omega_2) \cup \omega_3; & X'_9 &= \omega_2 \cup \omega_3; \\
X'_{10} &= \omega_1 \cup \omega_2 \cup \omega_3.
\end{aligned} \tag{3}$$

Рассмотрим пример выбора решений с использованием ТДС. Пусть имеется основа $\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \omega_3\}$ и соответствующая ей свободная модель, представленная выражениями (1). Наложим ограничение несуществования подмножества $X_9 = \omega_1 = \emptyset$. Это ограничение интерпретируется как удаление элемента ω_1 из начальной основы Ω , превращает в пустые множества подмножества X_1, X_2, X_3, X_7 из D^Ω :

$$\begin{aligned}
X_1 &= \omega_1 \cap \omega_2 \cap \omega_3 = (\omega_1 \cap \omega_2) \cap \omega_3 = (\emptyset \cap \omega_2) \cap \omega_3 = \emptyset \cap \omega_3 = \emptyset; \\
X_2 &= \omega_1 \cap \omega_2 = \emptyset \cap \omega_2 = \emptyset; & X_3 &= \omega_1 \cap \omega_3 = \emptyset \cap \omega_3 = \emptyset; \\
X_7 &= \omega_1 \cap (\omega_2 \cup \omega_3) = \omega_1 = \emptyset.
\end{aligned}$$

Кроме этого появляется ряд тождеств:

$$\begin{aligned}
X_5 &= (\omega_1 \cup \omega_2) \cap \omega_3 = (\emptyset \cup \omega_2) \cap \omega_3 = (\omega_2 \cap \omega_3) = X_4; \\
X_6 &= (\omega_1 \cup \omega_3) \cap \omega_2 = (\emptyset \cup \omega_3) \cap \omega_2 = (\omega_2 \cap \omega_3) = X_4; \\
X_8 &= (\omega_1 \cap \omega_2) \cup (\omega_1 \cap \omega_3) \cup (\omega_2 \cap \omega_3) = \\
&= \emptyset \cup \emptyset \cup (\omega_2 \cap \omega_3) = (\omega_2 \cap \omega_3) = X_4; \\
X_{12} &= (\omega_1 \cap \omega_2) \cup \omega_3 = \emptyset \cup \omega_3 = \omega_3 = X_{11}; \\
X_{13} &= (\omega_1 \cap \omega_3) \cup \omega_2 = \emptyset \cup \omega_2 = \omega_2 = X_{10}; \\
X_{14} &= (\omega_2 \cap \omega_3) \cup \omega_1 = (\omega_2 \cap \omega_3) = X_4; \\
X_{15} &= (\omega_1 \cup \omega_2) = \emptyset \cup \omega_2 = \omega_2 = X_{10}; \\
X_{16} &= (\omega_1 \cup \omega_3) = \emptyset \cup \omega_3 = \omega_3 = X_{11}; \\
X_{18} &= (\omega_1 \cup \omega_2 \cup \omega_3) = (\emptyset \cup \omega_2 \cup \omega_3) = \omega_2 \cup \omega_3 = X_{17}.
\end{aligned}$$

Окончательно получаем следующую гибридную модель Дезера-Смарандаке:

$$X'_0 = \emptyset; \quad X'_1 = \omega_2 \cap \omega_3; \quad X'_2 = \omega_2; \quad X'_3 = \omega_3; \quad X'_4 = \omega_2 \cup \omega_3. \tag{4}$$

Очевидно, что эта модель соответствует свободной модели для основы $\Omega' = \{\omega_2, \omega_3\}$.

Пусть далее получены две группы экспертных свидетельств А и В со следующими обобщенными основными массами уверенностей:

$$A: m_1(\omega_2) = 0,1; m_1(\omega_3) = 0,4; m_1(\omega_2 \cap \omega_3) = 0,3; m_1(\omega_2 \cup \omega_3) = 0,2;$$

$$B: m_2(\omega_2) = 0,4; m_2(\omega_3) = 0,1; m_2(\omega_2 \cap \omega_3) = 0,4; m_2(\omega_2 \cup \omega_3) = 0,1.$$

Необходимо скомбинировать эти массы уверенностей, используя правило Дезера-Смарандаке вида:

$$m_C = \sum_{\substack{A, B \subset D^\Omega \\ A \cap B = C}} m_1(A) * m_2(B) \quad (5)$$

Для этого представим все комбинированные подмножества, являющиеся результатом пересечения элементов полученной модели (5).

	$m_2(\omega_2)$	$m_2(\omega_3)$	$m_2(\omega_2 \cap \omega_3)$	$m_2(\omega_2 \cup \omega_3)$	
$m_1(\omega_2)$	ω_2	$\omega_2 \cap \omega_3$	$\omega_2 \cap (\omega_2 \cap \omega_3)$	$\omega_2 \cap (\omega_2 \cup \omega_3)$	(6)
$m_1(\omega_3)$	$\omega_3 \cap \omega_2$	ω_3	$\omega_3 \cap (\omega_2 \cap \omega_3)$	$\omega_3 \cap (\omega_2 \cup \omega_3)$	
$m_1(\omega_2 \cap \omega_3)$	$(\omega_2 \cap \omega_3) \cap \omega_2$	$(\omega_2 \cap \omega_3) \cap \omega_3$	$\omega_2 \cap \omega_3$	$(\omega_2 \cap \omega_3) \cap (\omega_2 \cup \omega_3)$	
$m_1(\omega_2 \cup \omega_3)$	$(\omega_2 \cup \omega_3) \cap \omega_2$	$(\omega_2 \cup \omega_3) \cap \omega_3$	$(\omega_2 \cup \omega_3) \cap (\omega_2 \cap \omega_3)$	$\omega_2 \cup \omega_3$	

Используя основные свойства операций над множествами, а именно:

$$\begin{aligned} \omega_2 \cap (\omega_2 \cup \omega_3) &= \omega_2; & \omega_3 \cap (\omega_2 \cup \omega_3) &= \omega_3; \\ \omega_2 \cap (\omega_2 \cap \omega_3) &= \omega_2 \cap \omega_3; & \omega_3 \cap (\omega_2 \cap \omega_3) &= \omega_2 \cap \omega_3; \\ (\omega_2 \cup \omega_3) \cap (\omega_2 \cap \omega_3) &= (\omega_2 \cup \omega_2 \cap \omega_3) \cup (\omega_3 \cup \omega_2 \cap \omega_3) = \omega_2 \cup \omega_3, \end{aligned}$$

упростим матрицу (6).

	$m_2(\omega_2)$	$m_2(\omega_3)$	$m_2(\omega_2 \cap \omega_3)$	$m_2(\omega_2 \cup \omega_3)$	
$m_1(\omega_2)$	ω_2	$\omega_2 \cap \omega_3$	$\omega_2 \cap \omega_3$	ω_2	(7)
$m_1(\omega_3)$	$\omega_3 \cap \omega_2$	ω_3	$\omega_2 \cap \omega_3$	ω_3	
$m_1(\omega_2 \cap \omega_3)$	$\omega_2 \cap \omega_3$	$\omega_2 \cap \omega_3$	$\omega_2 \cap \omega_3$	$\omega_2 \cup \omega_3$	
$m_1(\omega_2 \cup \omega_3)$	ω_2	ω_3	$\omega_2 \cup \omega_3$	$\omega_2 \cup \omega_3$	

Теперь рассчитаем обобщенные комбинированные массы уверенностей экспертных свидетельств:

$$\begin{aligned} m_{DS}(\omega_2) &= m_1(\omega_2) * m_2(\omega_2) + m_1(\omega_2) * m_2(\omega_2 \cup \omega_3) + \\ &+ m_1(\omega_2 \cup \omega_3) * m_2(\omega_2) = 0,1 * 0,4 + 0,1 * 0,1 + 0,4 * 0,2 = 0,13 \\ m_{DS}(\omega_3) &= m_1(\omega_3) * m_2(\omega_3) + m_1(\omega_3) * m_2(\omega_2 \cup \omega_3) + \\ &+ m_1(\omega_2 \cup \omega_3) * m_2(\omega_3) = 0,4 * 0,1 + 0,4 * 0,1 + 0,1 * 0,2 = 0,10 \\ m_{DS}(\omega_2 \cap \omega_3) &= m_1(\omega_2) * m_2(\omega_3) + m_1(\omega_2) * m_2(\omega_2 \cap \omega_3) + \\ &+ m_1(\omega_3) * m_2(\omega_2) + m_1(\omega_3) * m_2(\omega_2 \cap \omega_3) + m_1(\omega_2 \cap \omega_3) * \\ &* m_2(\omega_2) + m_1(\omega_2 \cap \omega_3) * m_2(\omega_3) + m_1(\omega_2 \cap \omega_3) * m_2(\omega_2 \cap \omega_3) = \\ &= 0,1 * 0,1 + 0,1 * 0,4 + 0,4 * 0,4 + 0,4 * 0,4 + 0,4 * 0,3 + 0,1 * 0,3 + \\ &+ 0,3 * 0,4 = 0,64 \\ m_{DS}(\omega_2 \cup \omega_3) &= m_1(\omega_2 \cap \omega_3) * m_2(\omega_2 \cup \omega_3) + m_1(\omega_2 \cup \omega_3) * \\ &* m_2(\omega_2 \cap \omega_3) + m_1(\omega_2 \cup \omega_3) * m_2(\omega_2 \cup \omega_3) = 0,3 * 0,1 + 0,2 * 0,4 + \\ &+ 0,2 * 0,1 = 0,13 \end{aligned}$$

Таким образом, проведенные расчеты показывают, что лучшее решение основывается на экспертных свидетельствах, указывающих

на наличие пересечения элементов ω_2 и ω_3 с наибольшей массой уверенностей, равной 0,64.

Выводы

В работе рассмотрены основные положения новой теории правдоподобных и парадоксальных рассуждений, которая позволяет анализировать сложные неопределенности, появляющиеся в ситуациях, когда экспертные свидетельства (оценки) перекрываются (пересекаются).

Рассмотренный пример демонстрирует возможности этой теории. Следует отметить, что указанное положительное свойство теории Дезера-Смарандаке обеспечивается достаточно сложными моделями и большим объемом вычислений. Однако такие трудности могут быть успешно преодолены с помощью соответствующих программных средств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Валькман, Ю.Р. Моделирование НЕ-факторов – основа интеллектуализации компьютерных технологий [Текст] / Ю.Р. Валькман, В.С. Быков, А.Ю. Рыхальский // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2007. - №1. – с.39-61.
2. Заде, Л. Лингвистическая переменная и теория нечетких множеств [Текст] / Л. Заде. – М.: Мир, 1979. – 168 с.
3. Коваленко, И.И. Экспертные технологии поддержки принятия решений: монография [Текст] / И.И. Коваленко, А.В. Швед. – Николаев: Илион, 2013. – 216 с.
4. Нариньяни, А.С. Неточность как НЕ-фактор. Попытка доформального анализа. Препринт [Текст] / А.С. Нариньяни. – Москва-Новосибирск, 1994. – 34 с.
5. Beynon, M.J. DS/AHP method; a mathematical analysis, including an understanding of uncertainty [Text] / M.J. Beynon // European Journal of Operational Research. – 2002. – vol.140. – pp. 148-164.
6. Smarandache, F. Advances and applications of DSMT for information fusion [Text] / F. Smarandache, J. Dezert // Rehoboth: American Research Press, 2006. – vol.2. – 461 p.
7. Smarandache, F. Unification of Fusion theories (UFT) [Text] / F. Smarandache // International Journal of Applied Mathematics and Statistics. – 2004. – vol.2. – pp.1-14.
8. Uzga-Rebrovs, O. Nenoteiktiby parvaldisana / O. Uzga-Rebrovs. – Rēse: RA Izdevniecība, 2010. – vol.3 – 560 lpp.

E.U. Pokuda, V.I. Korsun

**METHOD OF ASSESSING COMPETENCE OF EXPERTS
DIAGNOSING BASIC BLOCKS OF QUARRY
DUMPTRUCKS**

Abstract. Methodology of testing consistency of the data obtained during the assessment of expert competence is considered. Criteria of assessing the experts' competence with weighing coefficients are analyzed. Data consistency is assessed with the criterion. Based on the offered algorithm, a program in VBA programming language is designed. The offered methodology is demonstrated on the specific example of forming a group of experts to diagnose the basic blocks of quarry dumptrucks.

Keywords: expert, competence assessment, consistency, criterion.

Introduction

At present, expert's opinion is often used to solve problems in different spheres of human activities. Expert assessment is the procedure of assessing a problem based on the experts' opinion (specialists in a certain field) aimed at further decision-making (for instance, to increase the performance at an enterprise). For participation in such assessment, highly qualified specialists with domain-specific knowledge and skills are engaged. However, selection of experts seems to be problematic. To form such group of experts it is necessary to assess the experts' competence.

Analysis of recent achievements

In papers [2, 4, 5, 7], generic methodology of assessing the level of experts' competence is considered. Most commonly, the selection of experts is based on the objective approach. The studied selection of experts supposes the selection of highly qualified specialists based on certain professional data. Earlier in the work [1], generic methodology of selecting expert group members taking into account the competence level of each expert.

Problem statement

While forming an expert group, some uncertainty of the obtained data is inevitable. To reduce the uncertainty, it is offered to use the data consistency test. The offered method will be considered on the specific example of forming an expert group to assess the basic blocks of quarry dumptrucks.

Main part

In paper [3], multi-stage process of forming an expert group is discussed. In Table 1 are presented criteria of assessing experts' competence by weighing criteria [1].

Table 1

Criteria of assessing experts' competence

Criteria		Criterion alternative
1	Field of expertise	Automobile diagnosis – 1; automobiles and automobile transport – 0.9; transport management – 0.8; machine building – 0.7; other – 0.5.
2	Academic degree	Doctor of Technical Sciences – 1; Candidate of Technical Sciences – 0.8; Master – 0.6; Specialist – 0.5; Bachelor – 0.4.
3	Position	Professor – 1; Assistant Professor – 0.8; Lecturer – 0.6; Engineer – 0.8; Research Worker – 0.8.
4	Record of work	Less than 5 years – 0.5; from 5 to 10 years – 0.6; from 10 to 15 years – 0.7; from 15 to 20 years – 0.8; from 20 to 30 years – 0.9; more than 30 years – 1.
5	Knowledge and skills	Altogether 10 specific skills and areas of knowledge 0.1 points each are supposed.
6	The source of justifying the expert's opinion	The following criteria are included in this category: conducted theoretical analysis; production experience; synthesis of printed papers (both domestic and foreign); intuition. Each criterion has 3 options: high – 1; medium – 0.6; low – 0.3.
7	Personal characteristics	Altogether 10 characteristics are supposed, each is valued as follows: always – 1; almost always – 0.9; very often – 0.8; often – 0.7; more than average – 0.6; average – 0.5; less than average – 0.4; rarely – 0.3; hardly ever – 0.2; sometimes – 0.1, never – 0.
8	Experience of working as an expert	If the experience of working as an expert is less than 5 times, than divide the number by 5, if it is more than 5 – 1.
9	Domestic publications	Less than 5 – 0.5; from 5 to 10 – 0.6; from 10 to 15 – 0.7; from 15 to 20 – 0.8; from 20 to 30 – 0.9; more than 30 – 1.
10	Foreign publications	Less than 5 – 0.6; or from 5 to 10 – 0.7; from 10 to 15 – 0.8; from 15 to 20 – 0.9; more than 20 – 1.
11	Patents	If the number of patents is less than 5, than divide the number by 5, if it is more than 5 – 1.
12	Introductions	If the number of introductions is less than 10, than divide the number by 10, if it is more than 10 – 1.
13	Participation in symposia	If the number of participations in symposia is less than 10, than divide the number by 10, if it is more than 10 – 1.

Assessment of competence of the i -th expert K_i is calculated with weighing coefficient of each criterion taken into account. To realize the offered method it is necessary to calculate the following criteria [2]:

- 1) average score $\overline{K_i}$ for each expert in all criteria:

$$\overline{K_i} = \frac{K_i}{m}, \quad (1)$$

where m – is the total number of experts.

- 2) relative average score $\overline{K_{ri}}$ for each of m experts:

$$\overline{K_{ri}} = \frac{\overline{K_i}}{\sum_{i=1}^m \overline{K_i}} \quad (2)$$

- 3) nominated average score $\overline{K_{ni}}$ for each of m experts:

$$\overline{K_{ni}} = \frac{\overline{K_{ri}}}{\max_{i=1,m}(\overline{K_i})} \quad (3)$$

- 4) general standard uncertainty of each i -th expert:

$$u_{ci} = 1 - K_i. \quad (4)$$

All data are stocked in Table 2.

Table 2

Example of drawing up the table

Expert, i	K_i	$\overline{K_i}$	$\overline{K_{ri}}$	$\overline{K_{ni}}$	u_{ci}
1					
2					
...	...	...	...	...	...
m					

It is also necessary to calculate the reference value K_{ref} and its general standard uncertainty u_{ref} for general assessment of experts:

$$K_{ref} = \frac{\sum_{i=1}^m \overline{K_{ni}}}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{u_{ci}^2}}, \quad u_{ref} = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{u_{ci}^2}}}. \quad (5)$$

To check the consistency of data, it is necessary to calculate χ^2 criterion [6]:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^m \frac{(\overline{K_{ni}} - K_{ref})^2}{u_{ci}^2}. \quad (6)$$

If the criterion value calculated by the i -th expert data does not exceed the critical value for the level of confidence 0.95 and the number of degrees of freedom $m - 1$ (Table 3):

$$\chi^2 < \chi_{0.95}^2(m-1), \quad (7)$$

than the data of the formed group with m experts are considered to be consistent.

Table 3

The value of χ^2 criterion for the group with m experts

$m-1$	χ^2	$m-1$	χ^2	$m-1$	χ^2	$m-1$	χ^2
3	0.71	8	3.33	13	6.57	18	10.11
4	1.15	9	3.94	14	7.26	19	10.85
5	1.64	10	4.57	15	7.97	20	11.69
6	2.17	11	5.23	16	8.67	21	12.34
7	2.73	12	5.89	17	9.39	22	13.09

If condition (7) is fulfilled, than the expert group membership is confirmed and ranked by $\overline{K_{ni}}$ criterion.

In Fig. 1 is given the algorithm of assessment of experts' competence taking into account uncertainty data.

Based on the offered algorithm, a program written in VBA programming language is developed.

Let's consider the example of the program for the assumed group of experts to assess the basic state of quarry dumptrucks.

In Table 4 is given the calculation of criteria.

