

G.G. Diachenko, O.O. Aziukovskiy

A CONTINUOUS ENERGY-EFFICIENCY OPTIMIZATION CONTROLLER FOR FIELD-ORIENTATION INDUCTION MOTOR DRIVES

Abstract. The current paper discusses the adaptive choice of a filter time constant for filtering the steady-state flux reference in the energy-efficient control problem of field-orientation induction machines in transient behavior when load and speed conditions are changing taking into account the effect of the main induction saturation. It is shown that by appropriately managing the flux linkage rate of change the energy losses per full operation cycle under torque changes can be significantly reduced compared to the conventional cases. The analysis for the appropriate choice of the filter time constant as a fraction of the rotor time constant is based on a numerical study and simulation results for three different induction machines with different rated powers.

Keywords: energy efficiency, power loss, filtering, adaptive search, dynamic operation

Statement of the problem and analysis of the recent research and publications. The induction machine is widely used in industrial applications due to its robustness and its low cost compared to permanent magnet synchronous machines. However, in part-load operation, the efficiency of the induction machine dramatically decreases when the flux is kept at the nominal level. To address this issue different strategies have been developed in the past to increase the efficiency of the induction machine in a large operation range [1],[2]. However, when the induction machine is operated under changing loads these methods will not yield maximum efficiency. A solution to this problem in the framework of vehicle applications is given in [3]. However, the motor for these applications will often operate in dynamics with changing torques and speed up to voltage and current limits. The development of parametrized prototypes is discussed in [4]. Unfortunately, without voltage and current limits as well. These limits require the knowledge of the behavior of the process quantities, which can be obtained from offline optimization [5].

Purpose of the study. The current paper discusses a different approach. The motivation is to give a simple and easy implementable solution to the problem of energy consumption minimization, which is characterized by a continuity of action, converges to the optimal flux level in the steady-state and expresses a compromise approach to the problem with changing loads in dynamics as well as provide an alternative solution to model predictive control [6].

Statement of main research material. *State-space model.* An induction machine operated with high dynamics is controlled as a rule via a field-oriented scheme. The approach in the sequel implies the orientation along the rotor flux linkage Ψ_2 , i.e. the flux linkage phasor is aligned with the d-axis of the rotating frame. The full model thus has four state variables: field-producing current i_{1d} , torque-producing current i_{1q} , rotor flux Ψ_2 , and motor speed ω_2 ; and two controls: the stator voltage phasor components u_{1d} and u_{1q} . The continuous state-space model of an induction machine is given as follows (Γ -inverse equivalent circuit parameters are used):

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x})\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \delta \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \end{cases} \quad (1)$$

with state $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{(4 \times 1)}$ represented by $\mathbf{x} = [i_{1d} \ i_{1q} \ \Psi_2 \ \omega_2]^T$ and control $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^{(2 \times 1)}$ consisting of the terminal voltages, given by $\mathbf{u} = [u_{1d} \ u_{1q}]^T$; $\delta \in \mathbb{R}^{(4 \times 1)}$ is a disturbance vector, given by $\delta = [0 \ 0 \ 0 \ Z_p(T_e - T_{load})/J]^T$, with J denoting the total moment of inertia of the rotating couplings, Z_p is the number of pole pairs, T_e and T_{load} are motor and load torque, respectively; and $\mathbf{A}(\mathbf{x}) \in \mathbb{R}^{(4 \times 4)}$ is the characteristic matrix of the system, given by the following expression

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -(R_1 + R_2)/L_\sigma & \omega_1 & R_2/(L_m L_\sigma) & 0 \\ -\omega_1 & -R_2/L_\sigma & -\omega_1/L_\sigma & 0 \\ R_2 & 0 & -R_2/L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

with stator and rotor resistances R_1 and R_2 respectively; L_σ is the stray inductance and L_m denotes the main inductance; and ω_1 as the synchronous speed in electrical radians per second, obtained from

$$\omega_1 = \omega_2 + \omega_{\text{slip}} = \omega_2 + R_2 \frac{i_{1q}}{\Psi_2} \quad (3)$$

where ω_{slip} is the slip speed. $B \in \mathbb{R}^{(4 \times 2)}$ is the input matrix given by

$$B = \begin{bmatrix} 1/L_\sigma & 0 \\ 0 & 1/L_\sigma \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

$y \in \mathbb{R}^{(2 \times 1)}$ is the outputs vector given by $y = [\Psi_2 \ \omega_2]^T$; the matrix of outputs $C \in \mathbb{R}^{(2 \times 4)}$ is given by

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

The electromagnetic torque is given by

$$T_e = \frac{3}{2} Z_p \Psi_2 i_{1q} \quad (6)$$

Main inductance saturation. The modelling of an induction machine to be adequate must consider the nonlinear nature of the machine magnetic characteristics. The measured main inductance data points are shown in Fig. 1. The minimum allowable set consists of 5-6 points. In addition, with a small amount of data, “abnormal” results cannot be included in the sampling sequence. Hence, the bigger the number of points, the better. The experimentally measured data of nineteen points is further approximated using the method of least squares. An obvious “applicant” immediately appears here in a form of a high-degree polynomial whose curve passes through all measured points. But this option is, more often than not, simply incorrect and reflects the main trend poorly. Thus, the desired function should be relatively simple and at the same time reflect the dependence adequately. We will restrict the degree of resulting polynomial to fifth degree. In this case, the objective consists of adjusting the parameters of a model function $L_m(i_{1d}): \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, \forall i_{1d} \in \mathbb{R}$. To fit the model to a data it is required to find the optimal parameter values by minimizing the sum of squared residuals given in the following form

$$\min_{\sum_{k=1}^n r_k^2} F(P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6) = \sum_{k=1}^n \left[Y_k - (P_1 \lambda_k^5 + P_2 \lambda_k^4 + P_3 \lambda_k^3 + P_4 \lambda_k^2 + P_5 \lambda_k + P_6) \right]^2 \quad (7)$$

s.t. $\lambda_k \in [\lambda^-, \lambda^+]$

where P_1 - P_6 are the function parameter values to be found; λ_k and Y_k are measured field-producing current and main inductance values, respectively.

In essence, it is necessary to solve the problem of finding the minimum of the function of six variables. First things first, let us find all partial derivatives of the first order. According to the rule of linearity, it is allowed to differentiate under the sum sign:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial P_1} &= 2 \sum_{k=1}^n (P_1 \lambda_k^{10} + P_2 \lambda_k^9 + P_3 \lambda_k^8 + P_4 \lambda_k^7 + P_5 \lambda_k^6 + P_6 \lambda_k^5 - \lambda_k^5 Y_k) \\ \frac{\partial F}{\partial P_2} &= 2 \sum_{k=1}^n (P_1 \lambda_k^9 + P_2 \lambda_k^8 + P_3 \lambda_k^7 + P_4 \lambda_k^6 + P_5 \lambda_k^5 + P_6 \lambda_k^4 - \lambda_k^4 Y_k) \\ \frac{\partial F}{\partial P_3} &= 2 \sum_{k=1}^n (P_1 \lambda_k^8 + P_2 \lambda_k^7 + P_3 \lambda_k^6 + P_4 \lambda_k^5 + P_5 \lambda_k^4 + P_6 \lambda_k^3 - \lambda_k^3 Y_k) \\ \frac{\partial F}{\partial P_4} &= 2 \sum_{k=1}^n (P_1 \lambda_k^7 + P_2 \lambda_k^6 + P_3 \lambda_k^5 + P_4 \lambda_k^4 + P_5 \lambda_k^3 + P_6 \lambda_k^2 - \lambda_k^2 Y_k) \\ \frac{\partial F}{\partial P_5} &= 2 \sum_{k=1}^n (P_1 \lambda_k^6 + P_2 \lambda_k^5 + P_3 \lambda_k^4 + P_4 \lambda_k^3 + P_5 \lambda_k^2 + P_6 \lambda_k - \lambda_k Y_k) \\ \frac{\partial F}{\partial P_6} &= 2 \sum_{k=1}^n (P_1 \lambda_k^5 + P_2 \lambda_k^4 + P_3 \lambda_k^3 + P_4 \lambda_k^2 + P_5 \lambda_k + P_6 - Y_k) \end{aligned} \quad (8)$$