Table 4

Calculation of consistency of experts' competence taking into account data uncertainty

Expert, i	K_i	$\overline{K_i}$	$\overline{K_{ri}}$	$\overline{K_{ni}}$	u_{ci}
1	0.98	0.075	0.094	0.124	0.02
2	0.93	0.072	0.089	0.118	0.07
3	0.88	0.068	0.084	0.111	0.12
4	0.87	0.067	0.083	0.11	0.13
5	0.85	0.065	0.081	0.108	0.15
6	0.84	0.065	0.08	0.106	0.16
7	0.79	0.061	0.075	0.1	0.21
8	0.77	0.059	0.073	0.097	0.23
9	0.75	0.058	0.072	0.095	0.25
10	0.73	0.056	0.07	0.092	0.27
11	0.72	0.055	0.069	0.091	0.28
12	0.7	0.054	0.067	0.089	0.3
13	0.67	0.052	0.064	0.085	0.33

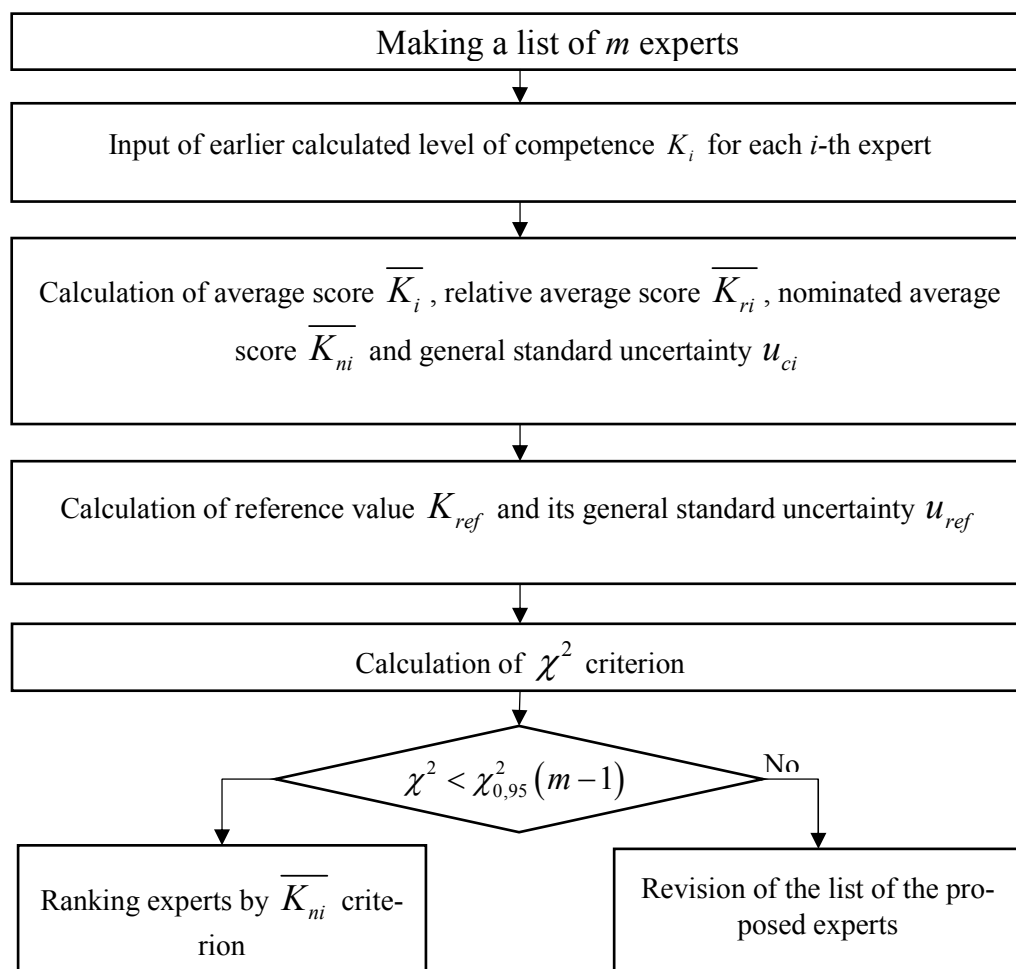


Figure 1. Algorithm of assessing the experts' competence taking into account data uncertainty

The calculation shows that: reference value is $K_{ref} = 0,122$, general standard uncertainty is $u_{ref} = 0,052$ and criterion $\chi^2 = 0,132$. Table value of the criterion $\chi^2_{0,95}(m-1)$, where, it equals $\chi^2_{0,95}(12) = 5,89$. Consequently, condition (7) is fulfilled $0,132 < 5,89$, thus the group of experts is confirmed by χ^2 criterion.

Conclusions

The considered method allows testing consistency of the data obtained during the assessment of experts' competence. The algorithm of calculation is presented, and the program in VBA programming language is realized. The offered method is considered on the specific example of forming a group of experts to assess the basic blocks of quarry dumptrucks.

REFERENCES

1. Прокуда Э.Ю. Информационное обеспечение системы оценивания уровня компетентности экспертов // Сборник научных трудов международной конференции «Развитие информационно-ресурсного обеспечения образования и науки в горно-металлургической отрасли и на транспорте». – Д.: НГУ, - с. 333-343.
2. Величко О.М., Гордієнко Т.Б., Коломієць Л.В. Методика оцінки компетентності експертів з урахуванням невизначеності даних // Металург. і гірничо-руд. пром-сть. – 2014. – № 3. – С. 135-137.
3. Прокуда Э.Ю. Анализ формирования состава экспертной группы // Інформаційні технології. Безпека та зв'язок: Матеріали всеукр. наук.-практ. конф. – Д.: Державний ВНЗ «Національний гірничий університет», 2014. С. 48-49.
4. Маловик К.Н. Развитие научных основ повышения качества оценивания и прогнозирования ресурсных характеристик сложных объектов: монография. – Севастополь: СКУАЭиП, 2013. – 332 с.
5. Постников В.М. Анализ подходов к формированию состава экспертной группы, ориентированной на подготовку и принятие решений – Научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана, №5, май 2012, с. 333-346
6. Марголин Е. Методика обработки данных экспертного опроса. // Полиграфия . – 2006. - №5 - С. 14 – 16.
7. Орлов А.И. Экспертные оценки. Учебное пособие.–М.:2002. – 548 с.

С.В. Пилипенко, В.У. Григоренко

**ИЗМЕНЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ
ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ РУЧЬЯ КАЛИБРОВ СТАНОВ
ХПТ ПОД ВЛИЯНИЕМ ТЕПЛОВОГО РАСШИРЕНИЯ ПРИ
БЕЗЭМУЛЬСИОННОЙ ПРОКАТКЕ**

Анотація. Розглядаються особливості впливу теплового розширення металу на зміну розмірів поперечного перерізу рівчака калібрів стана ХПТ і розмірів робочого конуса для процесу деформації при прокатці труб на сольовому мастилi та при відсутності емульсійного охолодження. У даній роботі запропоновано метод компенсації величини термічного ефекту при прокатці труб на сольовомузмащенні й при відсутності емульсійного охолодження. Компенсація зміни розмірів поперечного переріза рівчака калібру запропонованим способом дозволить робити необхідні коректування при розрахунках параметрів геометрії рівчака калібрів валківстанів ХПТ і забезпечуватипроєктний режим обтиснень компенсуючи термічний вплив.

Ключеві слова: холодна пiльгерна валкова прокатка труб, беземульсійна прокатка, термічний ефект.

Введение. При прокатке труб из титановых сплавов на станах ХПТ широко используется безэмульсионная прокатка. Этот процесс холодной деформации труб предполагает использование солевых смазок без охлаждения валков и прокатываемой трубы. Ведение прокатки таким способом приводит к изменению размеров поперечного сечения ручья калибров вызванного термическим влиянием на инструмент [1]. Данный эффект усложняет настройку станов ХПТ, отрицательно сказывается на точности труб, повышает расходный коэффициент металла.

Поскольку пильгерная валковая прокатка является одним из основных заключающих процессов производства титановых труб повышенной точности и качества [2, 3] то решение проблем учета термического влияния на изменение геометрических параметров инструмента является актуальным.

Анализ публикаций. Авторами статьи производились исследования изменения температуры конуса деформации [3]. Из таблицы 1 видно, что температура металла изменяется в значительных пределах (таблица 1). Обнаружено также, что в результате термического эффекта и увеличения диаметра валка в зоне калибра и вблизи его, наблюдается защемление калибра справа и слева от ручья.

В статье [1] предложена зависимость для расчета изменения диаметра ручья калибров

$$Dt_i = D_i + \lambda \Delta t_i (D_g + \Delta - D_i), \quad (1)$$

где Dt_i – диаметр калибра с учетом разогрева (рис. 1); D_i – диаметр калибра согласно калибровке; D_g – диаметр валка; Δ – зазор между калибрами; Δt_i – температура калибра в данном сечении; λ – коэффициент термического расширения металла.

Таблица 1

Температура в зонах конуса деформации при прокатке труб из сплава Gr 2 по маршруту 32х2,2→19,05х0,9

№ трубы	Температура поверхности трубы в зонах конуса деформации °С		
	Зона редуцирования (конец зоны)	Зона обжатия стенки (перед средней зоной)	Зона калибровки (начало зоны)
1 (после серии труб)	36	122	65
2	63	180	101
3 и далее	122	270	219

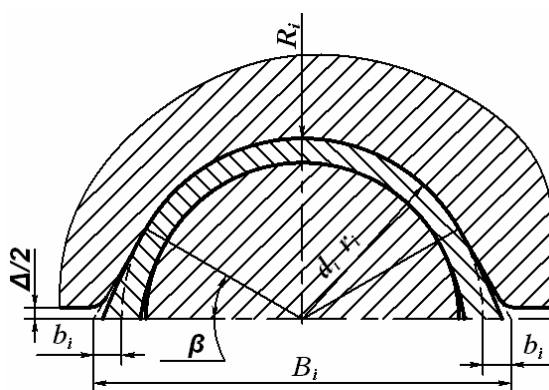


Рисунок 1 - Параметры поперечного сечения ручья калибра: Δ – зазор между калибрами; B_i – ширина; b_i – развалка; β – угол развалки; r_i – радиус калибра; R_i – расстояние от центра вращения валка до трубы по гребню ручья; d_i – диаметр оправки

Выделение не решенного. Изменение формы развертки ручья калибра из-за нагрева приведет к перераспределению проектных обжатий. Это нежелательно. Поэтому необходимо упредить такое изменение. Необходимо несколько изменить параметры калибра так, чтобы при нагреве параметры калибра стали проектными.

В данной работе поставлена задача разработки метода компенсации величины термического эффекта при безэмульсионной прокатке и экспериментальной оценки влияния температурного изменения размеров калибра на геометрию прокатанной трубы.

Основной материал. На рисунке 2 показаны результаты замеров изменения стенки трубы из сплава ВТ1-0 (ХПТ-32, маршрут 28x1,82-19x0,65) прокатанной при «разогреве» стана.

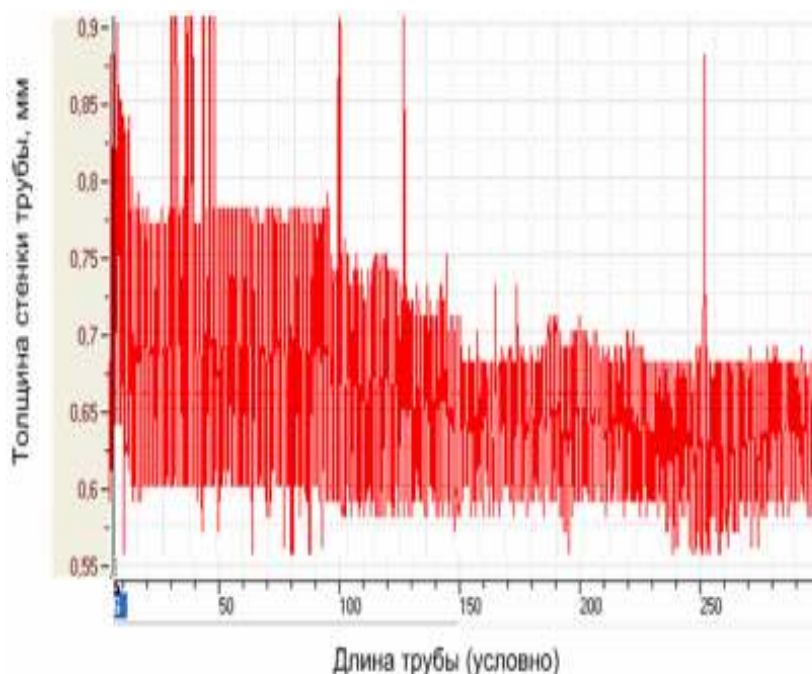


Рисунок 2 - Изменение толщины стенки вдоль первой трубы, прокатанной на стане ХПТ-32 (маршрут 28x1,82-19x0,65)

На рисунке 3 показан график изменения толщины стенки в зоне основного разогрева. Видно, что величина изменений толщины стенки значительна и может вывести толщину стенки трубы за пределы допуска.

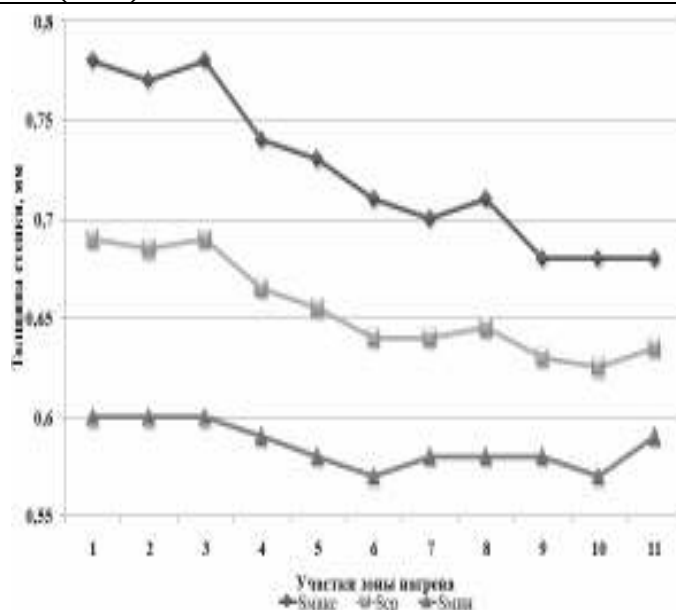


Рисунок 3 - График изменения толщины стенки в зоне нагрева первой трубы прокатанной на стане ХПТ-32 (ХПТ-32, маршрут 28х1,82-19х0,65)

Для компенсации теплового расширения необходимо уменьшить диаметр калибра на величину теплового расширения (1):

$$Dt_{i-кон} = D_i - \lambda \Delta t_i (D_{\phi} + \Delta - D_i), \quad (2)$$

Таким образом, можно выходить на проектные размеры ручья в нагретом состоянии.

По предлагаемой зависимости (3) рассчитали изменения к калибровке ручья калибров. Изготовили калибры и провели прокатку труб. Провели обмеры рабочего конуса. Полученные результаты замеров диаметра конуса деформации в контрольных сечениях (рис. 4) практически совпали с проектными размерами.

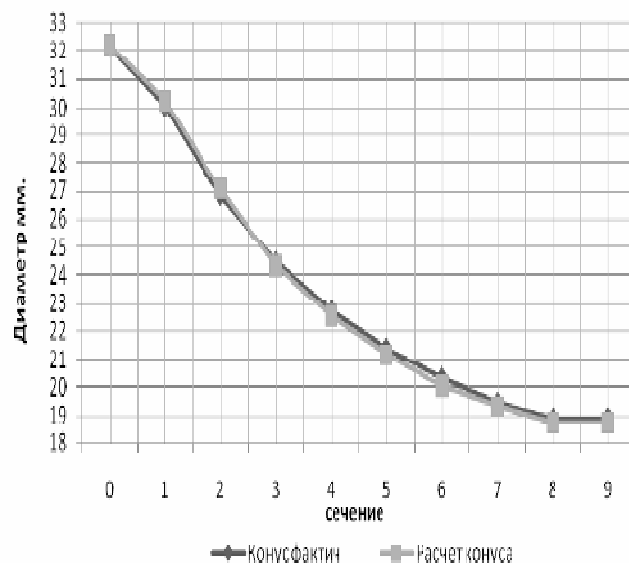


Рисунок 4 - Фактические и проектные диаметры конуса деформации стана ХПТ в контрольных сечениях (сплав Gr 2 маршрут 32х2,2→19,05х0,9)

Выводы

Под действием локального термического расширения происходит неравномерное изменение параметров калибра в зоне контакта калибра с трубой. Это изменение неравномерно по длине конуса деформации. Термические изменения размеров и формы инструмента при без эмульсионной прокатке труб искажают заданный калибровкой режим деформации и затрудняют настройку стана.

Компенсация изменения размеров поперечного сечения ручья калибра, в результате действия термического эффекта предложенным способом позволит производить необходимые корректировки при расчете параметров геометрии ручья калибров валков станов ХПТ и обеспечивать проектный режим обжатий при прокатке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Влияние теплового режима прокатки труб на изменение размеров технологического инструмента / [Л.В. Тимошенко, С.Н. Кекух, И.Ю. Коробочкин и др.] // Сталь. - 1981. - №5. - С. 53 - 55.
2. Григоренко В.У., Пилипенко С.В. Новый подход к определению калибровки инструмента станов холодной прокатки труб // ВісникДонбаськоїдержавноїмашинобудівноїакадемії. - 2006- №1. - С.77-79.
3. Об изменении геометрических размеров поперечного сечения ручья калибров станов ХПТ под влиянием теплового расширения / В.У. Григоренко, С.В. Пилипенко // Научный вестник ДДМА. Сборник научных трудов №1 (6Е).- ДГМА, Краматорск, 2010. - С. 37-42.

Y.N. Kharlamova, V.I. Korsun

**STUDY OF THE PROCESS OF SEEKING GLOBAL
EXTREMUM OF FUNCTION BY SYMMETRIC
ALGORITHMS WITH PARALLEL SPACE**

Abstract. Theoretical and experimental research of seeking global extremum of function based on the application of the concept of symmetry is carried out.

Keywords: extremum of functions, methods of symmetry, gradient methods of optimization.

Problem statement

Implementation of a real-time optimization, is usually accompanied by various kinds of energy processes. Processes of energy flow and transformation are rather inertial.

The latter processes result in undesirable dynamic processes during the extremum seeking. Therefore, there is an important problem of providing the relevant power level of optimization process realization by the outflow of excess energy or by inflow of additional energy.

Analysis of recent research of the problem

To solve dynamic optimization problems, the relaxation method is often used [1,2]. It is implemented with the help of non-steady processes described by the vector differential equation:

$$\frac{dx}{dt} + k \operatorname{grad} f(x) = 0, \quad k > 0; \quad (1)$$

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + r \frac{dx}{dt} + \operatorname{grad} f(x) = 0, \quad m > 0, \quad r > 0. \quad (2)$$

These processes with time converge (are established) to solve the given problem.

The relaxation method implemented according to equation (1) is called the steepest gradient descent method, and the relaxation method according to equation (2) is the heavy ball method. The former relaxation methods, as a rule, is referred to as a method of the local extremum

seeking, and the latter (with the appropriate choice of parameters m and r) - to the methods of global extremum seeking.

It is known that the elongation of the surface of the goal function along one of the directions reduces the efficiency of the above mentioned relaxation methods.

Purpose and objectives

This problem can be solved if, while seeking function extremum, the concept of symmetry is used. It has shown itself to good advantage in such one-dimensional optimization methods as dichotomy methods, Fibonacci and the golden section. In these methods, two representative points are moving to the function extremum, symmetrically substantially reducing uncertainty (localization) interval. Similar situation is observed while determining the roots of nonlinear one-dimensional function using a combined chords-tangents method.

Main part

It is possible to carry out the improvement of multivariate methods of function extremum seeking based on the application of the concept of symmetry in the following way [3].

First, we write the expression of a downward-convex function $f(x)$ (x - vector argument), whose extremum is found in the form:

$$f(x) = 0,5 \left((x-x)^T Q (x-x) + f(x) + f(x) \right) \quad (3)$$

where Q is a positive definite symmetric matrix.

Then, replacing in (3) one of the vectors x by vector y , and the second vector x - by vector z , we obtain the auxiliary function:

$$F(y,z) = 0,5 \left[(y-z)^T Q (y-z) + f(y) + f(z) \right]. \quad (4)$$

It is obvious that the extremum of function (4) will be the case when $y = z = x^*$, where x^* is the value of a vector argument for which the function $f(x)$ takes the extreme value.

The movement to the minimum of auxiliary function $F(y,z)$ is provided by the simultaneous coherent change of vector arguments y and z by any known extremum seeking algorithm.

The algorithm of the steepest gradient descent method when working with $F(y,z)$ has the following form:

$$\frac{dy}{dt} = -kQ(y-z) - 0,5k \operatorname{grad} f(y), \quad y(0) = y_0$$

$$y_0 \neq z_0. \quad (5)$$

$$\frac{dz}{dt} = -kQ(z-y) - 0,5k \operatorname{grad} f(z), \quad z(0) = z_0,$$

Due to the symmetrical algorithm (5) the process of convergence of variables y and z is described by the vector differential equation:

$$\frac{d(y-z)}{dt} = -2kQ(y-z) - 0,5k(\operatorname{grad} f(y) - \operatorname{grad} f(z)).$$

In contrast to the differential equation (2), which can be represented as a system of two first order differential equations and which describes the movement of one representative point, the algorithm (5) describes energy interaction of two representative points. These points form a uniform system.