Now compose a typical system equating each expression from (8) to 0. Then divide each equation by two and, in addition, split the sums:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_1 \sum_{k=1}^n \lambda_k^{10} + P_2 \sum_{k=1}^n \lambda_k^9 + P_3 \sum_{k=1}^n \lambda_k^8 + P_4 \sum_{k=1}^n \lambda_k^7 + P_5 \sum_{k=1}^n \lambda_k^6 + P_6 \sum_{k=1}^n \lambda_k^5 = \sum_{k=1}^n \lambda_k^5 Y_k \\ P_1 \sum_{k=1}^n \lambda_k^9 + P_2 \sum_{k=1}^n \lambda_k^8 + P_3 \sum_{k=1}^n \lambda_k^7 + P_4 \sum_{k=1}^n \lambda_k^6 + P_5 \sum_{k=1}^n \lambda_k^5 + P_6 \sum_{k=1}^n \lambda_k^4 = \sum_{k=1}^n \lambda_k^4 Y_k \\ P_1 \sum_{k=1}^n \lambda_k^8 + P_2 \sum_{k=1}^n \lambda_k^7 + P_3 \sum_{k=1}^n \lambda_k^6 + P_4 \sum_{k=1}^n \lambda_k^5 + P_5 \sum_{k=1}^n \lambda_k^4 + P_6 \sum_{k=1}^n \lambda_k^3 = \sum_{k=1}^n \lambda_k^3 Y_k \\ P_1 \sum_{k=1}^n \lambda_k^7 + P_2 \sum_{k=1}^n \lambda_k^6 + P_3 \sum_{k=1}^n \lambda_k^5 + P_4 \sum_{k=1}^n \lambda_k^4 + P_5 \sum_{k=1}^n \lambda_k^3 + P_6 \sum_{k=1}^n \lambda_k^2 = \sum_{k=1}^n \lambda_k^2 Y_k \\ P_1 \sum_{k=1}^n \lambda_k^6 + P_2 \sum_{k=1}^n \lambda_k^5 + P_3 \sum_{k=1}^n \lambda_k^4 + P_4 \sum_{k=1}^n \lambda_k^3 + P_5 \sum_{k=1}^n \lambda_k^2 + P_6 \sum_{k=1}^n \lambda_k = \sum_{k=1}^n \lambda_k Y_k \\ P_1 \sum_{k=1}^n \lambda_k^5 + P_2 \sum_{k=1}^n \lambda_k^4 + P_3 \sum_{k=1}^n \lambda_k^3 + P_4 \sum_{k=1}^n \lambda_k^2 + P_5 \sum_{k=1}^n \lambda_k + nP_6 = \sum_{k=1}^n Y_k \end{array} \right. \quad (9)$$

The obtained system (9) can be solved, for example, by Cramer's rule, and as a result, a stationary point is obtained $F(P_1^*, P_2^*, P_3^*, P_4^*, P_5^*, P_6^*)$. By checking the sufficient condition for the extremum, we can verify that at exactly this point the function reaches its minimum. The check is connected with additional calculations and therefore it is left behind the scenes. The function with $F(-0.669, 3.606, -6.622, 4.415, -0.743, 0.754)$ in the best way (at least in comparison with any other function) approximates the experimental points.

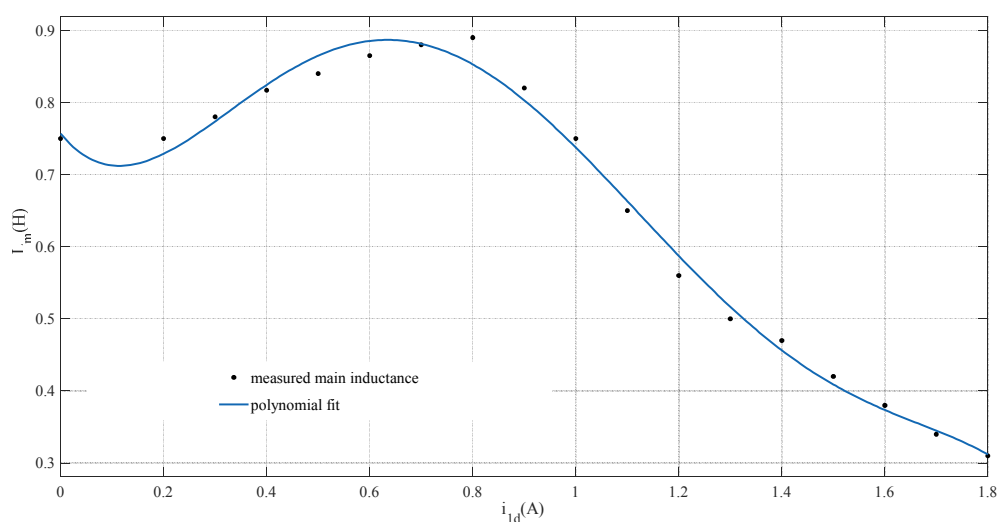


Figure 1 - Measured main inductance dependence and its polynomial approximation for a 370-W motor

Main idea. Let us consider a certain case of load torque disturbance on the induction machine shaft. Assume that before a perturbation in the motor torque of magnitude ΔT_{load} the motor operates in the optimal mode of power consumption. It is obvious that after a change in the torque T_e on the shaft to the new value $T_e + \Delta T_{\text{load}}$, $\Delta T_{\text{load}} \geq 0$, the speed controller will increase the reference of the torque-producing current in order to maintain the speed at a given level. Consider two boundary modes of behavior of the system under a change in the load torque on the motor shaft illustrated in Fig. 2:

1. The rotor flux linkage stays unvaried.
2. The rotor flux linkage is set to its new optimum steady-state value.

In the first case, the torque-producing current rapidly increases to its steady-state value, but under the new value of the torque on the shaft, the power consumption will not be optimal. In the second case, if we consider the peak value of the power losses during the transient period in Fig. 2 its value will be much greater than in case 1. It was noticed that the field regulator attempts to establish a new steady-state optimal value for the rotor flux linkage as quickly as possible and as a result uses a high magnitude of the field-producing current and reaches its output almost in no time. This is the main contribution to short-term high losses according to the stepwise approach denoted in Fig. 2a. This fact means that it is not profitable to use solely the conventional flux controller in dynamic mode, due to high instantaneous power loss overshoots under changing torques and, in addition, it leads to the increase of the total energy consumed per duty cycle. That is, the peak power loss is much lower in case 1. This statement is also based on the fact that by condition there is no change in the rotor flux linkage before the change in load occurs. Thus, at the very first instance of time, the speed controller sets up the torque-producing current for the value of the rotor flux, which was optimal until any changes in the torque.

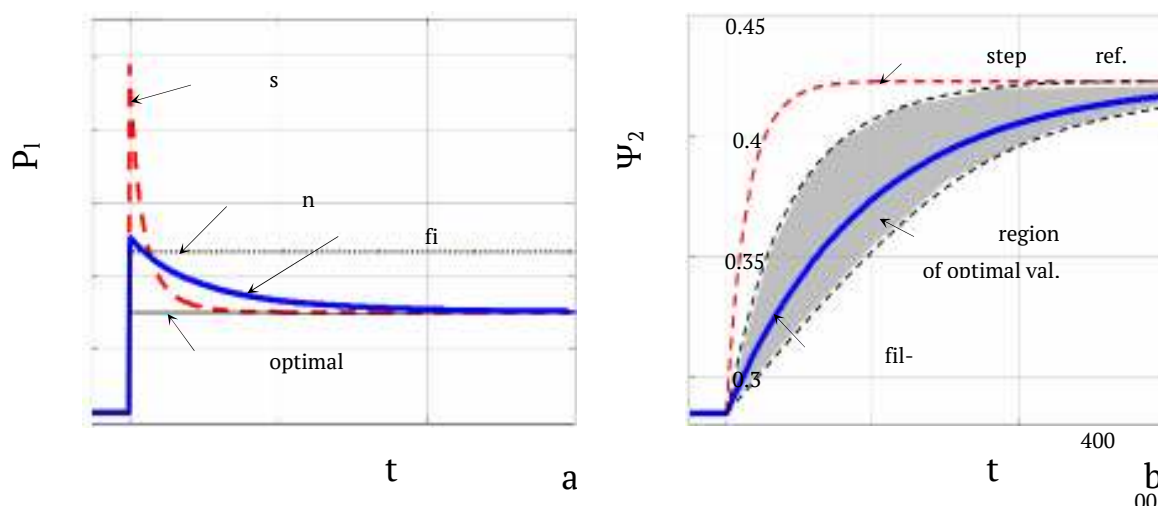


Figure 2 - a – power losses plot; b – rotor flux linkage trajectories

As illustrated in Fig. 2 this peak in the power losses can be significantly decreased by filtering the flux reference value using an appropriately chosen filter time constant.

The main idea of the proposed method is to combine approaches *stepwise* and *nominal* using low-pass filtering of the rotor flux linkage reference, implemented by a first-order system in Fig. 4. In order to give the user an easy to apply design criterion the filter time constant is given as a fraction of the rotor time constant of the considered motor. As illustrated in Fig. 2 this approach reduces the peak power loss under a change in load torque on the shaft of the motor and it converges to the optimal steady-state value.

Numerical study. Let us consider the impact of first-order filtering. To simplify the calculations, we will assume in the sequel that the flux regulator is fast enough such that the flux linkage follows its reference closely. In addition, assume that the speed and current controllers of field-oriented control have high enough performance to ensure the control characteristic close to perfectly rigid, that is, the dynamics of the stator phasor components is significantly higher than the dynamics of the magnetic flux and speed. In this case, we can assume for the flux linkage dynamics the first-order differential equation:

$$\dot{\Psi}_2(t) = -\frac{1}{T_\Psi} \Psi_2(t) + \frac{1}{T_\Psi} \Psi_{2,\text{ref}}(t) \quad (10)$$

and its input receives a step signal $\Psi_{2,\text{ref}}(t) = \Psi_{2,\text{opt}}^{\text{ss}} \cdot 1(t)$ with $\Psi_{2,\text{opt}}^{\text{ss}}$ as a reference signal corresponding to new operating conditions. The task is to find the time evolution of the outputs $\Psi_2(t)$, which in this case is a step response. Let us solve this problem with the help of transfer functions and signal images according to Laplace transform. Applying the Laplace transform to the left and right sides of (10), assuming that all the initial conditions are zero. The resulting equation is a complex function with a complex variable of the input $X[s]$ and output $\Psi[s]$:

$$s\Psi[s] + \frac{1}{T_\Psi} \Psi[s] = \frac{1}{T_\Psi} X[s]. \quad (11)$$

Thus, under zero initial conditions, the output of the object is calculated as the product of its transfer function by the image representation of the input

$$\Psi[s] = W[s] \cdot X[s] = \frac{1}{T_\Psi s + 1} \cdot \frac{\Psi_{2,\text{opt}}^{\text{ss}}}{s} = \frac{\Psi_{2,\text{opt}}^{\text{ss}}}{s} - \Psi_{2,\text{opt}}^{\text{ss}} \frac{1}{s + 1/T_\Psi}. \quad (12)$$

Now, using the principle of superposition for images, we calculate the original output signal:

$$\begin{aligned} \Psi_2(t) &= \Psi_{2,\text{opt}}^{\text{ss}} L^{-1} \left\{ \frac{1}{s} \right\} - \Psi_{2,\text{opt}}^{\text{ss}} L^{-1} \left\{ \frac{1}{s + 1/T_\Psi} \right\} = \\ &= \Psi_{2,\text{opt}}^{\text{ss}} [1 - \exp[-t / T_\Psi]] \end{aligned} \quad (13)$$

The solution of this differential equation for non-zero initial conditions is given by

$$\Psi_2(t) = \Psi_2(0) \exp[-t / T_\Psi] + \Psi_{2,\text{opt}}^{\text{ss}} [1 - \exp[-t / T_\Psi]]. \quad (14)$$

From this point, the expression (14), as well as new stator phasor component dynamics, are substituted into the time integral of power losses that is the energy loss

$$\begin{aligned} J &= \int_0^T \left[\frac{3}{2} (R_1 + R_2) i_{1d}^2(t) + \frac{3}{2} (R_1 + R_2) i_{1q}^2(t) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{3}{2} \frac{R_2}{L_m^2(i_{1d}(t))} \Psi_2^2(t) - 3 \frac{R_2}{L_m(i_{1d}(t))} \Psi_2(t) i_{1d}(t) \right] dt \end{aligned} \quad (15)$$

with T as the duration of the transient process. The example of calculated trajectories for an 11-kW motor is shown in Fig. 3. The duration of transients was chosen 1.4 sec.

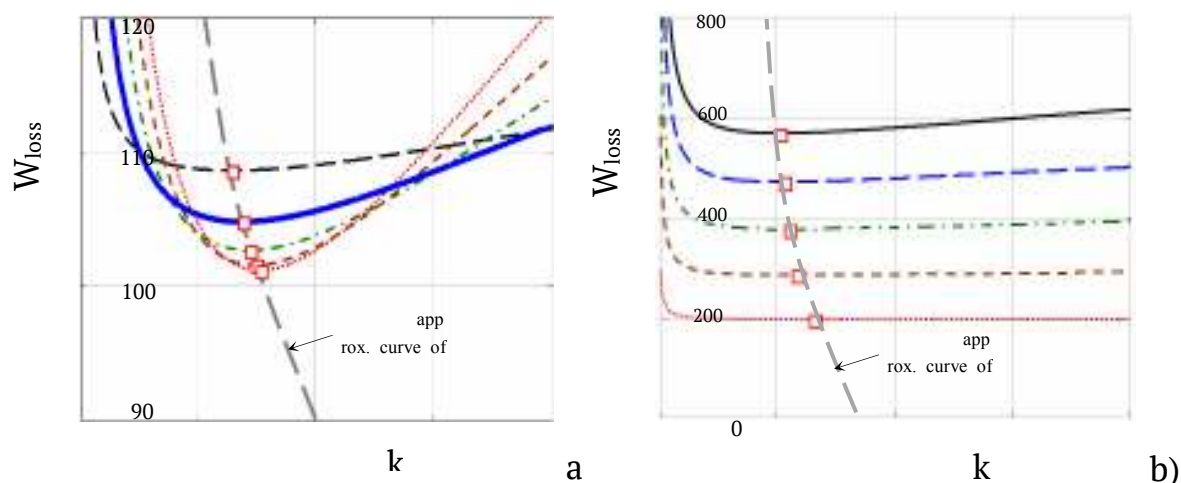


Figure 3 - Calculated trajectories for loss energy: a – step decrease; b – step increase for an 11-kW motor