It is quite common in everyday life. For example, two persons by acting cohesively overcome a high hurdle: first, one of them pushes up the other, and then the second one pulls the first. Such examples are numerous.

In the case when some of the converging coordinate points are common, auxiliary function can be written as follows:

$$F(y_1, z_1, x_2) = 0,5 \left[(y_1 - z_1)^T Q_1 (y_1 - z_1) + f(y_1, x_2) + f(z_1, x_2) \right], \quad (6)$$

where $f(y_1, x_2)$ and $f(z_1, x_2)$ are functions obtained from a function $f(x)$ whose minimum is searched by replacing a component x_1 of the vector $x = [x_1, x_2]$ by vectors y_1 and z_1 , respectively; Q_1 is a positive definite symmetric matrix.

The algorithm (2) of the heavy ball method [4] is more effective with the auxiliary function $F(y, z)$:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + r \frac{dy}{dt} + \frac{\partial F(y, z)}{\partial y} = 0,$$

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + r \frac{dz}{dt} + \frac{\partial F(y, z)}{\partial z} = 0. \quad (7)$$

It should be noted that for the extremum seeking of the auxiliary function (4) there can be involved both continuous and discrete algo-

rithms; several converging points. The latter allows them to overcome local extremes.

Let's consider how the principle of the symmetry concept works by applying it to the function:

$$f(x) = k \cdot (x - a)^2 - c \cdot \cos(2\pi x) + b, \quad (8)$$

the graph shown in Fig.1.a. From Fig.1.a it is clear that the function under consideration has local extremes, which are located close to the global extremum located at the point with the coordinate $x=4$.

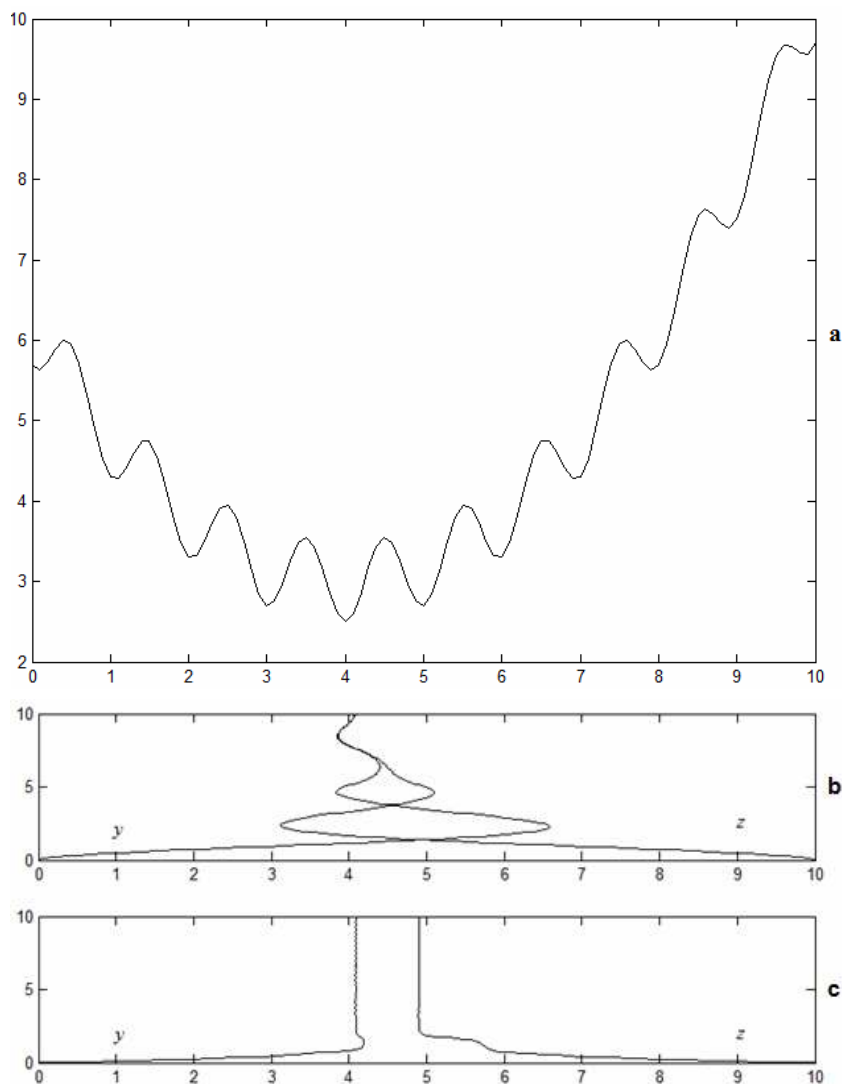


Fig. 1. a - graph of the function (8), $c=0.5$; the movement process of representative points to the global extremum according to the algorithm of the heavy ball method - b, the gradient method - c.

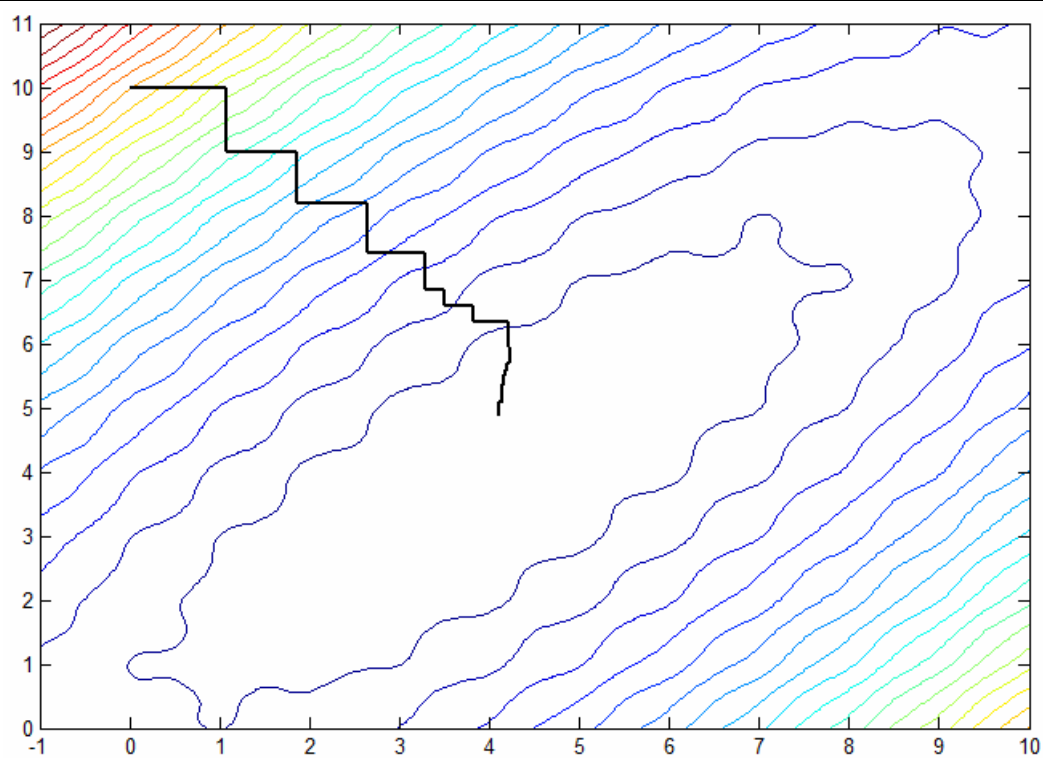


Fig. 2. Graphic illustration of movement to a minimum by the method of coordinate descent, $c=0.5$

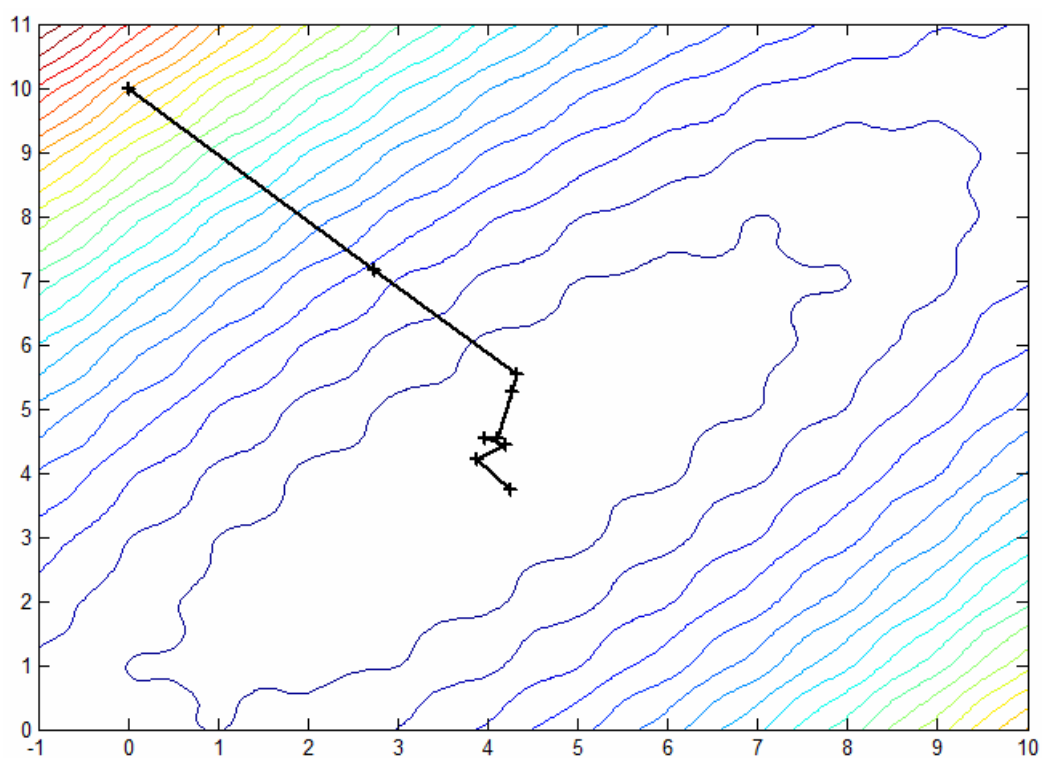


Fig. 3. Graphic illustration of movement to a minimum by the gradient descent method with constant pitch, $c=0.5$

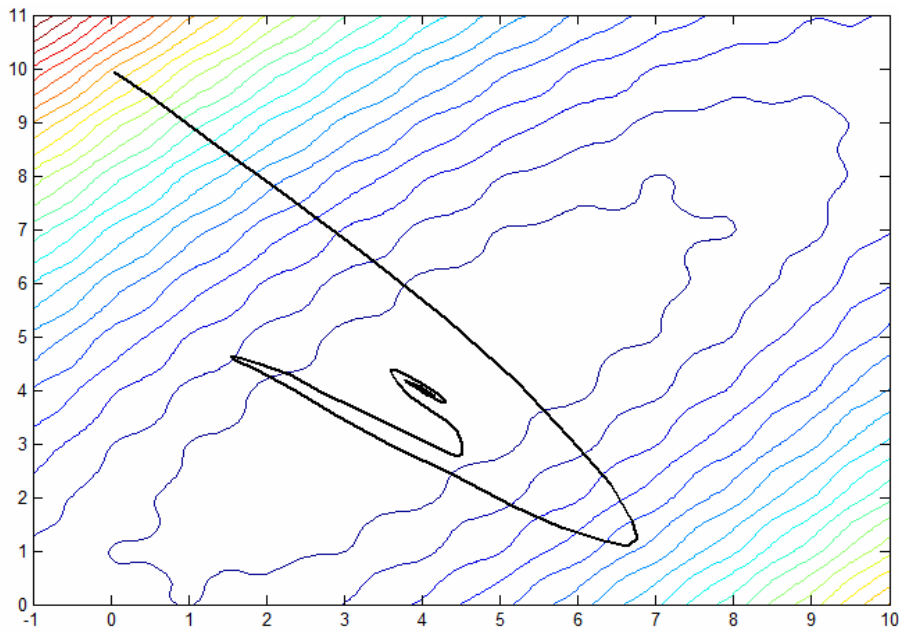


Fig. 4. Graphic illustration of movement to a minimum by the heavy ball method, $c=0.5$

Using equation (4), for the function (8), we obtain the auxiliary function $F(y, z)$:

$$F(y, z) = 0,5 \left[k(y - a)^2 - c \cdot \cos(2\pi y) + k(z - a)^2 - c \cdot \cos(2\pi z) + 2b \right] + 0.5q(y - z)^2. \quad (9)$$

The movement of two representative points to the minimum function $f(x)$ according to the algorithm of the heavy ball method is shown in Fig.1.b, gradient method – in Fig.1.c., the initial values of coordinates being $y=0$ and $z=10$ and belonging to the original function (8).

To minimize the function (9), we apply the following methods: coordinate descent, gradient method with constant pitch, and heavy ball method. The contour lines of the function (9) with the movement trajectory of representative points to its minimum, according to algorithms of the above methods (when $k = 0.2$, $a = 4$, $b = 3$, $c = 0.5$, and $q = 1$) are presented in Fig.2-4.

As it is seen from the graph (Fig.2) the method of coordinate descent does not give positive results when seeking the global extremum of the function (8), one of the representative points got trapped in a local extremum. The method of steepest descent with a constant pitch (fig.3), at the chosen step 0.254, solves this problem, but with very low accuracy (calculated values are: $y=4.2529$ and $z=3.7272$).

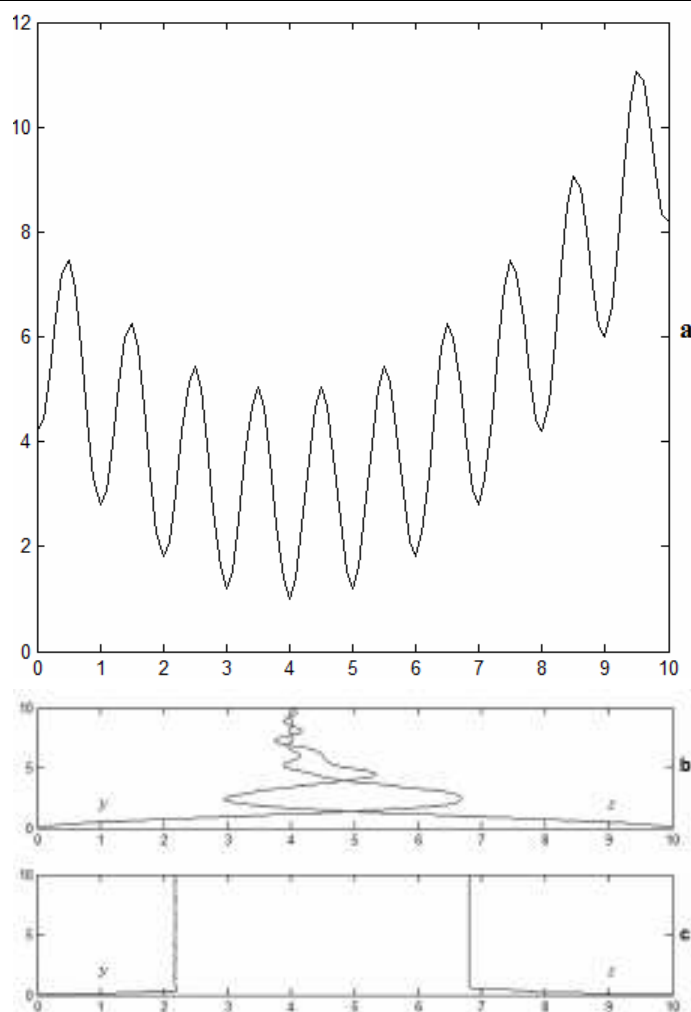


Fig. 5. a - graph of the function (8), $c=2$; the process of movement of representative points to the global extremum according to the algorithm of the heavy ball method - b, the gradient method - c.

Despite the multiextremal character of given function, the use of heavy ball method, for variation of the variables y and z , allows to get from an initial point $(0; 10)$ to the finite, where $y=z=x^*=4$ (Fig. 4). This result was obtained with the following chosen values: the damping coefficient $r = 2$, the weight of the heavy balls $m = 2.16$. The calculated values $y=3.9975$ and $z=4.0017$ indicate that the coordinate of the global extremum of function (8) is found quite accurately.

Let's find out how the above algorithms work in finding the global extremum of the function (8), taking the parameter $c=2$, which will increase the oscillation amplitude. Graph of the function (8) with $c=2$ is shown in Fig.5.a. Fig.5.b illustrates the process of movement of representative points to the global extremum according to the algorithm of the heavy ball method, Fig.5.c - according to the algorithm of the gradient method.

The results of algorithms of coordinate descent method, gradient descent method with constant pitch and the hard ball method with $c=2$ are shown in Fig.6-8 respectively.

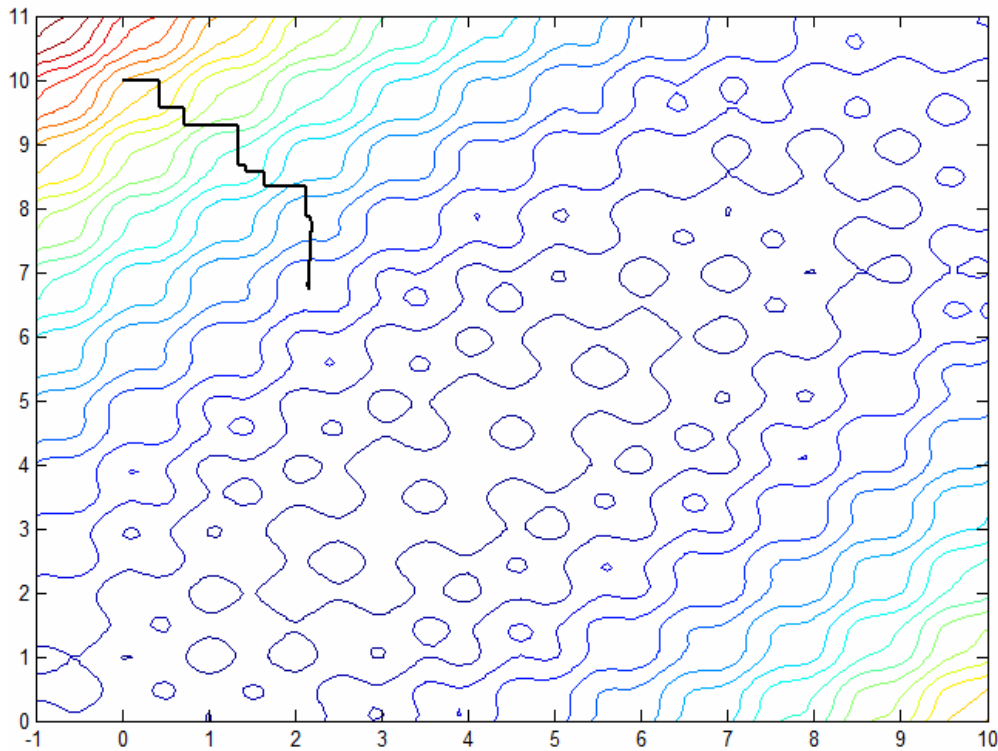


Fig. 6. Graphic illustration of movement to a minimum by the method of coordinate descent, $c=2$

Under increased amplitude in the methods of coordinate descent and gradient descent with a constant pitch, representative points end their movement in a local extremums. In the heavy ball method, the movement process of representative points ends at the global optimum $x^*=4$. The calculated values were: $y=4.0006$ and $z=3.9973$, at the weight of heavy balls $m=2.3$ and the damping coefficient $r=2$.

The results of the above algorithms for $c = 0.5$ and $c = 2$ are summarized in Table 1.