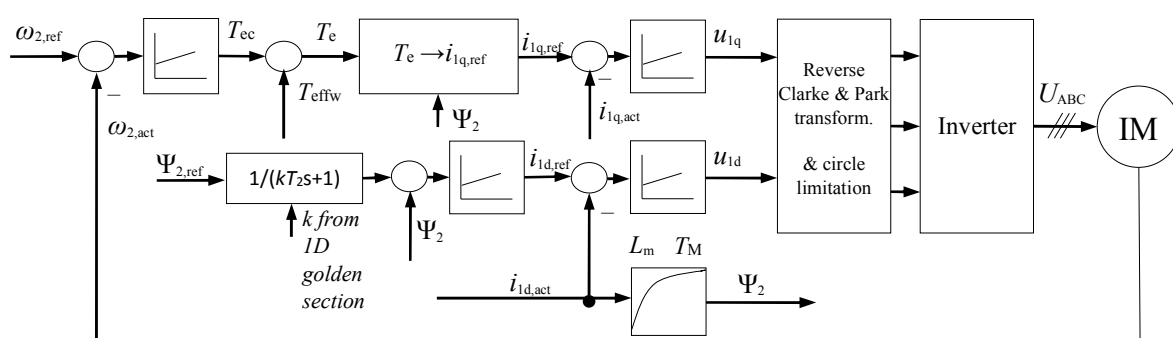


Figure 4 - Control structure

The first example was done for different load steps with decreasing load from 100 % and below to 25 % of the nominal motor torque. The results for the loss of energy are given in Fig. 3a. The first test was performed for different load steps with increasing load from 25 % up to 100 % of nominal motor torque. The obtained values of the energy losses as a function of k are presented in Fig. 3b. It can be seen that for different load change conditions there is an appropriate minimizing value for the multiplier k . To sum up, the most reasonable choice is in bounds $k \in [0.5 \ 1]$.

Adaptive line search. In contrast to [7], where filter time constant with factor k had fixed value over wide operation range, it is suggested in the

current paper to effectively search the minimum point of the loss trajectories at each sampling period. According to the extreme value theorem in a formulation due to Weierstrass, a real-valued function J is continuous on the closed interval $k \in [0.5 \ 1]$, then J attains its maximum and a minimum, each at least once.

Expression (15) is the one-dimensional case $k \in \mathbb{R}$. Then the function $J: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, the derivative of which is complicated or unknown. To find the optimal value of factor k , it is necessary to solve the problem of unconditional minimization $J \rightarrow \min$, taking into account that the function has a single minimum (concave) on the closed interval $k \in [0.5 \ 1]$. It is assumed that the function is being positively defined $J(k) \in \mathbb{R}^+$. One of the most common search methods is the gradient descent method, which is formulated in a continuous time frame as follows:

$$\dot{x} = -k \frac{df}{dx} \quad (16)$$

with $k > 0$ as a constant value.

Denote $y = f(x)$ and x_{\min} – minimum value of the function f on a closed interval $[a, b]$, $\dot{f}(x) = df/dx$. Let us prove that the method converges to a local minimum. For this purpose, a following Lyapunov function $V(y)=y^2$. Obviously, $V(y) \in \mathbb{R}^+$. Differentiation over time gives

$$\dot{V}(y) = 2y \cdot \dot{y} = 2y \cdot \dot{f}(x) \dot{x} = -2k \cdot f(x) \cdot [\dot{f}(x)]^2, \quad (17)$$

$\dot{V}(y) < 0$ everywhere, except $y_{\min} = f(x_{\min})$ where $\dot{f}(x_{\min}) = 0$ and $\dot{V}(y_{\min}) = 0$. Thus, following the definition of stability according to Lyapunov, point x_{\min} , i.e. the optimal value of k is stable.

The search for the minimum point of the loss trajectories (Fig. 3) is done by means of a 1-D search method. At each sampling period, the golden section method is applied to search the loss-minimizing factor k , which represents the fraction of the rotor time constant.

Findings. A loss-minimizing flux control method based on filtering the rotor flux linkage reference for the flux regulator has been proposed in this paper. The main idea is to determine an appropriate filter time constant

as a fraction of the rotor time constant using a multiplier k by means of a 1-D search method taking into consideration the main inductance saturation. The result of a numerical study shows that the optimal value of the multiplier k is in a range between 0.5 and 1. This solution is simple to implement and can be easily integrated into existing inverters, and not less importantly, the same algorithm is used both to minimize power loss in statics and dynamics when load and speed conditions are changing.

REFERENCES

1. Bazzi, A., & Krein, P. (2009). A Survey of real-time power-loss minimizers for induction motors. IEEE Electric Ship Technologies Symposium, ESTS 2009. 98-106.
2. Diachenko, G. G., & Aziukovskyi, O. O. (2020). Review of methods for energy-efficiency improvement in induction machines. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 1.
3. Windisch, Th., & Hofmann, W. (2018). A novel approach to MTPA tracking control of AC drives in vehicle propulsion systems. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 67(10), 9294-9302.
4. Plathottam, S. J., & Salehfar, H. (2017). Transient energy efficiency analysis of field oriented induction machines. IEEE Access, 5, 20545-20556.
5. Klenke, F. & Hoffmann, W. (2011). Energy-efficient control of induction motor servo drives with optimized motion and flux trajectories. Proceedings of the 14th European Conference on Power Electronics and Applications, 1-7.
6. Diachenko, G., Aziukovskyi, O., Rogoza, M., & Yakimets, S. (2019). Optimal field-oriented control of an induction motor for loss minimization in dynamic operation. 2019 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), 94-97. Kremenchuk, Ukraine.
7. Diachenko, G., & Schullerus, G. (2015). Simple dynamic energy efficient field oriented control in induction motors. Proceeding of the 18th International Symposium on Power Electronics. Novi Sad, Serbia.

Received 02.03.2020.

Accepted 06.03.2020.

Регулятор безперервної оптимізації енергоефективності в векторно-керованих асинхронних приводах

У цій роботі розглядається адаптивний вибір постійної часу фільтра для фільтрації стаціонарного сигналу завдання потоку ротора в задачі енергоефективного керування асинхронними машинами з векторним керуванням в перехідних режимах, коли умови навантаження та швидкості змінюються з урахуванням ефекту основного насичення магнітопроводу. Показано, що при належному керуванні швидкістю зміни потоку ротора втрати енергії за повний цикл роботи при зміні крутного моменту можна значно зменшити порівняно зі звичайними випадками. Аналіз відповідного вибору постійної часу фі-

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

льтра як частки постійної часу ротора базується на чисельному дослідженні та результатах моделювання для трьох різних індукційних машин з різною потужністю.

***A continuous energy-efficiency optimization controller
for field-orientation induction motor drives***

Abstract. The current paper discusses the adaptive choice of a filter time constant for filtering the steady-state flux reference in the energy-efficient control problem of field-orientation induction machines in transient behavior when load and speed conditions are changing taking into account the effect of the main induction saturation. It is shown that by appropriately managing the flux linkage rate of change the energy losses per full operation cycle under torque changes can be significantly reduced compared to the conventional cases. The analysis for the appropriate choice of the filter time constant as a fraction of the rotor time constant is based on a numerical study and simulation results for three different induction machines with different rated powers.

Дяченко Григорій Григорьевич – методист высшей категории, магистр, Национальный технический университет «Днепровская политехника».

Азюковский Александр Александрович – доцент, к.т.н., Национальный технический университет «Днепровская политехника».

Дяченко Григорій Григорійович – методист вищої категорії, магістр, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка».

Азюковський Олександр Олександрович – доцент, к.т.н., Національний технічний університет «Дніпровська політехніка».

Diachenko Grygorii – Methodist of the highest category, M. S., Dnipro University of Technology.

Aziukovskyi Oleksandr – Associate professor, Ph. D., Dnipro University of Technology.

І.В. Колосов, О.В. Поливода, Г.В. Рудакова

ІДЕНТИФІКАЦІЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ЛЮДИНИ-ОПЕРАТОРА

Анотація: В статті розглядається можливість ідентифікації напруженого стану людини шляхом визначення параметрів математичної моделі, яка отримується на основі аналізу біофізичних показників, що фіксуються за результатами вимірів. Приведено приклад розрахунку.

Ключові слова: аналіз даних, ідентифікація стану, метод найменших квадратів, оцінка параметрів, динамічний об'єкт, рівень напруженості, спостереження, вимірювання.

Постановка проблеми. При виконанні своїх професійних обов'язків людина доволі часто опиняється в ситуації коли потрібно приймати рішення. В цьому випадку напруженість стану оператора зазвичай підвищується при керуванні будь-яким процесом в реальному часі, особливо в умовах дефіциту часу. Постійний моніторинг рівня напруженості стану людини дозволяє своєчасно виявити передстресові та стресові стани і вжити певні заходи щодо стабілізації ситуації.

Стан людини може бути визначений за біофізичними параметрами, які змінюються під час виконання операцій різного характеру та можуть вимірюватися за допомогою датчиків [1]. На основі аналізу даних, що фіксуються за результатами вимірів, можна виявити рівень напруженості стану людини та оцінити складність оперативної ситуації. Виникає задача побудови математичної моделі, на основі якої можна адекватно ідентифікувати стан людини-оператора.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Людина-оператор є динамічною системою, тобто його поведінку можна описати за допомогою системи диференціальних рівнянь. В зв'язку з тим, що людина як динамічна система з точки зору системного підходу відноситься до класу не повністю керованих та не повністю спостережуваних систем, для її дослідження доцільно використовувати математичну модель в просторі

станів [2]. Рівняння стану людини-оператора в просторі станів задаються наступним чином

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{v}(t), \quad (1)$$

де $\mathbf{x}(t)$ - вектор біофізичних параметрів людини, які реєструються певною вимірювальною підсистемою; $\mathbf{v}(t)$ - вектор вхідних обурень; \mathbf{A} - матриця стану об'єкта; \mathbf{B} - матриця впливу вхідних сигналів на зміни стану об'єкта.

Біофізичні параметри суттєво змінюються в залежності від зовнішніх обставин, тому визначення ступеня напруженості стану людини можна здійснювати шляхом ідентифікації параметрів моделі (1) та подальшому аналізу значень компонент матриці стану \mathbf{A} .

Для ідентифікації параметрів моделі (1) в реальному часі, доцільно використовувати повторювані процедури, які дозволяють отримати оцінку параметрів моделі при надходженні нових вимірювань [3]. Найбільш відомими повторюваними процедурами є метод стохастичної апроксимації і метод найменших квадратів. Однак, точність методу стохастичної апроксимації досягається при досить великій кількості ітерацій, тому використовувати його при знаходженні параметрів моделі для вирішення задач ідентифікації динамічного об'єкта в реальному часі не варто [3, 4].

Мета досліджень. Метою статті є проведення оцінювання параметрів математичної моделі на основі аналізу біофізичних параметрів людини, що реєструються, та обґрунтування доцільності їхнього застосування для ідентифікації напруженого стану.

Викладення основного матеріалу досліджень. Комплекс біофізичних параметрів людини, що реєструються синхронно, відноситься до класу багатомірних часових рядів, для опису яких зазвичай використовують дискретизовану форму рівняння (1), а саме

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{b}\mathbf{v}(k). \quad (2)$$

Для оцінювання параметрів моделі (2) при наявності достатньо великої вибірки спостережень використаємо наступні вирази [5]

$$\hat{\mathbf{A}}_n = \left[\sum_{i=2}^n \mathbf{x}(n+2-i) \mathbf{x}^T(n+1-i) \right] \cdot \left[\sum_{i=2}^n \mathbf{x}(n+1-i) \mathbf{x}^T(n+1-i) \right]^{-1}; \quad (3)$$

$$\hat{\mathbf{b}}^2 = \frac{1}{p(n-1)} \text{tr} \left[\sum_{i=2}^n \mathbf{x}(n+1-i) \mathbf{x}^T(n+1-i) - \hat{\mathbf{A}}_n \sum_{i=2}^n \mathbf{x}(n+1-i) \mathbf{x}^T(n+2-i) \right], \quad (4)$$

де n – кількість вимірів; p – порядок моделі (розмірність вектору $\mathbf{x}(k)$).

Обчислення оцінок параметрів моделі здійснено для трьох динамічних процесів, що характерні для людини: $x_1(k)$ – кардіограма, $x_2(k)$ – реограма, $x_3(k)$ – пневмограма. Довжина вибірки даних $N = 200$ точок, що фіксувалися на протязі 4 с. Данні спостережень було отримано для двох випадків: 1) – при спокійному (фоновому) стані людини та 2) – при напруженому (стресовому) стані тієї ж особи. В результаті розрахунків отримано оцінки матриці $\hat{\mathbf{A}}_n$ та параметра $\hat{\mathbf{b}}$ на основі вибірки довжиною $n = 50$ точок.

1) Для фоновому стану:

$$\hat{\mathbf{A}}_{f50} = \begin{pmatrix} 0.510 & 0.166 & 0.192 \\ 0.056 & 0.858 & 0.075 \\ -0.024 & -0.018 & 1.023 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

вектор власних значень матриці $\hat{\mathbf{A}}_{f50}$ одержано у наступному вигляді:

$$\lambda_f = (0.491 \quad 0.909 \quad 0.991)^T, \quad (6)$$

оцінка коефіцієнту впливу зовнішніх обурень $\hat{b}_f = 0.1$.

2) Для стресового стану:

$$\hat{\mathbf{A}}_{s50} = \begin{pmatrix} 0.396 & -0.092 & 0.531 \\ 0.24 & 0.9 & -0.152 \\ 0.039 & 0.0009 & 0.968 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

вектор власних значень матриці $\hat{\mathbf{A}}_{s50}$ має вигляд

$$\lambda_s = (0.405 \quad 1.001 \quad 0.858)^T, \quad (8)$$

оцінка коефіцієнту впливу зовнішніх обурень $\hat{b}_s = 0.088$.

Експериментальні залежності та отримані за моделлю для фоновому стану наведені на рис. 1. На рис. 2 показано відносну похибку.