Table 1

Method	$c=0.5$		$c=2$	
	the number of iterations	x^*	the number of iterations	x^*
coordinate descent	20	$\begin{pmatrix} 4.0840 \\ 4.8919 \end{pmatrix}$	63	$\begin{pmatrix} 2.1491 \\ 6.8420 \end{pmatrix}$
gradient method with constant pitch	9	$\begin{pmatrix} 4.2529 \\ 3.7272 \end{pmatrix}$	8	$\begin{pmatrix} 4.6124 \\ 4.1595 \end{pmatrix}$
hard ball	127	$\begin{pmatrix} 3.9975 \\ 4.0017 \end{pmatrix}$	144	$\begin{pmatrix} 3.9973 \\ 4.0006 \end{pmatrix}$

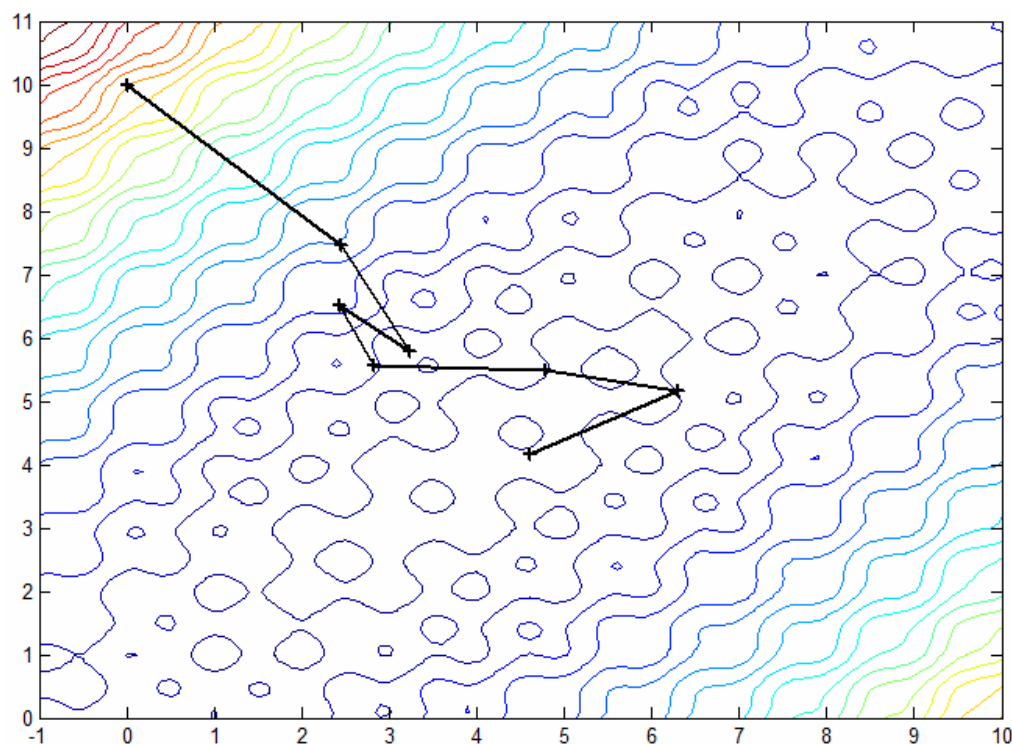


Fig. 7. Graphic illustration of movement to a minimum by the gradient descent method with constant pitch, $c=2$

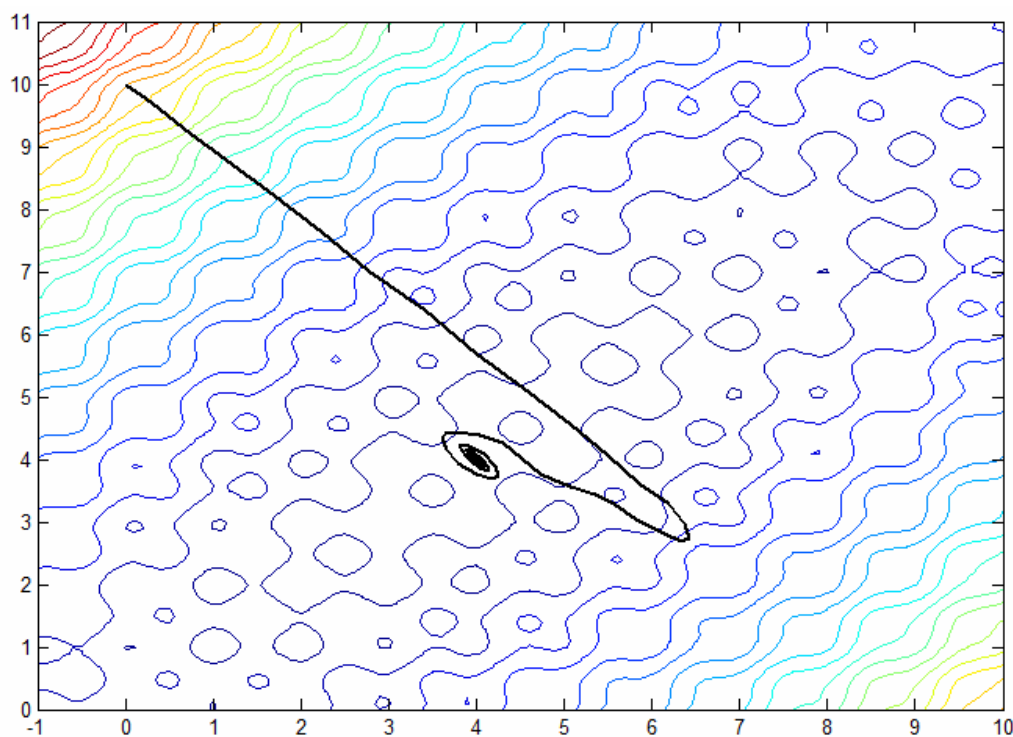


Fig.8. Graphic illustration of movement to a minimum by the heavy ball method, $c=2$

Conclusions and perspectives for further research

Analyzing the obtained results, we can draw the following conclusions:

1. Gradient descent method with a constant pitch, as compared with the heavy ball method, with $c=0.5$ finds the global extremum of the function at the minimal number of iterations, but has low accuracy.
2. With an increase in the oscillation amplitude to $c=2$ gradient methods are of no use for seeking the global extremum of function as the representative points finish their movement in local minimums.
3. Application the principle of symmetry to the algorithm of heavy ball method solves the task of finding the global extremum of the function (8) with high accuracy, even at increased amplitude of oscillation.
4. Parallelization of extremum seeking of function based on the use of the concept of symmetry applied to a class of dynamic optimization problems has allowed [5,6] and in the future will allow obtaining a number of positive results for the estimation of unknown parameters of objects.

REFERENCES

1. Bahvalov N.S. Numerical methods (analysis, algebra, ordinary differential expressions).[In Russian] – Moscow: Nauka, 1973. – 632 p.
2. Vasiliev F.P. Numerical methods of solving extremum problems.[In Russian] – Moscow: Nauka, 1988. – 552 p.
3. Korsun V.I. Using symmetry to parallelize seeking the extremum of goal function in design optimization and adaptive identification problems [In Russian] // Mathematical models and modern information technologies: Coll. of sc. papers of NAS of Ukraine, Institute of Mathematics. – Kyiv: 1998. – P. 66-68.
4. Korsun V.I., Zhyharev Yu.V., Galuta V.L. Enhancement of relaxation method in seeking global extremum of a function based on symmetry concept [In Russian] // Proceedings of the international conference “Mathematical problems of engineering mechanics”. – Dnipropetrovsk: Systemnietechnologii. – 2005. – P. 160.
5. Korsun V.I. Methods and systems of adaptive identification and control using symmetry principles.[In Russian]. – Dnipropetrovsk: Systemnietechnologii. – 1997. – 130 p.
6. Korsun V.I. Demidenko M.A. Study of the algorithm of goal function extremum seeking based on the use of symmetry and parallel space concept. [In Russian] // Naukovivisnyk NGAU. – 2000. - #2. – p.101-104.

Ye. Bodyanskiy, O. Boiko

EVOLVING MULTILAYER NEURO-FUZZY SYSTEM AND ITS LEARNING

Abstract. In this work a neuro-fuzzy system with all its parameters adjustment is proposed. It is used as a node of the evolving multilayer system. The system architecture can evolve in online mode as the synaptic weights, centers and widths parameters of the neuro-fuzzy nodes are adjusted improving approximation properties of the system.

Keywords: evolving system, computational intelligence, neuro-fuzzy system, multilayer neural network, data mining

Introduction

Nowadays hybrid systems of computational intelligence are widely used for solving different Data Mining tasks: pattern recognition, identification, emulation, etc. In practice it's a common situation when data come sequentially in online mode. This task is concerned by an intensively developing field, known as Dynamic Data Mining and Data Stream Mining [1]. The most effective systems for solving these tasks are evolving computational intelligence systems (ECIS) [2-6], that adjust their architecture during learning process. It should be noticed that the base of the majority of the known ECIS are multilayered neuro-fuzzy systems of TSK- and ANFIS-type [4-8].

Conventionally "learning" is defined as a synaptic weights adjustment process with the given learning criterion optimization. The quality of learning can be significantly improved by adjusting not only synaptic weights of the system but also its architecture, and in the case of NFSs – also its membership functions parameters.

In this paper an evolving multilayer neuro-fuzzy system is proposed. This system is trained using simple learning procedures and it adjusts all its parameters, improving its approximation properties.

The evolving multilayer neuro-fuzzy system architecture

The architecture of the evolving multilayer neuro-fuzzy system is shown in Figure 1. To the zero (receptive) layer of the system a

$(n \times 1)$ -dimensional vector of input signals $\mathbf{x}(k) = (x_1(k), x_2(k), \dots, x_n(k))^T$ is fed (here $k = 1, 2, \dots, N$ is either the current discrete time index or the observation number in training set). Then this vector is fed to the first hidden layer that contains $n_1 = c_n^2$ nodes, each having two inputs.

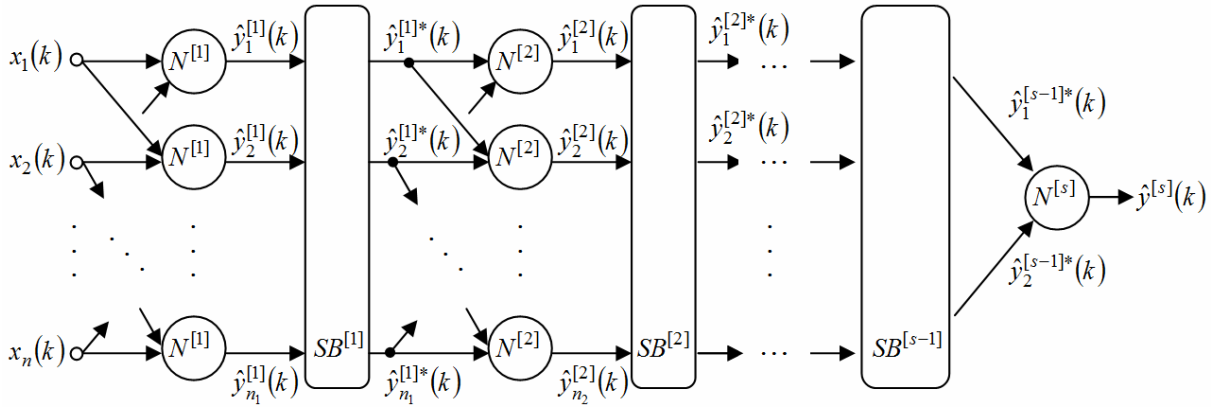


Fig. 1. Evolving multilayer neuro-fuzzy system

Among the output signals $\hat{y}_l^{[1]}(k)$ ($l = 1, 2, \dots, 0,5n(n-1) = c_n^2$) of the first layer nodes $N^{[1]}$ the selection block of the first layer $SB^{[1]}$ selects n_1^* ($n_1^* \leq n$) most precise signals in the sense of accepted criterion, usually by the mean squared error $\sigma_{y_l^{[1]}}^2$. Then from these n_1^* best outputs n_2 pairwise combinations $\hat{y}_l^{[1]*}(k), \hat{y}_p^{[1]*}(k)$ are formed (usually $n \leq n_2 \leq 2n$). These signals are fed to the second hidden layer, formed by nodes $N^{[2]}$, similar to the neurons $N^{[1]}$. Among the output signals $\hat{y}_l^{[2]}(k)$ of the second hidden layer the selection block of the second hidden layer $SB^{[2]}$ selects only signals that by accuracy are better than $\hat{y}_1^{[1]*}(k)$, i. e. that are better than the best signal of the first hidden layer. The third hidden layer forms signals that are more accurate than the best signal $\hat{y}_1^{[2]*}(k)$ and so on. The process of the system evolution continues until only two signals $\hat{y}_1^{[s-1]*}(k)$ and $\hat{y}_2^{[s-1]*}(k)$ are formed on the output of the selection block $SB^{[s-1]}$. These two signals are then fed to the single output node $N^{[s]}$, that calculates the output signal $\hat{y}^{[s]}(k)$ of the system.

Neuro-fuzzy network with all parameters adjustment as a node of the evolving multilayer system

The architecture of the node proposed as a neuron of the considered evolving multilayer system is shown in Figure 2.

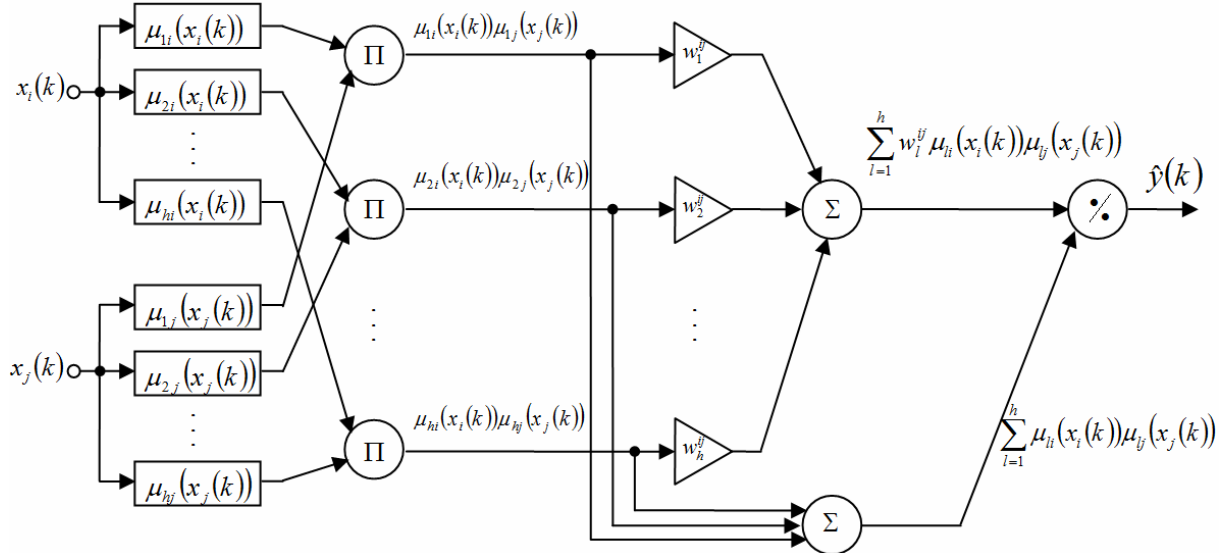


Fig. 2. Node of the evolving multilayer system

The node architecture is in fact a Wang–Mendel neuro-fuzzy system [30,31] with two inputs $x_i(k)$ and $x_j(k)$, five sequentially connected layers for information processing and one output $\hat{y}(k)$. To the input of node a two-dimensional vector of input signals $\mathbf{x}(k) = (x_i(k), x_j(k))^T$ is fed. The first layer of a node provides fuzzification of the input variables. The elements of the first layer compute membership levels $0 < \mu_{li}(x_i(k)) \leq 1$, $0 < \mu_{lj}(x_j(k)) \leq 1$, $l = 1, 2, \dots, h$. To avoid appearing of “gaps” in the fuzzified space while using scatter partitioning of input space [7] the bell-shaped constructions with non-strictly local receptive support are usually used as membership functions. Mostly the Gaussians are used as membership functions of the first layer

$$\mu_{li}(x_i(k)) = \exp\left(-\frac{(x_i(k) - c_{li}(k))^2}{2\sigma_{li}^2(k)}\right), \quad \mu_{lj}(x_j(k)) = \exp\left(-\frac{(x_j(k) - c_{lj}(k))^2}{2\sigma_{lj}^2(k)}\right), \quad (1)$$

where $c_{li}(k)$, $c_{lj}(k)$ are parameters that define the centers of the membership functions, $\sigma_{li}(k)$, $\sigma_{lj}(k)$ are width parameters of these functions.

The second layer contains h multiplication units and forms two-dimensional radial basis activation functions $\mu_{li}(x_i(k))\mu_{lj}(x_j(k))$. This

layer provides aggregation of the membership levels, that are computed in the first layer. Outputs of the second layer h are values

$$\tilde{x}_l(k) = \mu_{li}(x_i(k))\mu_{lj}(x_j(k)). \quad (2)$$

The third layer is one of synaptic weights that are adjusted during learning process. The number of the membership functions h on each input defines the number of weights. The outputs of the third layer are values

$$w_l^{ij} \mu_{li}(x_i(k))\mu_{lj}(x_j(k)) = w_l^{ij} \tilde{x}_l(k). \quad (3)$$

The fourth layer contains two summation units. In this layer the sums of the output signals of the second and the third layers are computed

$$\sum_{l=1}^h \mu_{li}(x_i(k))\mu_{lj}(x_j(k)) = \sum_{l=1}^h \tilde{x}_l(k), \quad \sum_{l=1}^h w_l^{ij} \mu_{li}(x_i(k))\mu_{lj}(x_j(k)) = \sum_{l=1}^h w_l^{ij} \tilde{x}_l(k). \quad (4)$$

Finally, in the fifth (output) layer normalization is realized and the output signal of node is computed

$$\begin{aligned} \hat{y}(k) &= \frac{\sum_{l=1}^h w_l^{ij} \mu_{li}(x_i(k))\mu_{lj}(x_j(k))}{\sum_{p=1}^h \mu_{pi}(x_i(k))\mu_{pj}(x_j(k))} = \frac{\sum_{l=1}^h w_l^{ij} \tilde{x}_l(k)}{\sum_{p=1}^h \tilde{x}_p(k)} = \sum_{l=1}^h w_l^{ij} \frac{\tilde{x}_l(k)}{\sum_{p=1}^h \tilde{x}_p(k)} = \\ &= \sum_{l=1}^h w_l^{ij} \phi_l^{ij}(\mathbf{x}(k)) = (\mathbf{w}^{ij})^T \boldsymbol{\phi}^{ij}(\mathbf{x}(k)), \end{aligned} \quad (5)$$

where $\boldsymbol{\phi}^{ij}(\mathbf{x}(k)) = (\phi_1^{ij}(\mathbf{x}(k)), \dots, \phi_p^{ij}(\mathbf{x}(k)))^T$, $\mathbf{w}^{ij} = (w_1^{ij}, \dots, w_h^{ij})^T$,

$$\phi_l^{ij}(\mathbf{x}(k)) = \mu_{li}(x_i(k))\mu_{lj}(x_j(k)) \left(\sum_{p=1}^h \mu_{pi}(x_i(k))\mu_{pj}(x_j(k)) \right)^{-1}.$$

The adjustment procedures for all parameters of the system

Considering that the reference signal $\hat{y}_s^{[1]}(k)$ of every node of the system depends linearly on the adjusted synaptic weights w_l^{ij} , for their adjustment we can use either the conventional least squares method, or its recurrent form. If training data is non-stationary, for weights adjustment it is reasonable to use the exponentially weighted recurrent least-squares method in the form

$$\begin{cases} \mathbf{w}^{ij}(k) = \mathbf{w}^{ij}(k-1) + \frac{\mathbf{P}^{ij}(k-1) \left(y(k) - \left(\mathbf{w}^{ij}(k-1) \right)^T \varphi^{ij}(\mathbf{x}(k)) \right) \varphi^{ij}(\mathbf{x}(k))}{\alpha + \left(\varphi^{ij}(\mathbf{x}(k)) \right)^T \mathbf{P}^{ij}(k-1) \varphi^{ij}(\mathbf{x}(k))}, \\ \mathbf{P}^{ij}(k) = \frac{1}{2} \left(\mathbf{P}^{ij}(k-1) - \frac{\mathbf{P}^{ij}(k-1) \varphi^{ij}(\mathbf{x}(k)) \left(\varphi^{ij}(\mathbf{x}(k)) \right)^T \mathbf{P}^{ij}(k-1)}{\alpha + \left(\varphi^{ij}(\mathbf{x}(k)) \right)^T \mathbf{P}^{ij}(k-1) \varphi^{ij}(\mathbf{x}(k))} \right) \end{cases} \quad (6)$$