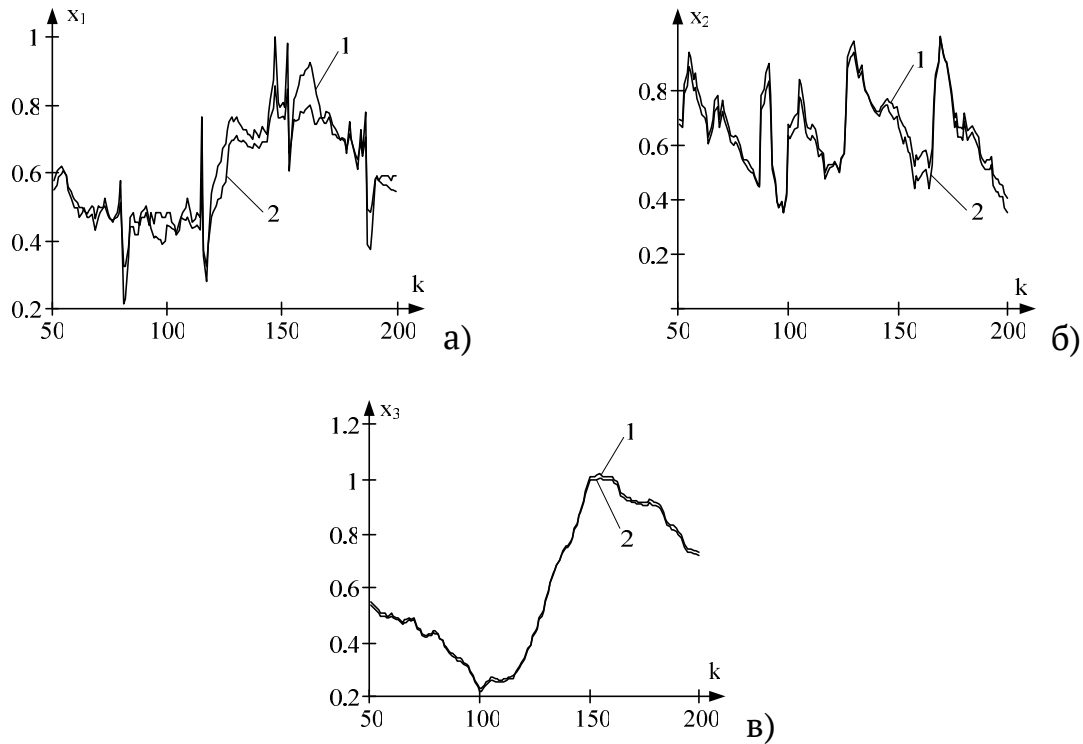


Рисунок 1 - Експериментальні та отримані за моделлю залежності для фоновому стану

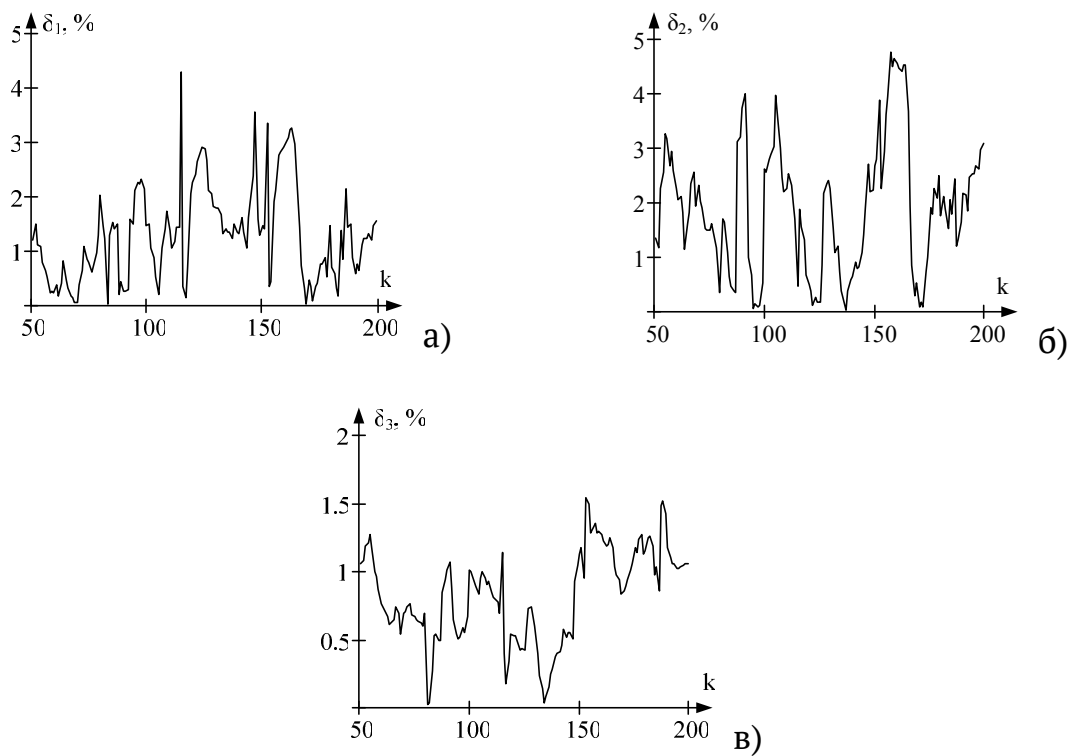


Рисунок 2 - Похибки моделі для фоновому стану

Експериментальні залежності та отримані за моделлю для стресового стану наведені на рис. 3. На рис. 4 показано відносну похибку.

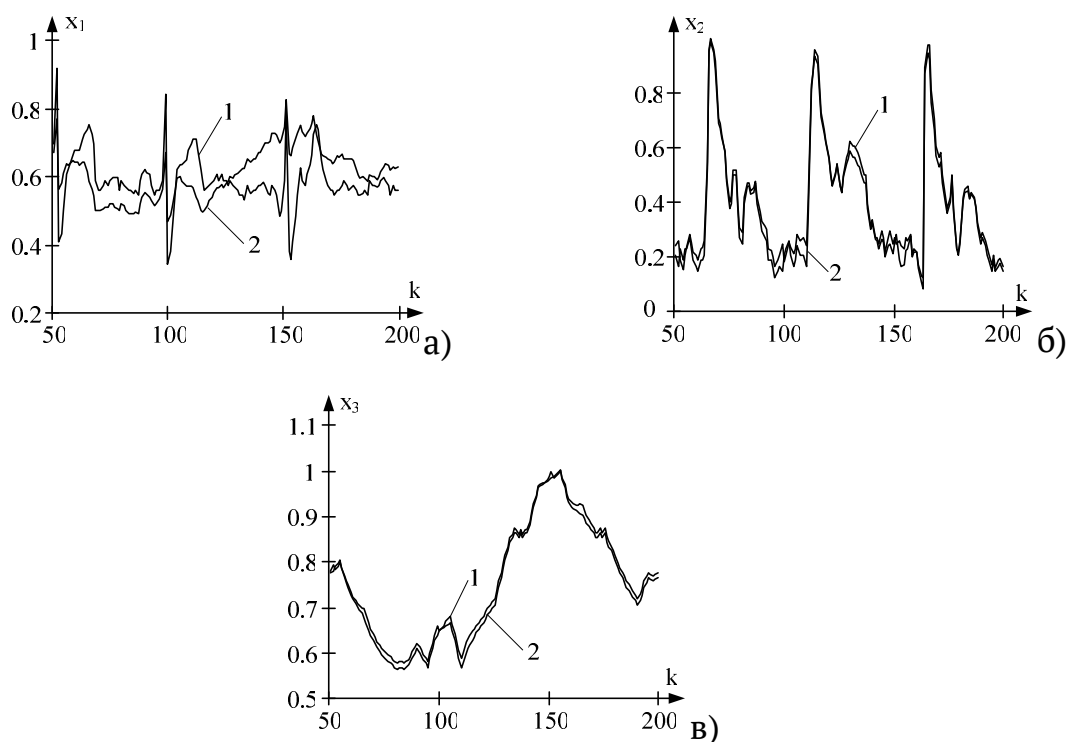


Рисунок 3 - Експериментальні та отримані за моделлю залежності для стресового стану

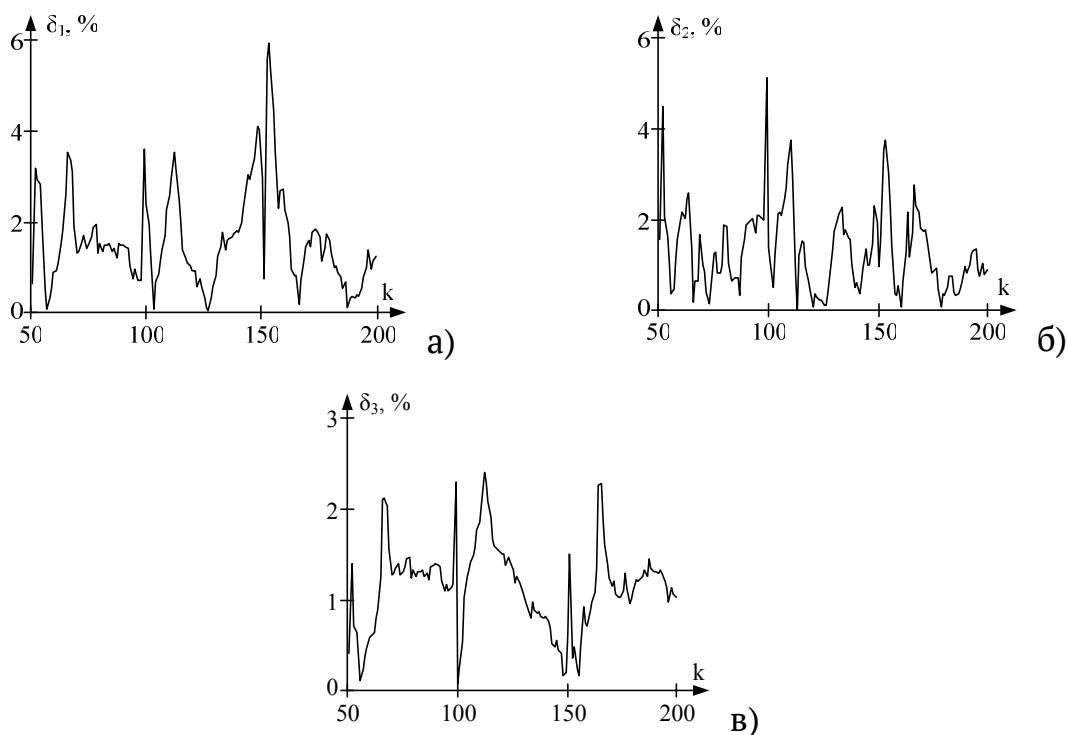


Рисунок 4 - Похибки моделі для стресового стану

На основі аналізу отриманих результатів розрахунків можна відмітити, що:

1. Значення всіх власних чисел (6) матриці \hat{A}_f за абсолютною величиною менше одиниці. Це свідчить про стаціонарність процесу (2).

2. Для напруженого стану одне з власних значень (8) матриці \hat{A}_f становиться більш за одиницю, тобто стаціонарність процесу (2) порушується.

3. Оцінка коефіцієнту зовнішніх обурень при стресовому стані зменшується на 12% відносно тієї ж оцінки у фоновому стані ($\hat{b}_f > \hat{b}_s$). Це можна пояснити як зменшення здатності сприйняття зовнішніх вхідних сигналів.

Висновки. Аналіз результатів виказав, що використання методу найменших квадратів дозволяє отримувати оцінки параметрів моделі динамічного об'єкту на основі обробки даних від підсистеми моніторингу, які можна застосовувати для діагностики стану в реальному часі. Це відкриває шляхи для своєчасного виявлення перевантажень і запобігання екстремальних умов функціонування. Доцільно здійснити дослідження закономірностей зміни параметрів моделей для різного типу людей та при різному ступені напруженості.

ЛІТЕРАТУРА / ЛИТЕРАТУРА

1. Носенко Э.Л. Теоретико-психологические основы компьютерной диагностики эмоциональной устойчивости человека. / Э.Л. Носенко, И.Ф. Аршава. – Днепропетровск: Изд-во ДГУ, 2006. – 236 с.
2. Киричков В.Н. Автоматика и управление в технических системах. В 11-ти кн. Кн.2. Идентификация объектов систем управления технологическими процессами / В.Н. Киричков; под ред. А.А. Краснопрошиной. – К.: Выща шк. 1990. – 263 с.
3. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т.2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы: Учеб. пособие. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 464с.
4. Rudakova H. Using Recurrent Procedures in Adaptive control System for Identify the Model Parameters of the Moving Vessel on the Cross Slipway / H. Rudakova, O. Polyvoda, A. Omelchuk //Data 2018, 3(4), 60.

5. Домбровский В.В. Эконометрика: Учебник для вузов / В.В. Домбровский. - М.: Новый учебник, 2004. - 342с.

REFERENCES

1. E.L. Nosenko, I.F. Arshava, Theoretical and psychological foundations of computer diagnostics of human emotional stability. Dnepropetrovsk: Publishing House of the DSU, 2006, 236 p. (in Russian)
2. V. N. Kirichkov, Object identification process control systems. Kiev: Vyshcha shkola, 1990, 263p. (in Russian)
3. D.P. Kim, Automatic control. Theory Nonlinear and Multivariable System. Seol: Harnol, 2000, 558 p.
4. Rudakova H. Using Recurrent Procedures in Adaptive control System for Identify the Model Parameters of the Moving Vessel on the Cross Slipway / H. Rudakova, O. Polyvoda, A. Omelchuk //Data 2018, 3(4), 60.
5. V.V. Dombrovsky, Econometrics: Textbook for high schools. M.: New textbook, 2004, 342 p.

Received 02.03.2020.

Accepted 06.03.2020.

Идентификация напряженного состояния человека-оператора

В данной статье авторами проведено исследование биофизических параметров, которые изменяются во время выполнения операций разного характера и могут измеряться с помощью датчиков. Обоснована возможность определения уровня напряженности состояния человека и оценивания сложности оперативной ситуации на основе анализа данных, которые фиксируются по результатам измерений. Доказано, что использование метода наименьших квадратов позволяет получать оценки параметров модели динамического объекта, на основе которой можно адекватно идентифицировать состояние человека-оператора.

Identification of the human operator stress conditions

Performing their professional duties, people often find themselves in a situation where you need to make a decision. In this case, the stress conditions of the operator tends to increase when managing any process in real time, especially in lack of time. Constant monitoring of the level of the human stress conditions allows to identify in advance the pre-stress and stress conditions and to take certain measures to stabilize the situation. Human condition can be determined by biophysical parameters that change during different operations and can be measured using sensors. Based on the analysis of data recorded on the results of measurements, it is possible to identify the level of the human stress condition and to assess the complexity of the operational situation. To identify model parameters in real time, it is advisable to use repetitive procedures that allow to obtain an estimate of model parameters when new measurements are received. The purpose of the article is to evaluate the parameters of the mathematical model based on the analysis of the recorded biophysical parameters of the human organism, and to evaluate the possibility of their use for the identification of stress conditions. The model parameter estimates are calculated for three dynamic human-specific processes: cardiogram, rheogram, pneumogram. Observation data were obtained for two cases: in a calm (background) conditions of a human and in a stressful (tense) conditions of the same person. The analysis of the results

showed that the use of the least squares method allows to obtain estimates of the parameters of the dynamic object model based on the processing data from the monitoring subsystem, which can be used for real-time diagnostics. This opens the way to detect overloads in a timely manner and prevent extreme operating conditions. It is advisable to study the regularity of change of model parameters for different types of people and at different level of stress conditions.

Колосов Игорь Владимирович – директор кріюінгового департаменту ООО «Марлоу Навігейшн Україна», (аспірант кафедри експлуатації судового електрооборудовання і засобів автоматики Херсонської державної морської академії).

Поливода Оксана Валерієвна – доцент кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки Херсонського національного технічного університету.

Рудакова Анна Владимировна – професор кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки Херсонського національного технічного університету.

Колосов Ігор Володимирович – директор кріюінгового департаменту ТОВ «Марлоу Навігейшн Україна», (аспірант кафедри експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики Херсонської державної морської академії).

Поливода Оксана Валеріївна – доцент кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки Херсонського національного технічного університету.

Рудакова Ганна Володимирівна – професор кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки Херсонського національного технічного університету.