(here $0 < \alpha \leq 1$ is forgetting factor, $y(k)$ is reference signal) or the exponentially weighted gradient learning algorithm for neuro-fuzzy systems [22]

$$\begin{cases} \mathbf{w}^{ij}(k) = \mathbf{w}^{ij}(k-1) + \left(\beta^{ij}(k) \right)^{-1} \left(y(k) - \left(\mathbf{w}^{ij}(k-1) \right)^T \varphi^{ij}(\mathbf{x}(k)) \right) \varphi^{ij}(\mathbf{x}(k)), \\ \beta^{ij}(k) = \alpha \beta^{ij}(k-1) + \left\| \varphi^{ij}(\mathbf{x}(k)) \right\|^2, 0 \leq \alpha \leq 1. \end{cases} \quad (7)$$

The centers and weights parameters adjustment can be realized using the gradient procedures of the learning criterion minimization

$$E_s^{[1]}(k) = \frac{1}{2} \left(y(k) - \mathbf{f}_s^{[1]}(k) \right)^2 = \frac{1}{2} \left(y(k) - \left(\mathbf{w}^{ij}(k) \right)^T \varphi^{ij}(\mathbf{x}(k)) \right)^2 \quad (8)$$

in the form

$$\begin{cases} c_{ri}(k) = c_{ri}(k-1) - \eta_c \frac{\partial E_s^{[1]}(k)}{\partial c_{ri}}, \\ \tilde{\sigma}_{ri}^2(k) = \tilde{\sigma}_{ri}^2(k-1) - \eta_\sigma \frac{\partial E_s^{[1]}(k)}{\partial \tilde{\sigma}_{ri}^2}, \end{cases} \quad (9)$$

where $r=1, 2, \dots, h$; η_c , η_σ are learning rates for the center and the width parameter correspondingly, $\tilde{\sigma}_{ri}^2(k) = -0,5 \sigma_{ri}^{-2}(k)$. It easy to see that

$$\begin{cases} \frac{\partial E_s^{[1]}(k)}{\partial c_{ri}} = \left(\left(\mathbf{w}^{ij}(k) \right)^T \varphi^{ij}(\mathbf{x}(k)) - y(k) \right) \sum_{l=1}^h w_l^{ij}(k) \frac{\partial \varphi_l^{ij}(\mathbf{x}(k))}{\partial c_{ri}}, \\ \frac{\partial E_s^{[1]}(k)}{\partial \tilde{\sigma}_{ri}^2} = \left(\left(\mathbf{w}^{ij}(k) \right)^T \varphi^{ij}(\mathbf{x}(k)) - y(k) \right) \sum_{l=1}^h w_l^{ij}(k) \frac{\partial \varphi_l^{ij}(\mathbf{x}(k))}{\partial \tilde{\sigma}_{ri}^2}. \end{cases} \quad (10)$$

The derivatives $\frac{\partial \varphi_l^{ij}(\mathbf{x}(k))}{\partial c_{ri}}$ and $\frac{\partial \varphi_l^{ij}(\mathbf{x}(k))}{\partial \tilde{\sigma}_{ri}^2}$ in Eq. (10) can be written

in the form

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial \varphi_l(\mathbf{x}(k))}{\partial c_{ri}} &= \frac{\delta_{lr} \sum_{p=1}^h \mu_{pi}(x_i(k)) \mu_{pj}(x_j(k)) - \mu_{li}(x_i(k)) \mu_{lj}(x_j(k))}{\left(\sum_{p=1}^h \mu_{pi}(x_i(k)) \mu_{pj}(x_j(k)) \right)^2} \mu_{rj}(x_j(k)) \frac{\partial \mu_{ri}(x_i(k))}{\partial c_{ri}}, \\ \frac{\partial \varphi_l(\mathbf{x}(k))}{\partial \tilde{\sigma}_{ri}^2} &= \frac{\delta_{lr} \sum_{p=1}^h \mu_{pi}(x_i(k)) \mu_{pj}(x_j(k)) - \mu_{li}(x_i(k)) \mu_{lj}(x_j(k))}{\left(\sum_{p=1}^h \mu_{pi}(x_i(k)) \mu_{pj}(x_j(k)) \right)^2} \mu_{rj}(x_j(k)) \frac{\partial \mu_{ri}(x_i(k))}{\partial \tilde{\sigma}_{ri}^2}, \end{aligned} \right. \quad (11)$$

where δ_{lr} is the Kronecker delta.

The derivatives $\frac{\partial \mu_{ri}(x_i(k))}{\partial c_{ri}}$ and $\frac{\partial \mu_{ri}(x_i(k))}{\partial \tilde{\sigma}_{ri}^2}$, defined on the base of

Eq. (1), can be written in the form

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial \mu_{ri}(x_i(k))}{\partial c_{ri}} &= \frac{x_i(k) - c_{ri}(k)}{\sigma_{ri}^2(k)} \exp\left(-\frac{(x_i(k) - c_{ri}(k))^2}{2\sigma_{ri}^2(k)}\right), \\ \frac{\partial \mu_{ri}(x_i(k))}{\partial \tilde{\sigma}_{ri}^2} &= (x_i(k) - c_{ri}(k))^2 \exp\left(-\frac{(x_i(k) - c_{ri}(k))^2}{2\sigma_{ri}^2(k)}\right). \end{aligned} \right. \quad (12)$$

In such a way we can adjust all synaptic weights, centers and width parameters of the membership functions of the first hidden layer nodes of the system. The nodes of next layers are adjusted similarly to the nodes of the first hidden layer but the node inputs of the s th layer are pairwise combinations of the signals $\hat{y}_l^{[s-1]*}, \hat{y}_p^{[s-1]*}$, formed by the selection block $SB^{[s-1]}$. The reference signal $y(k)$ is one for all elements of the evolving multilayer system.

Computational experiments

The efficiency of the proposed approach was demonstrated by solving the problem of the emulation of the dynamic object [32] that is described by the equation

$$y_p(k+1) = f(y_p(k), y_p(k-1), y_p(k-2), u(k), u(k-1)). \quad (13)$$

The emulation results are presented in Figure 3 (actual values are marked with dotted line, emulation results are marked with solid line).

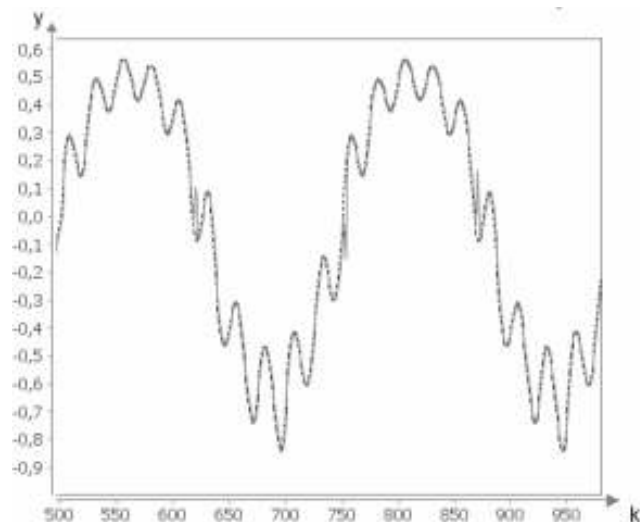


Fig. 3 – A fragment of the emulation results

The training set for the experiment was obtained using Eq. (12)

with control signals $f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = \frac{x_1 x_2 x_3 x_5 (x_3 - 1) + x_4}{1 + x_3^2 + x_2^2}$ and

$u(k) = 0.8 \sin(2\pi k / 250) + 0.2 \sin(2\pi k / 25)$. As the prediction quality criterion the mean squared error (MSE) was used. This experiment was carried out for several values of h . For $h=5$ the mean squared error is equal to 0,00175, for $h=10$ MSE=0,00120, for $h=20$ MSE=0,00115.

Conclusion

In the paper the neuro-fuzzy network with all its parameters adjustment is proposed as a node of the evolving multilayer system. The system architecture can evolve in online mode as the synaptic weights, centers and widths parameters of the proposed neuro-fuzzy nodes are adjusted.

REFERENCES

1. Angelov P. Evolving Rule-based Models: A Tool for Design of Flexible Adaptive Systems. – Heidelberg-New York: Springer-Verlag, 2002. – 213 p.
2. Kasabov N. Evolving Connectionist Systems. – London: Springer-Verlag, 2003. – 307 p.
3. Lughofer E. Evolving Fuzzy Systems – Methodologies, Advanced Concepts and Applications. – Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. – 454 p.
4. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control // IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics. – 1985. – 15. – P. 116-132.
5. Jang R. J.-S. ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy inference systems // IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics. – 1993. – 23. – P. 665-685.

6. Sugeno M., Kang G. T. Structure identification of fuzzy model // Fuzzy Sets and Systems. – 1998. – 28. – P. 15-33.
7. Jang R. J.-S., Sun C.-T., Mizutani E. Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence. – Upper Saddle River: Prentice Hall, 1997. – 640 p.
8. Osowski S. Sieci neuronowe do przetwarzania informacji. – Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2006. – 422 s.
9. Ivakhnenko A. G. Heuristic self-organization in problems of engineering cybernetics // Automatica. – 1970. – 6. – №2. – P. 207-219.
10. Ivakhnenko A. G. Polynomial theory of complex systems // IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics. – 1971. – 1. – №4. – P. 364-378.
11. Ивахненко А. Г. Самообучающиеся системы распознавания и автоматического управления. – Киев: Техніка, 1969. – 392 с.
12. Ивахненко А. Г. Долгосрочное прогнозирование и управление сложными системами. – Киев: Техніка, 1975. – 311 с.
13. Ивахненко А. Г., Степашко В. С. Помехоустойчивость моделирования. – Киев: Наукова думка, 1985. – 216 с.
14. Ivakhnenko A. G., Ivakhnenko G. A., Mueller J. A. Self-organization of the neural networks with active neurons // Pattern Recognition and Image Analysis. – 1994. – 4. – №2. – P. 177-188.
15. Ivakhnenko G. A. Self-organization of neuronet with active neurons for effects of nuclear test explosions forecasting // System Analysis Modeling Simulation. – 1995. – 20. – P. 107-116.
16. Ivakhnenko A. G., Wuensch D., Ivakhnenko G. A. Inductive sorting-out GMDH algorithms with polynomial complexity for active neurons of neural networks // Neural Networks. – 1999. – 2. – P. 1169-1173.
17. Pham D. T., Liu X. Neural Networks for Identification, Prediction and Control. – London: Springer-Verlag, 1995. – 238 p.
18. Kondo T. Identification of radial basis function networks by using revised GMDH-type neural networks with a feedback loop // Proc. of the SICE Annual Conference. – Tokyo, Japan, 2002. – P. 2882-2887.
19. Ohtani T. Automatic variable selection in RBF network and its application to neurofuzzy GMDH // Proc. Fourth Int. Conf. on Knowledge-Based Intelligent Engineering Systems and Allied Technologies. – 2000. – V.2. – P. 840-843.
20. Bodyanskiy Ye., Teslenko N., Grimm P. Hybrid evolving neural network using kernel activation functions // Proc. 17th Zittau East-West Fuzzy Colloquium. – Zittau/Goerlitz: HS, 2010. – P. 39-46.

21. Bodyanskiy Ye., Vynokurova O., Pliss I. Hybrid GMDH-neural network of computational intelligence // Proc. 3rd Int. Workshop on Inductive Modeling. – Krynica, Poland, 2009. – P. 100-107.
22. Zaychenko Yu. The fuzzy Group Method of Data Handling and its application for economical processes forecasting // Scientific Inquiry. – 2006. – 7. – №1. – P. 83-96.
23. Зайченко Ю. П. Нечеткие модели и методы в интеллектуальных системах. – К.: Издательский дом «Слово», 2008. – 344 с.
24. Ohtani T., Ichihashi H., Miyoshi T., Nagasaka K., Kanaumi Y. Structural learning of neurofuzzy GMDH with Minkowski norm // Proc. 1998 Second Int. Conf. on Knowledge-Based Intelligent Electronic Systems. – 1998. – V.2. – P. 100-107.
25. Bodyanskiy Ye., Zaychenko Yu., Pavlikovskaya E., Samarina M., Viktorov Ye. The neo-fuzzy neural network structure optimization using the GMDH for the solving forecasting and classification problems // Proc. Int. Workshop on Inductive Modeling. – Krynica, Poland, 2009. – P. 77-89.
26. Бодяньський Є.В., Винокурова О.А. Адаптивний вейвлон як вузол штучних МГУА-нейронних мереж // Моделювання та керування станом еколого-економічних систем регіонів. – Київ: МННLS ITC, 2008. – 4. – С. 19-29.
27. Bodyanskiy Ye., Vynokurova O., Teslenko N. Cascade GMDH-wavelet-neuro-fuzzy network // Proc. 4th Int. Workshop on Inductive Modeling «IWIM 2011». – Kyiv, Ukraine, 2011. – P. 22-30.
28. Bodyanskiy Ye., Vynokurova O., Dolotov A., Kharchenko O. Wavelet-neuro-fuzzy network structure optimization using GMDH for the solving forecasting tasks // Proc. 4th Int. Conf. on Inductive Modelling ICIM 2013. – Kyiv, 2013. – P. 61-67.
29. Bodyanskiy Ye. V., Vynokurova O. A., Dolotov A. I. Self-learning cascade spiking neural network for fuzzy clustering based on Group Method of Data Handling // J. of Automation and Information Sciences. – 2013. – 45. – №3. – P. 23-33.
30. Wang L.-X., Mendel J. M. Fuzzy basis functions, universal approximation, and orthogonal least-squares learning // IEEE Trans. on Neural Networks. – 1992. – 3. – №5. – P. 807-814.
31. Wang L.-X. Adaptive Fuzzy Systems and Control. Design and Statistical Analysis. – Upper Saddle River: Prentice Hall, 1994. – 256 p.
32. Narendra K. S., Parthasarathy K. Identification and control of dynamical systems using neural networks // IEEE Trans. on Neural Networks. – 1990. – 1. – P. 4-26.

А.Е. Кучеренко

ОПТИМИЗАЦИИ ТОПОЛОГИИ СТЕРЖНЕВОЙ СИСТЕМЫ И СТАТИСТИЧЕСКИЙ БУТСТРЭП ЕЕ ПАРАМЕТРОВ

Аннотация. В статье рассмотрено решение задачи выпуклой оптимизации топологии стержневой системы для случая, когда силы, воздействующие на конструкцию, заданы в виде статистических распределений. Предложенный метод позволяет определить доверительный интервал с заданным уровнем значимости для каждого рассчитываемого параметра системы.

Ключевые слова: топология, оптимизация, бутстрэп, распределение.

Введение

Рациональная схема любой системы во многом определяет ее эффективность и целесообразность - как с инженерной, так и с экономической точки зрения. Учитывая тот факт, что значительная доля расходов при строительстве приходится, как правило, на материалы [1], методы, позволяющие снизить их потребление при сохранении необходимых параметров, обеспечивающих выполнение технических требований к конструкции, являются важным пунктом на этапе проектирования.

Понятие «оптимизация» само по себе поднимает сразу множество вопросов, связанных с необходимостью одновременного выполнения противоречащих друг другу задач. Так, снижение веса конструкции зачастую сопровождается и снижением ее прочностных характеристик, что является нежелательным следствием. Более того, часто невозможно точно определить нагрузки, которым будет подвергаться конструкция, и при определении параметров такой системы нет единой стратегии.

Сами же методы оптимизации отличаются крайним разнообразием в своей реализации [2], и универсального подхода при решении комплексной оптимизационной задачи не существует. Так, в работах [3, 4] авторы успешно применяют генетические алгоритмы для оптимизации стержневых конструкций. А в [5, 6, 7] задача оптими-

зации стержневой системы представлена в виде выпуклой полуопределенной задачи математического программирования, которая имеет определенное преимущество перед другими формами - прежде всего, в эффективном вычислительном алгоритме, что позволяет решать проблемы большой размерности (в отличие от генетических алгоритмов, известных своей ресурсоемкостью).

Еще одна проблема, вскользь упомянутая выше, возникает, если неизвестны точные значения сил, воздействующих на конструкцию. Часто в такой ситуации используют либо средние значения, либо максимальные, что не может не сказаться на качестве решения. В этой статье предлагается подход, основанный на применении статистического бутстрэпа, который позволяет вычислить значения параметров стержневой системы с заданным уровнем статистической значимости. Сам же базовый метод оптимизации топологии стержневой системы основан на выпуклой - полуопределенной - форме оптимизационной задачи [8].

Выпуклая оптимизация топологии стержневой системы

Задачу оптимизации топологии стержневой системы в полуопределенной форме можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned}
 & \text{minimize}_{W,v} W \\
 & \text{s.t.} \sum_{i=1}^m v_i \leq V \\
 & v_i \geq 0 \forall i = 1 \dots m \\
 & \begin{pmatrix} W & F^T \\ F & \sum_{i=1}^m \frac{E_i v_i}{L_i^2} a_i a_i^T \end{pmatrix} \geq 0
 \end{aligned} \quad (1)$$

Тут W представляет собой верхнюю оценку величины энергии упругой деформации стержневой системы; v_i - объемы стержней, количество которых равно m ; F - внешние силы, приложенные к узлам конструкции; E - модули Юнга; L - длины стержней; a_i - i -й столбец матрицы уравнений системы A . Таким образом, оптимизационная задача сводится к поиску минимальной величины W при заданных ограничениях. Для простоты заранее условимся не рассматривать проблему устойчивости стержневой системы.

Очевидно, что форма записи оптимизационной задачи (1) пригодна для случая с точно определенными значениями внешних сил

Ф. Вместе с тем, во многих случаях внешние силы имеют вероятностную природу и требуют учета этой особенности при решении соответствующих задач. Например, сила, действующая на конструкцию, может быть задана в виде теоретической функции распределения (например, нормального) или же эмпирической функции распределения (рис. 1), построенного по выборке из наблюдений. В таком случае решение оптимизационной задачи (1) не может быть получено напрямую; более того, так как нас интересует не только топология проектируемой системы, но и параметры стержней, из которых она состоит, при наличии вероятностного компонента в исходных данных эти параметры также должны быть представлены в виде, допускающем вероятностную трактовку результата - например, в виде доверительного интервала с заданным уровнем значимости.

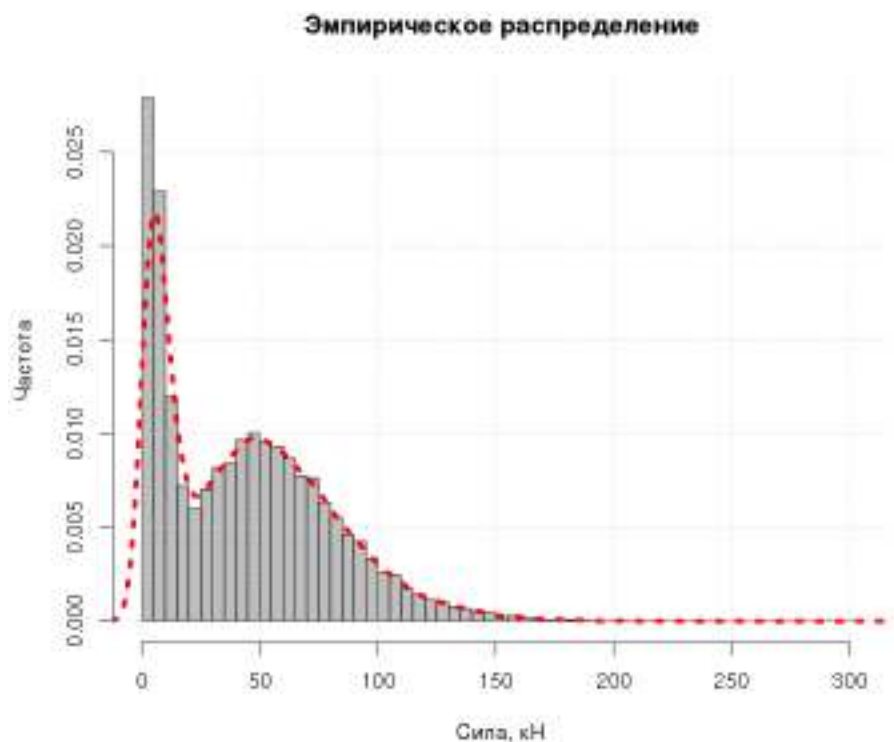


Рисунок 1 - Эмпирическая функция распределения нагрузки

Решение оптимизационной задачи осложняет и тот факт, что даже если и известны теоретические функции распределения внешних сил, воздействующих на стержневую систему, определение функций распределения параметров стержней остается нетривиальной задачей. Кроме того, сам поиск доверительного интервала для каждого вычисленного параметра существенно усложняется в случаях, когда теоретическое или эмпирическое распределение этого параметра не является нормальным (например, является мультимодальным), что не

позволяет использовать стандартный подход на основе распределения Стьюдента.

В данной ситуации для решения проблемы более всего подходит широко распространенная в статистике техника, известная как бутстрэп - «метод исследования распределения статистик вероятностных распределений, основанный на многократной генерации выборок методом Монте-Карло на базе имеющейся выборки» [9]. Такой подход позволит оценить различные параметры распределений исследуемых параметров стержневой системы - доверительные интервалы, дисперсии, другие моменты случайных величин.

В свете сказанного решение оптимизационной задачи (1) с использованием статистического бутстрэпа естественным образом разбивается на три этапа:

1. Сэмплирование из распределений, т.е. выбор случайных значений нагрузок из каждого изначально заданного распределения.

2. Решение оптимизационной задачи (1) для каждого набора случайно выбранных значений.

3. Формирование эмпирических распределений рассчитываемых параметров стержневой системы, использование бутстрэпа для определения доверительных интервалов с заданным уровнем значимости.

Оптимальный дизайн простейшей фермы для случая с нагрузкой, распределенной по нормальному закону

Рассмотрим простейшую конструкцию, полный граф которой изображен на рис.2. Узел 1 имеет шарнирно-неподвижную опору, узел 5 - шарнирноподвижную. К узлу 4 приложена направленная вниз сила F , распределенная по нормальному закону со средним значением 10^5 Н и среднеквадратическим отклонением равным $5 \cdot 10^3 \text{ Н}$ (рис. 3).

В таблице 1 приведены координаты узлов стержневой системы. При расчете модуль Юнга был принят равным $2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$, модуль сдвига $7.81 \cdot 10^{10} \text{ Па}$, расчетное сопротивление материала $2.1 \cdot 10^8 \text{ Па}$, коэффициент условий работы 0.9. При этом для упрощения примера использовалась сечение "круг". При решении оптимизационной задачи в среде Matlab с использованием пакета CVX [10] была получена топология, изображенная на рис. 4.

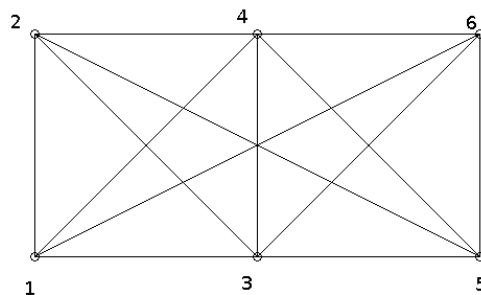


Рисунок 2 - Полный граф-прототип фермы

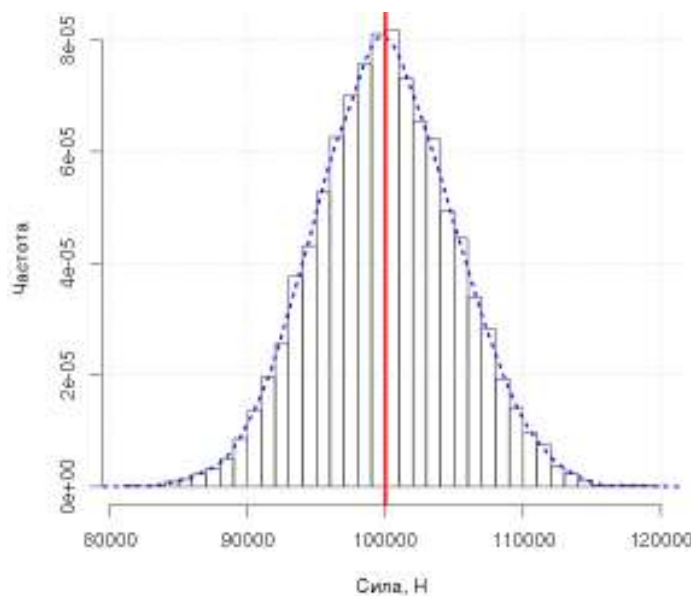


Рисунок 3 - Функция распределение силы, приложенной к узлу 4

Таблица 1

Координаты вершин графа

Вершина	1	2	3	4	5	6
Ось X	0	0	3	3	6	6
Ось Y	0	3	0	3	0	3

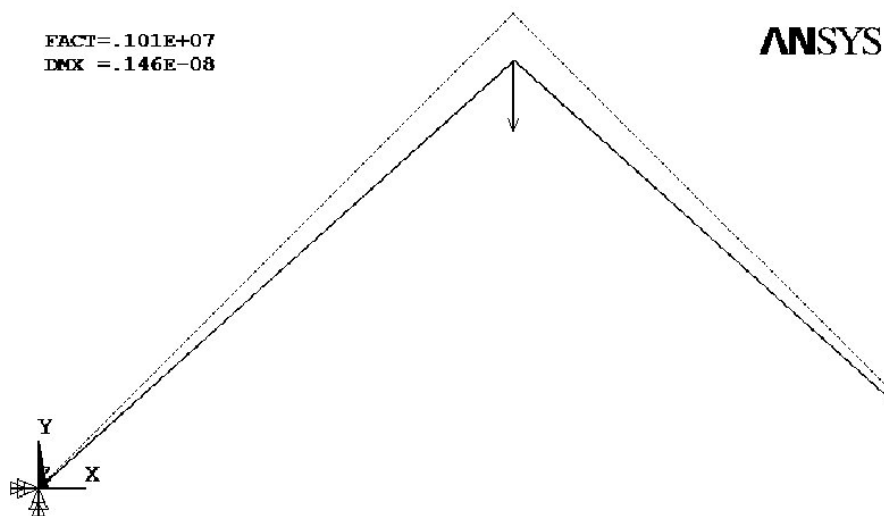


Рисунок 4 - Оптимальный граф простейшей фермы

Так как конструкция симметричная, то стержни 1-4 и 4-5 будут иметь одинаковые характеристики сечения. На рис. 5 представлена эмпирическая функция распределения площади сечения стержней 1-4 и 4-5. Полученный с помощью статистического бутстрапа 95% доверительный интервал для площади сечения равен $[3.78, 3.84] \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ (отмечен вертикальными линиями на рис. 5) со средним значением $3.81 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ и среднеквадратическим отклонением $1.89 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$.

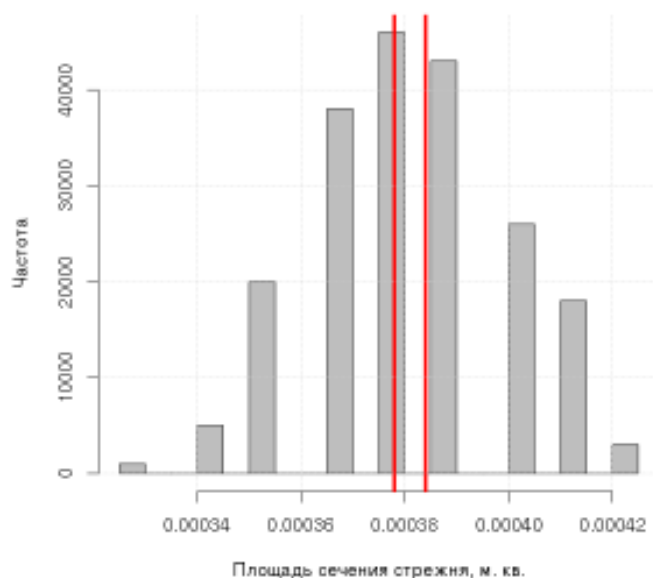


Рисунок 5 - Эмпирическая функция распределения площади сечения стержня

Заключение

В статье рассмотрен вопрос поиска оптимальной топологии стержневой системы с использованием полуопределенной оптимизации. При этом анализировался такой случай, при котором внешние силы, воздействующие на конструкцию, заданы в виде статистического распределения. Использование сэмплирования и бутстрэпа позволяет определить доверительные интервалы с заданным уровнем значимости для рассчитываемых параметров стержневой системы. Моделирование проводилось в среде Matlab с использованием пакета CVX.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беленя Е. И., Гениев А. Н., Балдин В. А. Металлические конструкции. – М.: Стройиздат, 1985.
2. Валуйских В.П. Статистические методы оптимального проектирования конструкций. - Владимир: Владим. гос. ун-т, 2001. - 156 с.
3. Серпик И. Н., Алексейцев А. В., Лелетко А. А. Генетические алгоритмы оптимизации металлических строительных конструкций. – Брянск: Изд-во БГИТА, 2010.
4. Woon, S. Y. Structural application of a shape optimization method based on genetic algorithm // Struct. Multidiscip. Optim. - 2001. - Vol. 22, no. 1. - P. 57-64.
5. Ben-Tal A., Nemirovski A. Robust truss topology design via semidefinite programming. SIAM Journal on optimization. – 1997. - Vol. 7, no. 4. - P. 991-1016.
6. M. Ohsaki, K. Fujisawa, N. Katoh. Semi-definite programming for topology optimization of trusses under multiple eigenvalue constraints. Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. - 1999. - Vol. 180, no. 1-2. - P. 203-217.
7. Кучеренко А.Е. Оптимизация топологии стержневых систем и их устойчивость // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 4(99). - Днепропетровск, 2015. - С.23-30.
8. Bendsoe M. P., Sigmund O. Topology Optimization: theory, methods and applications. - Berlin: Springer, 2003. - 370 p.
9. https://uk.wikipedia.org/wiki/Статистичний_бутстреп
10. Michael Grant and Stephen Boyd. CVX: Matlab software for disciplined convex programming, version 2.0 beta. <http://cvxr.com/cvx>, September 2013.

СИСТЕМА ВЫБОРА ПРИОРИТЕТОВ ПРИ ПРИНЯТИИ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Анотація. У статті представлена основа загальної концепції управління ризиками різного походження, що розробляється авторами. Розглядається довільний об'єкт, що підпадає під внутрішні та зовнішні небезпеки. Визначено поняття ризику, як розмірної одиниці, показано, що ризики різного походження найбільш доцільно відображати у грошовому еквіваленті. Наведені умови оптимального управління технічними, економічними, соціальними, екологічними та іншими ризиками в умовах обмеженості ресурсів для захисту об'єкту від небезпек. Всі технічні, економічні та організаційні засоби захисту – бар'єри безпеки також розглядаються як одиниці з розмірністю у грошовому еквіваленті. Наведено наочне графічне зображення технології розподілу ресурсів для захисту об'єкту та способи його використання.

Ключові слова: ризик, управління ризиками, збиток, бар'єри безпеки, грошовий еквівалент, дуельний захист, розподіл ресурсів захисту.

Введение

Проблематика работы состоит в насущной необходимости разработки способа быстрого и качественного распределения свободных материальных, технических, людских ресурсов, займов, инвестиций и прочих движимых активов с целью повышения вероятности устойчивого развития объекта и минимизации риска незапланированных затрат на компенсацию ущерба от случайных неблагоприятных событий. Частоту и интенсивность случайных событий сложно предвидеть, поэтому при составлении бизнес-планов разработчики закладывают обычно в смету некоторый "тревожный" запас, который нередко значительно повышает себестоимость продукции, оставаясь при этом невостребованным. В условиях рыночной, а тем более кризисной экономики, роль достоверного планирования многократно возрастает. Это вызывает необходимость освоения, а главное использования со-

временных методов оценки рисков во всех отраслях хозяйственной деятельности и оперативной разработки мер противодействия опасностям различной природы.

На сегодняшний день в арсенале общества имеется мощный, но достаточно сложный математический аппарат - совокупность методов решения логических задач, получившее название "теория управления рисками". Этот аппарат пока используется только для обеспечения безопасности в некоторых опасных технических объектах и процессах (атомная энергетика, авиа- и ракетостроение).

Несколько в упрощенной форме элементы управления рисками используется в экономике (кредитование, страхование). Однако при некоторой модернизации и обобщении разнородных понятий концепция управления рисками может быть применена к любой сфере человеческой деятельности.

Анализ последних исследований по теме

Публикаций, касающихся преимуществ риск ориентированного подхода к решению проблем защиты объекта в последнее время достаточно много во всём мире. К сожалению, большинство из них носит либо чисто теоретический характер, либо имеет узкую специфическую направленность, связанную с особенностями объекта защиты. Работы авторов данной статьи ([1,2] и другие) также до сих пор касались отдельных сфер деятельности человека, но в них авторы всё же стремились к обобщению накопленного во многих совершенно различных отраслях материала по прогнозированию рисков.

Официальный документ [3] - единственный в Украине, в котором риск определяется как вероятность неблагоприятного события с учётом ожидаемых последствий. Только при этом риск, как и сама вероятность, остаётся безразмерной величиной и не ясно каким образом следует учитывать последствия.

Следует отметить серию работ проф. Бегуна и др. [4,5,6], в которых впервые доказана возможность универсализации риск ориентированного подхода к различным отраслям человеческой деятельности и очерчен круг задач, которые необходимо решить для этой цели.

В отчётах МАГАТЭ (например, [7]) описан подход к прогнозированию ущерба и впервые выдвинута концепция стоимостной оценки ущерба любого вида, в том числе и подход к оценке стоимости жизни и здоровья человека.

Постановка задачи

Основной целью данной работы является адаптация терминологии риск ориентированного подхода, идей и способов управления рисками к любым сферам человеческой деятельности. Для этого необходимо чётко определиться с самим понятием "риск" и разработать универсальную методику его количественной оценки. Это позволит сравнивать по абсолютной величине риски различной природы, без чего невозможно эффективное управление рисками.

Дополнительной целью является выработка векторов дальнейших исследований, направленных на создание чёткого математического аппарата, исключающего или минимизирующего человеческий фактор при принятии управленческих решений.

Феноменологическая концепция системы принятия решений

Риски, с которыми сталкивается человек в разных областях своей жизнедеятельности, обычно имеют под собой основу в виде определенных факторов опасности природного, техногенного или социально-экономического характера. В общепринятом понимании риск рассматривается как потенциальный ущерб, возникающий с определённой вероятностью при том или ином неблагоприятном событии. Вместе с тем, возможности противодействия факторам риска на конкретном объекте всегда ограничены объёмом свободных материальных и людских ресурсов или инвестиций. Таким образом, возникает необходимость разработки универсальной технологии распределения ресурсов, которая минимизировала бы суммарный ущерб для объекта, исходящий от опасностей самой разной природы.

Далее, по аналогии с [3, 4, 5] под термином "риск" будем понимать произведение вероятности неблагоприятного события на ожидаемый ущерб. При этом, риск является размерной величиной (поскольку вероятность есть безразмерная величина, то единицы измерения ущерба и риска тождественны). Здесь сразу возникает вопрос: каким образом можно сравнивать риски разной природы, предполагающие последствия (ущербы) различного характера. Например, неблагоприятное событие - дорожно-транспортное происшествие. Объектом в данном случае являются само автотранспортное средство, водитель, пассажиры и имущество, находящееся внутри. При этом в ожидаемый ущерб войдут: затраты на восстановление автотранспортного средства и имущества, потеря времени участников ДТП на оформле-

ние необходимых документов, нарушение здоровья участников ДТП и т.п. Различные научные школы самого разного профиля по-разному решают эту задачу. Наиболее просто и достоверно, на наш взгляд, ущерб любой природы приводить к соразмерным единицам, отражающим материальные затраты на восстановление всех качеств объекта и компенсацию невозможных потерь.

Принимая такой подход к определению риска можно расширить понятие объекта защиты (далее - объект) на любые материальные и нематериальные сущности, причинение ущерба которым нежелательно. Например, в качестве объекта может выступать человек, как биологическое существо, коллектив людей, техническое устройство или процесс, природный ландшафт, предприятие, коммерческая сделка, страховой договор, населённый пункт, государство и т.д.

Вероятность события и ожидаемый ущерб в большинстве случаев могут быть оценены статистическим, расчётным или экспертным методом. Например, суммарный ущерб от описанного выше события может быть выражен как сумма денежных затрат на восстановление автотранспортного средства, финансовых потерь в связи с невозможностью выполнения поставленных задач и затрат на восстановление здоровья. Вероятность же самого ДТП может быть оценена по статистическим данным ГАИ с учётом напряжённости дорожного движения, погодных условий, квалификации участников ДТП и т.п. Более точно оценить вероятность события можно путём анализа причинно-следственных связей - построения дерева событий-предшественников и условий внутри и вне объекта, связанных между собой логическими цепочками "И", "ИЛИ" по аналогии с [6].

Безусловно, на вероятность события и величину ущерба влияют и меры противодействия опасностям, предпринимаемые по отношению к объекту (т. наз. барьеры безопасности), которые по своей сущности также могут иметь различный вид - технический, организационный, экономический. Создание этих барьеров требует определённых затрат ресурсов объекта (инвестиций), которые также могут быть выражены в денежной форме. В условиях ограничения ресурсов встаёт задача их оптимального распределения на количество и качество барьеров безопасности. При этом общие принципы такого распределения следующие:

1) Общая сумма инвестиций в безопасность объекта не должна превышать некоторой запланированной величины;

2) Распределение ресурсов должно обеспечивать минимизацию (оптимизацию) суммарного риска;

3) Сумма затрат на противодействие каждому источнику риска не должна превышать соответствующей величины прогнозируемого ущерба;

4) Конечное значение суммарного риска (риска после внедрения защитных барьеров) не рационально уменьшать ниже уровня приемлемости.

Таким образом, для каждого из факторов риска можно построить дуэльную схему, где на находящийся в центре объект защиты действует с одной стороны тот либо иной фактор риска, а с другой - барьер безопасности. Говоря же о моделировании результирующего суммарного риска элементарные риски и барьеры безопасности можно выразить в виде векторов $R=[R_1, R_2, R_3, \dots, R_n]$ и $B=[B_1, B_2, B_3, \dots, B_n]$, соответственно. В соответствии с вышепринятой терминологией - $R_i = P_i \cdot U_i$ - элементарный риск (произведение вероятности P на ущерб U), B_i - парциальные затраты на создание соответствующего барьера безопасности. В этих обозначениях приведенные выше принципы могут быть переписаны в виде:

$$\begin{aligned} 1) & B_i \leq M \\ 2) & \sum (\partial R_{1i} / \partial B_i) = 0 \\ 3) & B_i \leq R_i \\ 4) & \sum R_{1i} \geq R_{min} \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь символом M обозначен предел выделяемых ресурсов, R_1 - результирующее значение суммарного риска - риска после внедрения барьеров безопасности, R_{min} - приемлемый риск.

Удобно все неблагоприятные события, приводящие к ущербам различного вида считать независимыми. Тогда применение предлагаемой концепции удобно изобразить в графическом виде (рис.1). На рисунке окружностью обозначен защищаемый объект, а векторами R_i и B_i соответственно риск и барьер безопасности. Угловая величина сектора ϕ_i соответствуют вероятности неблагоприятного события, а радиус окружности r - запасу собственных и заёмных материальных ресурсов M , предназначенных для защиты объекта.

В таких терминах риск R_i может быть представлен следующим образом:

$$R_i = \phi_i \cdot U_i \quad (2)$$

А сумма инвестиций по защите объекта от i -го фактора:

$$B_i = (\phi_i / 2\pi) \cdot M \quad (3)$$

С учётом же эффективности средств защиты (обозначим эту величину ψ), снижение риска от i -го фактора и конечное значение риска по этому фактору может быть записано в виде:

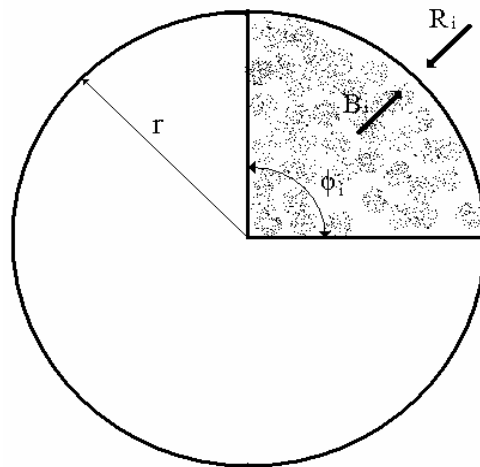


Рисунок 1.- Схема дуэльной ситуации риск - барьер безопасности

R_i и B_i - соответственно риск и барьер безопасности, r - условная величина запаса ресурсов, ϕ_i - условная вероятность неблагоприятного события

$$\Delta R_i = \psi_i \cdot R_i = \psi_i \cdot M \cdot (\phi_i / 2\pi)$$

$$R_{1i} = R_i - \Delta R_i = \phi_i \cdot (U_i - \psi_i M / 2\pi) \quad (4)$$

Вопрос о конкретном значении величины ψ вынесем за рамки этой статьи, т.к. этот вопрос является отдельной задачей, требующей детального анализа.

Соотношение между величиной угла ϕ и вероятностью события P можно выбрать произвольным. Наиболее удобны в этом плане два варианта: 1) угол принимается таким, чтобы его отношение к величине 2π в точности соответствовало бы вероятности; 2) все учитываемые риски распределены последовательно по полярной координате ϕ , так, чтобы полностью занять плоский угол 2π . В первом случае:

$$\phi_i = 2\pi P_i, \text{ а во втором:}$$

$$\phi_i = 2\pi k P_i, \quad (5)$$

где $k = 1 / \sum P_i$

Пример такого построения построения приведен на рисунке 2.

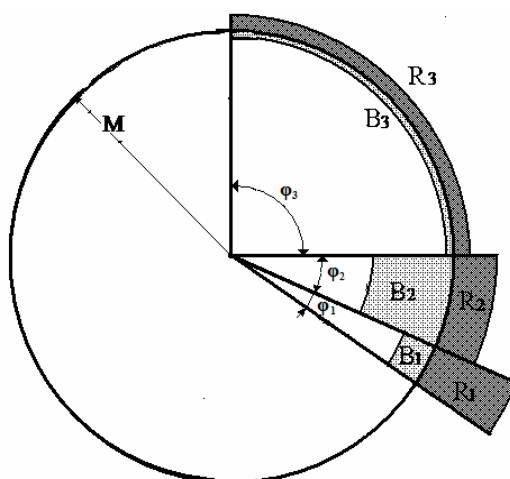


Рисунок 2 - К методике построения расчётной диаграммы
Обозначения – по тексту.

На рисунке риски и барьеры безопасности изображены кольцевыми секторами. Снаружи окружности изображены риски, значение которых пропорционально произведению угла φ на толщину сектора. Внутри окружности – барьеры безопасности, затраты на которые пропорциональны толщине сектора в масштабе, равном масштабу располагаемых ресурсов M . Если известны эффективности использования средств защиты ψ то этот рисунок можно перестроить, построив внутреннее сектора для величины ΔR_i . Дальнейшие процедуры сложностей не представляют. Определяются согласно (4) значения R_{1i} и векторно решается второе уравнение системы (1).

Следует отметить, что во многих случаях риск ориентированный подход в качестве экстенсивной величины при оценке риска использует не вероятность неблагоприятно события, а некоторую субъективную «значимость», назначаемую экспертами, или руководителем. Предложенная схема может работать и в таких условиях, если расчётные значения вероятностей домножить на коэффициенты значимости.

Выводы

Предложенная концепция управления ресурсами для обеспечения защиты объектов от рисков обладает чертами универсальности, проста в осуществлении и позволяет с одной стороны сократить суммарный риск до минимально возможной величины, а с другой – с максимальной пользой использовать финансовые, материальные,

людские и прочие ресурсы. Развитие этой концепции возможно в нескольких направлениях.

Во-первых, барьеры безопасности делятся на интенсивные и экстенсивные (уменьшающие ущерб, или вероятность неблагоприятного события). Необходимо внести коррективы в расчётную схему, учитывающие конкретный тип барьера. Во-вторых, Возможно использование «многослойных барьеров», Степень эффективности которых можно определить по известным из физики законам поглощения многослойных экранов.

Для полного замыкания системы уравнений необходимо сосредоточить усилия на выработке подходов к оценке значения эффективности использования ресурсов. Это и является перспективной целью исследований авторского коллектива.

ЛИТЕРАТУРА

1. Добреля В.П. Математична модель вартості системи інтегральної безпеки // Матеріали III Всеукраїнської НМК "БЖД-2004". - Рівне, 2004.
2. Мелікаев Ю.М., Добреля В.П., Тарасенко Ю.В. Модель збалансованого розвитку екосистем в умовах антропогенних трансформацій.// Матеріали міжнародної наукової конференції "Природні та антропогенно трансформовані екосистеми прикордонних територій у постчорнобильський період". - Чернігів, 2014.
3. ДСТУ 2293-99 Охорона праці. Терміни та визначення основних понять.
4. В.В. Бегун, І.М. Науменко. Безпека життєдіяльності. - Київ, 2004.
5. Меликаев Ю.Н., Добреля В.П., Тарасенко Ю.В. Риск ориентированная модель выбора приоритетов инвестирования в развитие объекта// Економічні студії. – 2015, №1
6. Бегун В.В., Горбунов О.В., Каденко И.Н. Вероятностный анализ безопасности атомных станций. - Киев, 2000.
7. Серия изданий по безопасности МАГАТЭ, №75 - INSAG - Вероятностный анализ безопасности МАГАТЭ. - Вена, 1994.

СОДЕРЖАНИЕ

Krasnikov K.S., Samokhvalov S.E., Pipyuk V.P.

The mathematical model of the cored wire injection in the molten steel during blowing on the ladle-furnace 4

Чмырков К.Ф., Сигарев Е.Н., Молчанов Л.С., Синегин Е.В.

Исследование теплофизических свойств карбидокремниевых железосодержащих брикетов..... 15

Осовик В.М.

Удосконалення методів автоматизованого управління процесами експлуатації парків залізничних технічних систем 21

Бойко М.Н.

Аналіз взаємних зв'язків між окремими характеристиками процесу обпалу окатишів 33

Полякова Н.В.

Формування якісних окатишів сумісним впливом температури їх обпалу та швидкості газового обдуву 40

Свинаренко Д.М.

Методи обробки багатоспектральних растрових зображень на основі ортогоналізації даних 46

Михалев А.И., Стенин А.А., Пасько В.П., Солдатова М.А.

Идентификация линейных квазистационарных систем на базе сплайн-функций и функций Уолша 53

Белая Е.В.

Исследование влияния коррозии на механические свойства колес... 61

Внуков А.А., Головачев А.Н.

Влияние типа дисперсных частиц на электроосаждение и свойства композиционных никелевых покрытий..... 68

Трегубенко Г.Н.

Моделирование процесса усвоения азота жидкой сталью из карбамидсодержащих лигатур с целью разработки эффективной технологии их применения 76

Kyrylovych V.A., Morgunov R.S.

Kinematics problems of industrial robots' grippers interaction with objects of manipulation..... 85

Маникаева О.С., Арсирый Е.А., Василевская А.П.

Машинное обучение самоорганизующегося слоя кохонена в системах нейросетевого распознавания образов по статистической информации 93

Рожков С.А. Построение систем распознавания образов с использованием нейросетевых структур	106
Мяновская Я.В., Пройдак Ю.С., Бабенко А.В., Камкин В.Ю. Гидродинамика и теплообмен капель металла при движении в слое шлака.....	115
Жуковицкий И.В., Егоров О.И. Идентификация поездов в информационных системах железнодорожного транспорта	123
Коваленко И.И., Антипова Е.А., Устенко С.А. Выбор решений с применением теории Дезера-Смарандаке в условиях наличия сложных неопределенностей.....	132
Pokuda E.U., Korsun V.I. Method of assessing competence of experts diagnosing basic blocks of quarry dumptrucks	140
Пилипенко С.В., Григоренко В.У. Изменение геометрических размеров поперечного сечения ручья калибров станов ХПТ под влиянием теплового расширения при безэмульсионной прокатке	146
Kharlamova Y.N., Korsun V.I. Study of the process of seeking global extremum of function by symmetric algorithms with parallel space	151
Bodyanskiy Ye., Boiko O. Evolving multilayer neuro-fuzzy system and its learning.....	161
Кучеренко А.Е. Оптимизации топологии стержневой системы и статистический бутстрэп ее параметров	170
Меликаев Ю.Н. Система выбора приоритетов при принятии управленческих решений	177

РЕФЕРАТЫ

УДК 531.314.2+536.242+532.516.5+519.683.2

Красников К.С., Самохвалов С.Е., Пиптюк В.П. Математическая модель усвоения порошковой проволоки в расплаве стали во время продувания на установке ковш-печь // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (100). - Днепропетровск, 2015. - с.4 - 14.

Построена математическая модель производственного процесса. В модели учтены: трехмерное движение проволоки, одномерное плавление проволоки с появлением корки, трехмерное движение расплава стали с порошковым усреднением в нем. Математическая модель реализована в компьютерной программе для проверки качества и вычислительных опытов.

Библ. 10, ил. 4.

УДК 669.184

Чмирков К.Ф., Сігарев Є.М., Молчанов Л.С., Синегін Є.В. Дослідження теплофізичних властивостей карбідокремнієвих брикетів, що містять залізо // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (100). - Днепропетровск, 2015. - с.15 - 20.

Наведені результати експериментального дослідження впливу хімічного складу брикетів карбідокремнієвих, що містять залізо, на їх теплофізичні властивості. На підставі отриманих відомостей побудована математико-статистична модель залежності коефіцієнта теплопровідності від температури та складу брикету. Визначено раціональний склад брикетів карбідокремнієвих, що містять залізо. Виходячи з аналізу фізико-механічних властивостей, відображено можливість використання розроблених брикетів у сталеплавильному виробництві.

Бібл. 11, іл. 2, табл. 2.

УДК 681.3.07

Осовик В.Н. Совершенствование методов автоматизированного управления процессами эксплуатации парков железнодорожных технических систем // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (100). - Днепропетровск, 2015. - с.21 - 32.

Усовершенствованы методы по созданию интеллектуальной автоматизированной системы, которая обеспечивает многокритериальное управление процессами эксплуатации парков железнодорожных технических систем (электрических двигателей) на основе получения, диагностирования и прогнозирования значений параметров их текущего состояния,

Библ. 9, ил. 3.

УДК 622.785

Бойко М.Н. Анализ взаимных связей между отдельными характеристиками процесса обжига окатышей // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (100). - Днепропетровск, 2015. - с.33 - 39.

В статье представлены результаты моделирования работы зон сушки, подогрева и обжига конвейерной машины для обжига окатышей. Установлено, что при наличии остаточной влаги в окатышах развитие процессов окисления магнетита и диссоциации известняка значительно замедляется в результате чего скажется конечное качество окатышей и производительность процесса обжига.

Библ. 8, ил. 2, табл. 1.

УДК 622.785

Полякова Н.В. **Формирование качественных окатышей совместным влиянием температуры их обжига и скорости газового обдува** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (100). - Днепропетровск, 2015. - с.40 - 45.

В статье показаны результаты моделирования работы зон обжига и охлаждения конвейерной машины для обжига окатышей при изменении температуры обжига и скорости газового потока. Установлено, что при увеличении скорости газового потока зона максимальных температур распространяется на большую глубину, при этом уменьшается перепад температуры по высоте, за счет чего выравнивается качество окатышей для всего слоя.

Библ. 7, ил. 1, табл. 1.

УДК 528.8:004

Свинаренко Д.М. **Методи обробки багатоспектральних растрових зображень на основі ортогоналізації даних** / Д.М. Свинаренко // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (100). - Днепропетровск, 2015. - с.46 - 52.

Розглянуто методи ортогоналізації багатоспектральних даних дистанційного зондування Землі (головних компонент, Грама-Шмідта, QR-перетворення, сингулярного перетворення). На їх основі запропоновано метод підвищення просторової роздільної здатності зображень, отриманих одночасно у декількох спектральних діапазонах.

Бібл. 10, іл.5, табл. 2

УДК 615.071

Михальов О.І., Стенін О.А., Пасько В.П., Солдатова М.О. **Идентификация линейных квазистационарных систем на базе сплайн-функций и функций Уолша** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (100). - Днепропетровск, 2015. - с.53 - 60.

У даній статті для параметричної ідентифікації квазістаціонарних систем пропонується підхід, який базується на спільному використанні сплайн-функцій і функцій Уолша. Алгоритм оцінювання параметрів лінійної квазістаціонарної системи зведено до розв'язування n систем лінійних алгебраїчних рівнянь на кожному з інтервалів сталості параметрів. В силу наближеного задання коефіцієнтів матриць сплайн-функціями, стійкість розв'язку отриманих систем лінійних алгебраїчних рівнянь забезпечується методом регуляризації А. М. Тихонова. Практична реалізація даного підходу показана на прикладі квазістаціонарної системи. Для покращення точності оцінки запропоновано

адаптивний алгоритм розбиття інтервалу спостереження. Даний підхід може бути узагальнений на лінійні динамічні системи з розподіленими параметрами.

Бібл. 6, іл. 2

УДК 620.197

Белая Е.В. **Исследование влияния коррозии на механические свойства колес** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (100). - Днепропетровск, 2015. - с.61 - 67.

Проведен анализ современных материалов для защиты железнодорожных колес от коррозионных повреждений и разработать систему защиты поверхностей железнодорожных колес, которая может быть использована при хранении колес на складах и припортовых зонах, транспортировке морскими и сухопутными путями, а также при эксплуатации.

Библ.9, Рис.2, Таб.3.

УДК 620.22:419.8(063)

Внуков О.О. **Вплив типу дисперсних частинок на електроосадження і властивості композиційних нікелевих покриттів** / О.О. Внуков, А.М. Головачов // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (100). - Днепропетровск, 2015. - с.68 - 75.

Вивчено закономірності впливу різних типів дисперсних добавок, а саме Al_2O_3 , MoS_2 и SiC , на корозійну стійкість і зносостійкість нікелевих композиційних електролітичних покриттів. Визначено оптимальні концентрації дисперсних добавок, а також вид добавки, що забезпечують максимальний рівень експлуатаційних характеристик покриттів. Установлено можливість застосування різних типів дисперсних частинок для підвищення зносостійкості нікелевих покриттів при збереженні їхньої корозійної стійкості.

Бібл. 9, іл. 3, табл. 3.

УДК 669.168:669.18

Трегубенко Г.М. **Моделирование процесса засвоения азота рідкою сталлю з карбамідвмісних лігатур з метою розробки ефективної технології їх застосування** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (100). - Днепропетровск, 2015. - с.76 - 84.

На підставі системного моделювання визначено які технологічні чинники і як впливають на асиміляцію азоту рідкою сталлю з карбамідвмісних лігатур. Це дозволяє розробити ефективну технологію застосування нових лігатур для виробництва сталей з карбонітридним зміцненням.

Бібл. 8.

УДК 621.01(06)

Кирилович В.А., Моргунов Р.С. **Задачі кінематики при взаємодії схватів промислових робіт з об'єктами маніпулювання** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (100). - Днепропетровск, 2015. - с.85 - 92.

Запропоновано евристичний алгоритм послідовності розв'язування задач кінематики, що придатний для автоматизованого пошуку запропонованих раніше

параметрів геометрично-силових та траєкторно-динамічних задач взаємодії схватів промислових роботів з об'єктами маніпулювання, що є складовими автоматизованного синтезу роботизованих механоскладальних технологій в механоскладальних гнучких виробничих комірках.

Бібл. 10, іл. 5.

УДК 004.519.217

Манікаєва О.С., Арсірій О.О., Васілевська О.П. **Машинне навчання прошарку Кохонена в системах нейромережевого розпізнавання образів за статистичною інформацією** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (100). - Днепропетровск, 2015. - с.93 - 105.

При побудові систем нейромережевого розпізнавання образів для прийняття рішення про стан виробничого або соціального середовища за статистичною інформацією запропоновано використовувати методику машинного навчання на основі кластеризації вхідного набору ознак, яка передбачає послідовне виконання процедур самоорганізації нейронів обчислювального шару Кохонена, градування елементів вихідного вектора навчальної вибірки і остаточного маркування нейронів обчислювального шару Кохонена.

Бібл. 8.

УДК 004.931

Рожков С. А. **Построение систем распознавания образов с использованием нейросетевых структур** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (100). - Днепропетровск, 2015. - с.106 - 114.

Рассмотрена задача распознавания оптических образов при неопределенности условий предъявления входных образов и возмущений в пространстве оригинала. В основе работы положен метод компенсации входных информационных потоков. Основная проблема метода заключается в реализации входного преобразователя информации, позволяющего судить о соответствии входного сигнала эталонному. Показано, что в качестве датчика в системе возможно использование нейронной сети с входным сигналом, модулирующим матрицу весов, при этом входной вектор генерируется как строка эталона.

Библ. 7, илл. 5.

УДК 669.15.74-198: 536.755

Мяновського ЯВ., Пройдак Ю.С., Бабенко А.В., Камкін В.Ю. **Гідродинаміка і теплообмін крапель металу при русі в шарі шлаку** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (100). - Днепропетровск, 2015. - с.115 - 122.

Проведений аналіз результатів матеріальних і теплових балансів виплавки марганцевих феросплавів показує, що з відвальними шлаками втрачається 5-8% феросплавів у вигляді запуставшихся корольків. Інтенсивність масообміну між краплею металу і шлаком пов'язана з режимом руху краплі і кінетичними характеристиками фаз, що знаходяться у взаємодії. Доведено, що незалежно від початкової температури крапель металу, за час їх осадження в шлаку вони набувають температуру шлаку.

Бібл. 8.

УДК 629.4.066:656.259.13

Жуковицкий И.В., Егоров О.И. **Идентификация поездов в информационных системах железнодорожного транспорта** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (100). - Днепропетровск, 2015. - с.123 - 131.

Построение информационно-управляющих систем, как в пределах станции, так и на прилегающих к ней путях, тесно связаны с системами идентификации. В работе рассматривается метод идентификации, определяющий статические характеристики вагонов поезда и поезда в целом с использованием железнодорожной автоматики и информационных систем верхнего уровня. Для апробации метода идентификации используется имитационное моделирование. На основании анализа результатов имитационного моделирования разработанный метод идентификации поездов с использованием ТГНЛ показал высокую надежность и правильность работы.

Библ. 8, илл. 1, табл. 0.

УДК 519.6

Коваленко И.И., Антипова Е.А., Устенко С.А. **Выбор решений с применением теории Дезера-Смарандаке в условиях наличия сложных неопределенностей** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (100). - Днепропетровск, 2015. - с.132 - 139.

Рассмотрены различные виды НЕ-факторов и причины их появления, а также основные положения теории Дезера-Смарандаке. Приведен пример, который демонстрирует возможности этой теории. Построены свободная и гибридная модели, рассмотрены их достоинства и недостатки.

Библ. 8, илл. 1.

УДК 621.317

Прокуда Э.Ю. **Оценка компетентности экспертов, осуществляющих диагностирование базовых элементов карьерных автосамосвалов** // Прокуда Э.Ю., Корсун В.И. // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (100). - Днепропетровск, 2015. - с.140 - 145.

Рассмотрена методика проверки на согласованность данных, полученных в ходе оценки компетентности экспертов. Рассмотрены критерии оценивания компетентности экспертов с их весовыми коэффициентами. Согласованность данных оценивают с помощью критерия χ^2 . На основании предложенного алгоритма разработана программа на языке программирования VBA. Произведена апробация предложенного на конкретном примере формирования группы экспертов для диагностирования базовых элементов карьерных автосамосвалов.

Библ. 7, ил 1, табл 4.

УДК 621.774

Пилипенко С.В., Григоренко В.У. **Об изменении геометрических размеров поперечного сечения ручья калибров станов ХПТ под влиянием теплового расширения** //

Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (100). - Днепропетровск, 2015. - с.146 - 150.

Рассматриваются особенности влияния теплового расширения металла на изменение размеров поперечного сечения ручья калибров стана ХПТ и размеров рабочего конуса для процесса деформации при прокатке труб на солевой смазке и при отсутствии эмульсионного охлаждения. В данной работе предложен метод компенсации величины термического эффекта при прокатке труб на солевой смазке и при отсутствии эмульсионного охлаждения. Компенсация изменения размеров поперечного сечения ручья калибра предложенным способом позволит производить необходимые корректировки при расчете параметров геометрии ручья калибров валков станов ХПТ и обеспечивать проектный режим обжатий компенсируя термическое влияние.

В статье так же приведена экспериментальная оценка влияния температурного изменения размеров калибра на геометрию прокатанной трубы.

Библ. 3.

УДК 519.8

Харламова Ю.Н., Корсун В.И. **Исследование процессов поиска глобального экстремума функции симметричными алгоритмами, использующими параллельное пространство** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (100). - Днепропетровск, 2015. - с.151 - 160.

Выполнено теоретическое и экспериментальное исследование процедуры поиска глобального экстремума функции, основанной на применении концепции симметрии.

Библ. 6.

УДК 004.032.26

Бодянский Є. В., Бойко О. О. **Еволюційна багаточарова нейро-фаззі система та її навчання** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (100). - Днепропетровск, 2015. - с.161 - 169.

Розглядається еволюційний підхід до обробки даних. Запропоновано нейро-фаззі систему, в якій налаштовуються всі її параметри і яка може бути використана в якості вузла еволюційної багаточарової системи. Ця система може налаштовувати свою архітектуру, синаптичні ваги і параметри функцій належності нейро-фаззі вузлів, покращуючи тим самим якість апроксимації.

Бібл. 32.

УДК 624.04+519.6

Кучеренко А.Е **Оптимизация топологии стержневой системы и статистический бутстрэп ее параметров** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (100). - Днепропетровск, 2015. - с.170 - 176.

Рассматривается проблема оптимизации топологии стержневой системы, представленная в виде задачи полуопределенной оптимизации, в условиях, когда нагрузки заданы в виде теоретических или эмпирических распределений. Моделирование выполнялось в среде Matlab.

Библ. 10, ил. 5, табл. 1.

УДК 330.42

Мелікаєв Ю.М. **Система выбора приоритетов при принятии управленческих решений** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (100). - Днепропетровск, 2015. - с.177 - 184.

У статті представлена основа загальної концепції управління ризиками різного походження, що розробляється авторами. Розглядається довільний об'єкт, що підпадає під внутрішні та зовнішні небезпеки. Визначено поняття ризику, як розмірної одиниці, показано, що ризики різного походження найбільш доцільно відображати у грошовому еквіваленті. Наведені умови оптимального управління технічними, економічними, соціальними, екологічними та іншими ризиками в умовах обмеженості ресурсів для захисту об'єкту від небезпек. Всі технічні, економічні та організаційні засоби захисту – бар'єри безпеки також розглядаються як одиниці з розмірністю у грошовому еквіваленті. Наведено наочне графічне зображення технології розподілу ресурсів для захисту об'єкту та способи його використання.

Бібл. 7.

UDC 531.314.2+536.242+532.516.5+519.683.2

Krasnikov K.S., Samokhvalov S.E., Pipyuk V.P. The mathematical model of the cored wire injection in the molten steel during blowing on the ladle-furnace // System technologies. N 5(100) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.4 - 14.

The mathematical model of the industrial process is presented. Three-dimensional movement of the wire, one-dimensional melting of the wire with a crust and three-dimensional movement of the molten steel with powder averaging in it is taken into account. The mathematical model is implemented in the computer program to check its quality and to make computational experiments.

Ref. 10, fig. 4.

UDC 669.184

Chmyrkov K.F., Sigarev E.N., Molchanov L.S., Sinegin E.V. **Research of thermal characteristics of silicon carbide iron briquettes** // System technologies. N 5(100) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.15 - 20.

The results of experimental studies of the effect of the chemical composition of iron-silicon carbide bricks on their thermal properties. Based on the information built mathematical-statistical model of thermal conductivity depending on the temperature and composition of the briquettes. The rational structure of silicon carbide iron briquettes. Based on the analysis of physical and mechanical properties, the possibility of application of the developed briquettes in steelmaking.

Ref. 11, fig. 2, tabl. 2.

UDC 681.3.07

Osovik V.N. **Improving methods of automation of processes operation of parks of railway technical systems** // System technologies. N 5(100) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.21 - 32.

Improved methods of creating intellectual automated system that provides multicriteria process control operation of parks railway engineering systems (electric motors) by receiving, diagnosing and predicting values of the parameters of the current state.

Bibl. 9, silt. 3.

UDC 622.785

Boyko M.M. **Analysis of the correlation between the some characteristics of the pellets burning processes** // System technologies. N 5(100) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.33 - 39.

The results of simulating the operation of the drying zone, heating zone and the burning zone of the conveyor machines for pellets burning are presented in the article. It was established that the presence of residual moisture in the pellets development processes magnetite oxidation, and limestone dissociation slows. This impairs the final pellets quality and performance of burning process.

Bibl. 21.

UDC 622.785

Polyakova N.V. **Formation of quality pellets by combined effect of their burning's temperature and rate of the gas blowing** // System technologies. N 5(100) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.40 - 45.

The results of simulation of burning and cooling zones of conveyor machine for Burning pellets were shown. The burning temperature and the rate of gas stream were changed in modeling. The maximum temperature's zone extends to a greater depth by increasing the gas velocity. In this case the temperature difference in height is reducing, thereby the quality of pellets layers is leveled.

Bibl. 7.

UDC528.8:004

Svynarenko D.M. **Multispectral raster images processing methods based on data orthogonalization** / D.M. Svynarenko // System technologies. N 5(100) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.46 - 52.

Orthogonalization methods for multispectral data of remote sensing of the Earth are considered. Particular orthogonalization process are considered: the principal components method, Gram-Schmidt orthogonalization, QR-decomposition, singular decomposition. New method of increasing of the spatial resolution of multispectral images is proposed. Method can simultaneously increase the spatial resolution of the image in all spectral bands.

Bibl. 10, Fig. 5, Tabl.2.

UDC 615.071

Michalev A.I., Stenin A.A., Pasko V.P., Soldatova M.A. **Identification of linear systems quasistationary based on splines and Walsh functions** // System technologies. N 5(100) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.53 - 60.

In this article for parametric identification of quasi-stationary systems is proposed an approach based on the joint use of spline functions and Walsh functions. The algorithm estimates the parameters of a linear steady-state system is reduced to solving n systems of linear algebraic equations at each of the intervals of constancy of the parameters. Effect of an approximate assignment of the coefficients matrix of spline-functions, sustainable solution of the resulting systems of linear algebraic equations is provided a method of regularization A. N. Tikhonov. The practical implementation of this approach is shown by the example of the quasi-stationary system. To increase the accuracy of evaluation of the proposed adaptive partitioning of the observation interval. This approach can be generalized to linear dynamic systems with distributed parameters.

Ref.6, pic. 2

UDC 620.197

Belaya E.V. **Investigation of the effect of corrosion on the mechanical properties of the wheels** // System technologies. N 5(100) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.61 - 67.

The analysis of advanced materials for the protection of railway wheels from corrosion damage, and to develop a system to protect the surfaces of Railway-tion wheels, which can be

used for storage in warehouses and wheels priorto-0 zones Transportation sea and land routes, as well as during operation.

Bibl.9, Fig. 2.

UDC 620.22:419.8(063)

Vnukov O.O. **Influence of dispersed particles type on electrodeposition of nickel and composite coating properties** / O.O. Vnukov, A.N. Golovachev // System technologies. N 5(100) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.68 - 75.

Studied the regularities different types of dispersed additives influence, namely Al₂O₃, MoS₂ and SiC, on composite nickel coatings corrosion resistance and wear resistance. Defined the dispersed additives optimum concentration, as well as kind of additives, that provide the coatings properties maximum level. Installed in the possibility of using dispersed particles different types to improve wear resistance of nickel coatings, while maintaining their resistance to corrosion.

Bibl. 9, il. 3, tabl. 3.

UDK 669.168:669.18

Tregubenko G.N. **Design of process of mastering of nitrogen liquid steel from carbamidium of containing ligatures with the purpose of development of effective technology of their application** // System technologies. N 5(100) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.76 - 84.

On the basis of system design what technological factors are certain and as influence on assimilation of nitrogen liquid steel from carbamidium of containing ligatures. It allows to develop effective technology of application of new ligatures for the production of steels with carbo-nitride strengthening.

Bibl. 8.

UDC 621.01(06)

Kyrylovych V.A., Morgunov R.S. **Kinematics problems of industrial robots' grippers interaction with objects of manipulation** // System technologies. N 5(100) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.85 - 92.

The heuristic algorithm of kinematics problems sequence solving, that suitable for automated searching of proposed before geometrically-forces and trajectory-dynamics parameters of industrial robots' grippers interactions with objects of manipulations which are components of automatic synthesis of robotic mechanical assembly technologies in flexible manufacturing cells is proposed.

Ref. 10, fig. 5.

UDC 004.519.217

Manikaeva O.S., Arsirii E.A., Vasilevskaja A.P. **Machine learning self-organizing Kohonen layer in systems of neural network pattern recognition for statistical information** // System technologies. N 5(100) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.93 - 105.

The paper proposes a method of machine learning based on the clustering of the input feature set state of production facilities or social environment. The method provides a consistent implementation of procedures of self-organizing Kohonen layer neuron, calibration of the output vector elements of the training set and the final neurons labeling of self-

organizing Kohonen layer. This method is proposed to use for the construction of neural network pattern recognition to make a decision about the state of production facilities or social environment for statistical information.

Bibl.8.

UDC 004.931

Rozhkov S. **Building systems of recognition of images by using neural networks** // System technologies. N 5(100) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.106 - 114.

The problem of recognition of optical images under conditions of uncertainty presentation of input images and disturbances in the space of the original. The basis of the work on the method of compensation of input information streams. The main problem lies in the method of implementation of the input converter of information gives an indication of the input signal according to the reference. It is shown that as the photoconverter in a system may use a neural network with an input signal modulating a matrix of weights, wherein the input vector is generated as a reference line.

Bibl.7, Fig.5.

UDC 669.15.74-198: 536,755

Myanovskaya Y.V., Proydak Y.S., Babenko A.V., Kamkin V.Y. **Hydrodynamics and heat transfer of metal droplets when driving in the slag layer** // System technologies. N 5(100) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.115 - 122.

Analyze the results of material and heat balances of smelting of manganese ferroalloys shows that waste slag lost 5-8% of ferro-alloys in the form of ZAPU-tavshihnya Korol'kov. The intensity of the mass exchange between the droplet me-metal and slag associated with the regime of the drop and the kinetic characteristics of the phases that are in interaction. It proved that regardless of the initial temperature of the metal droplets, during the deposition of the slag, they acquire the temperature of the slag.

Bibl.21.

UDC

Zhukhovyts'kyi I.V., Yehorov O.I. **Identification of trains in the information systems of railway transport** // System technologies. N 5(100) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.123 - 131.

Various information and control systems at marshaling yards while performing manufacturing operations require timely information about the controlled objects. The identification of railway rolling stock, both of the train as a whole and of the carriages, is an integral part of most automation systems. The developed simulation model allows you to check the correct operation of different algorithms for identifying rolling units.

Bibl.14.

UDC 519.6

Kovalenko I.I., Antipova E.A., Ustenko S.A. **Range of solutions using Dezert-Smarandache theory under the presence of complex uncertainties** // System technologies. N 5(100) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.132 - 139.

Various types of non-factors and their causes are considered, as well as the fundamentals of the Dezert-Smarandache theory. An example that demonstrates the capabilities of this

theory is given. A free and a hybrid models are build, their advantages and disadvantages are discussed.

Bibl. 8.

UDC 621.317

Pokuda E.U., Korsun V.I. **Method of assessing competence of experts diagnosing basic blocks of quarry dumptrucks** // System technologies. N 5(100) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.140 - 145.

Methodology of testing consistency of the data obtained during the assessment of expert competence is considered. Criteria of assessing the experts' competence with weighing coefficients are analyzed. Data consistency is assessed with the criterion. Based on the offered algorithm, a program in VBA programming language is designed. The offered methodology is demonstrated on the specific example of forming a group of experts to diagnose the basic blocks of quarry dumptrucks.

Bibl. 7.

UDC 621.774

Pilipenko S.V., Grigorenko V.U. **About change of geometrical sizes of a pass cross-section of tcr under the influence of thermal expansion** // System technologies. N 5(100) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.146 - 150.

The features of the influence of the thermal expansion metal on changing dimension of the cross section of the pass groove in the cold tube rolling mill and dimension at the working cone for the deformation process while rolling tubes on the salt lubricant and in the absence of emulsion cooling are considered. This work presents the method of compensation the size of thermal effect when rolling pipes using the salt greasing without the emulsive cooling. The compensation the size of the pass cross-section using the offered method will allow to make necessary corrections when calculating the parameters of the pass geometry of TCR rollers and to provide the project mode of cogging during the rolling process, compensating the thermal influence.

In the article gives an experimental estimation of influence of temperature change on the rolled pipe geometry.

Bibl. 3.

UDC 519.8

Kharlamova Y.N., Korsun V.I. **Study of the process of seeking global extremum of function by symmetric algorithms with parallel space** // System technologies. N 5(100) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.151 - 160.

Theoretical and experimental research of seeking global extremum of function based on the application of the concept of symmetry is carried out.

Bibl. 6.

UDC 004.032.26

Bodyanskiy Ye., Boiko O. **Evolving multilayer neuro-fuzzy system and its learning** // System technologies. N 5(100) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.161 - 169.

The evolving approach to data processing is considered. A neuro-fuzzy system with all its parameters adjustment is proposed that can be used as a node of the evolving multilayer system. This system can adjust its architecture, synaptic weights and membership functions parameters of the neuro-fuzzy nodes improving its approximation properties.

Bibl. 32.

UDC 624.04+519.6

Kucherenko A.E. **Truss topology optimization and statistical bootstrapping** / System technologies. N 5(100) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.170 - 176.

The paper considers the problem of truss-like structures topology optimization in case when the loads have been given as statistical distributions. Modeling has been performed in Matlab.

Bibl. 10, il. 5, tab. 1.

UDC 330.42

Melikaev Y.N. **System choice of priorities in management decisions** / System technologies. N 5(100) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.177 - 184.

In this article the basis of common conception of risks control, which is in stagy of authors design for different risks, was represented. In this conception in role of object be anything, which is under affection of inside and outside unsafety Thermions of risk and safety barrage were define as dimension unit in money equivalent. Conditions of optimal risk control in technicality, economic, social and ecological sphere were represented. The graphic technology method of resource distribution and examples of it using was also represented.

Bibl. 7.

АВТОРЫ ВЫПУСКА

Красніков Кирило Сергійович - аспірант кафедри «Прикладної математики» Дніпродзержинського державного технічного університету.

Самохвалов Сергій Євгенович - д.т.н., завідуючий кафедрою «Прикладної математики» Дніпродзержинського державного технічного університету.

Піптюк Віталій Петрович - старший науковий співробітник Інституту чорної металургії НАН України.

Чмырков Кирилл Федорович - начальник отдела нормирования и статистического учёта ПАО «ЕВРАЗ- ДМЗ им. Г.И. Петровского».

Сигарев Евгений Николаевич - д.т.н., профессор, заведующий кафедры металлургии чёрных металлов Днепродзержинский государственный технический университет.

Молчанов Лавр Сергеевич - к.т.н., ассистент кафедры металлургии стали Национальной металлургической академии Украины.

Синегин Евгений Владимирович - ассистент кафедры металлургии стали Национальной металлургической академии Украины.

Осовик Володимир Миколайович - аспірант кафедри КІТ Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна.

Бойко Максим Николаевич - к.т.н., доцент кафедры металлургии чугуна Национальной металлургической академии Украины.

Полякова Наталия Владимировна - к.т.н., доцент кафедры ЯСС Национальной металлургической академии Украины.

Свинаренко Дмитро Миколайович – к.т.н., доцент кафедры электронных засобів телекомунікацій Дніпропетровського національного університету імені Олеса Гончара.

Михалев А.И. - профессор, доктор технических наук, Национальной металлургической академии Украины.

Стенин А.А. - профессор, доктор технических наук.

Пасько В.П.

Солдатова М.А.

Белая Елена Викторовна - к.т.н, доцент кафедры покрытий, композиционных материалов и защиты металлов НметАУ.

Внуков А.А. – Национальная металлургическая академия Украины.

Головачев А.Н. - Национальная металлургическая академия Украины.

Трегубенко Геннадий Николаевич – д.т.н., старший научный сотрудник Проблемной лаборатории новых металлургических процессов Национальной металлургической академии Украины.

Кирилович Валерій Анатолійович – д.т.н., професор кафедри автоматизованого управління технологічними процесами та комп'ютерних технологій, Житомирський державний технологічний університет.

Моргунов Роман Сергійович – спеціаліст, Житомирський державний технологічний університет.

Арсирый Елена Александровна - д-р техн. наук, проф., каф. информационных систем Одесского Национального политехнического университета.

Маникаева Ольга Сергеевна - аспирант каф. информационных систем Одесского Национального политехнического университета.

Василевська Олександра Петрівна - молодший науковий співробітник науково-дослідної частини, Одесского Национального политехнического университета.

Рожков Сергей Александрович – д.т.н., доцент, заведующий кафедрой эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматики, Херсонская государственная морская академия.

Мяновская Яна Валериевна - доцент кафедры теории металлургических процессов и общей химии, Национальная металлургическая академия Украины.

Пройдак Юрий Сергеевич - проректор по научной работе, Национальная металлургическая академия Украины.

Бабенко Александр Викторович - доцент кафедры теории металлургических процессов и общей химии, Национальная металлургическая академия Украины.

Камкин Владимир Юрьевич - студент гр. МЕ-03-11м металлургического факультета, Национальная металлургическая академия Украины.

Егоров Олег Иосифович - доцент каф. «Электронные вычислительные машины», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна.

Жуковицкий Игорь Владимирович - профессор, зав. каф. «Электронные вычислительные машины», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна.

Коваленко Игорь Иванович - д.т.н., профессор кафедры программного обеспечения автоматизированных систем Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова.

Антипова Екатерина Александровна - магистр кафедры программного обеспечения автоматизированных систем Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова.

Устенко Сергей Анатольевич - д.т.н., доцент, заведующий кафедрой компьютерных систем и сетей Николаевского национального университета имени В.А. Сухомлинского.

Крсун Валерий Иванович – д.т.н., профессор, зав. кафедры МиВТ ГВУЗ "НГУ".

Прокуда Элина Юрьевна – младший научный сотрудник кафедры ААТ ГВУЗ "НГУ".

Григоренко В.У. - д.т.н., проф. кафедры УП, НМетАУ.

Пилипенко С.В. - к.т.н., докторант кафедры УП, НМетАУ.

Харламова Юлия Николаевна - аспирант кафедры метрологии и информационно-измерительных технологий ГВУЗ "НГУ".

Бодянский Евгений Владимирович - профессор, доктор технических наук, научный руководитель ПНИЛ АСУ.

Бойко Елена Александровна - аспирантка кафедры ИИ (ХНУРЭ).

Кучеренко Александр Евгеньевич - Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, г. Днепропетровск, Украина.

Меликаев Юрий Николаевич - к.т.н., доцент кафедры БЖД Днепропетровский национальный университет им. О.Гончара.