Kolosov Igor – Director of Crewing Department, Marlow Navigation Ukraine (Postgraduate Student of the Ship Electrical Equipment and Automatic Devices Operation Department, Kherson State Marine Academy).

Polyvoda Oksana – Assistant Professor of the Automation, Robotics and Mechatronics Department, Kherson National Technical University.

Rudakova Hanna – Professor of the Automation, Robotics and Mechatronics Department, Kherson National Technical University.

С.В. Ревенко, Е.Р. Тоуфак, Ю.О. Лебеденко

ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ БАГАТОПРИВОДНОЮ СИСТЕМОЮ КАРКАСНОЇ УСТАНОВКИ ПАРАЛЕЛЬНОЇ КОНСТРУКЦІЇ

Анотація. Стаття описує каркасну установку паралельної конструкції. Наведено формули механіки та руху каркасної установки. За допомогою залежностей визначені положення центру платформи, кут відхилення норми від вертикальної осі. Описано також співвідношення координат структури. Проаналізовано рівняння динаміки для многоприводних систем. За допомогою рівнянь Лагранжа отримана система диференціальних рівнянь, що описують оптимальне по відхиленню від заданої траєкторії рух маніпулятора.

Ключові слова: багатоприводна система, динаміка, каркасна конструкція, кінематика, оптимізація, рівняння Лагранжа.

У світовій інженерній практиці одна з основних задач це управління складним технологічним обладнанням, які передбачають складні траєкторії і комбінації рухів виконавчого органу. Багатофункціональні виробничі системи з механізмами паралельної структури є прогресивно формою організації виробництва, що забезпечує ефективну роботу при обмеженій кількості виробничого персоналу.

Каркасні багатоприводні установки є універсальними в ефективному вирішенні багатьох промислових задач. У процесі вибору конструктивної схеми чи компоновки такого обладнання виникають складнощі, пов'язані з розташуванням приводів. Щоб ефективно виконувати поставлені цілі, такі установки мають бути обладнані сучасними комп'ютеризованими системами керування.

В проектуванні каркасних установок виконується аналіз кінематичних закономірностей для обраної конструкції, а саме: діапазони переміщення та плани швидкостей рухомих елементів конструкції.

Одним з таких механізмів є каркасна установка паралельної структури, яка розроблена і сконструйована в Херсонському національному технічному університеті (рис.1) [1].



Рисунок 1 – Загальний вигляд установки каркасної конструкції

Рух платформи з робочим інструментом здійснюється у вертикальній площині і визначається рухом окремих вузлів уздовж напрямних штанг, який забезпечується роботою окремих двигунів. Кінематична схема симетричною каркасної конструкції з двома направляючими стрижнями показана на рис. 2.

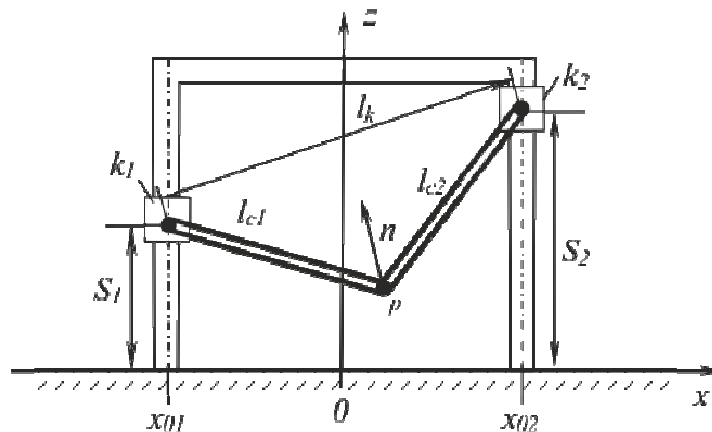


Рисунок 2 – Кінематична схема каркасної конструкції

Геометричні розміри елементів установки задаються на стадії проектування і виготовлення l_{c1} , l_{c2} - довжини стрижнів (балкових еле-

ментів), c_1, c_2 площадки P , на якій встановлюється робочий інструмент; Відомими вважаються відстань між опорами $d = -x_{01} = x_{02}$, а також початкові положення S_{01} і S_{02} кареток k_1 і k_2 .

Механічна підмодель дозволяє визначити положення центру майданчика, кут відхилення нормалі від вертикальної осі, а також зв'язки координат конструкції [2]. Якщо припустити, що довжини стрижнів рівні, тобто $l_{c1} = l_{c2} = l$, рівняння зв'язку між координатами (x, z) та переміщенням кареток (S_1, S_2) приймають вигляд

$$\begin{cases} x = \frac{1}{2} \cdot (S_2 - S_1) \cdot \sqrt{\frac{(S_2 - S_1)^2 - 4 \cdot l^2 + d^2}{(S_2 - S_1)^2 + d^2}}, \\ z = \frac{1}{2} \cdot \left(S_2 + S_1 - d \cdot \sqrt{\frac{(S_2 - S_1)^2 - 4 \cdot l^2 + d^2}{(S_2 - S_1)^2 + d^2}} \right). \end{cases} \quad (1)$$

Систему диференціальних рівнянь, що описують рух маніпулятора з голономним зв'язком, отриманих за допомогою рівнянь Лагранжа [3, 4] з невизначеними множниками, можна записати в наступному вигляді:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = \frac{F_1}{m} \cdot \sin^2 \alpha_1 + \frac{F_2}{m} \cdot \sin^2 \alpha_2, \\ \dot{x}_3 = x_4, \\ \dot{x}_4 = \frac{F_1}{m} \cdot \sin \alpha_1 \cdot \cos \alpha_1 + \frac{F_2}{m} \cdot \sin^2 \alpha_2 \cdot \cos \alpha_2. \end{cases}, \quad (2)$$

де введені позначення, $x_1 = x_2$; $x_3 = z$; F_1, F_2 – сили в ланках маніпулятора. В даному випадку ставиться задача визначення функцій $x_{2S-1}(t)$, $S=1,2$ переводять схват маніпулятора з початкового положення в кінцевий за час T , що мінімізує функціонал:

$$J = \int_0^T \left[\dot{x}_2^2 + \dot{x}_4^2 \right] dt \rightarrow \min. \quad (3)$$

Шукані функції повинні відповідати таким граничним умовам: $x_{2S-1}(0) = x_{2S-1,0}$ і $x_{2S-1}(T) = x_{2S-1,T}$ значення якої невідомо, а також

$x_{2s}(0) = x_{2s}(T) = 0$. Необхідні умови оптимальності можна записати наступним чином

$$\frac{\partial H}{\partial F_k} = 0 \quad (4)$$

де гамільтоніан H дорівнює

$$H = -\frac{1}{2}\dot{x}_2^2 - \frac{1}{2}\dot{x}_4^2 + \lambda_1 x_2 + \lambda_2 \dot{x}_2 + \lambda_3 x_4 + \lambda_4 \dot{x}_4 \quad (5)$$

Множники λ_n визначаються рівностями

$$\dot{\lambda}_n = -\frac{\partial H}{\partial x_n}, n = 1, 2, 3, 4 \quad (6)$$

Далі гамільтониан приводиться (5) до виду

$$H = \left(\frac{1}{2}\dot{x}_2^2 - \ddot{x}_2 x_2 \right) + \left(\frac{1}{2}\dot{x}_4^2 - \ddot{x}_4 x_4 \right) \quad (7)$$

Оскільки гамільтоніан не залежить від часу, він постійний і

$$\frac{dH}{dt} = \ddot{x}_2 x_2 + \ddot{x}_4 x_4 = 0$$

Даному рівнянню задовольняє рішення

$$\ddot{x}_1 = C_{11}; \ddot{x}_3 = C_{13}; \quad (8)$$

Для $x_k(t), k = 1, 3$ з урахуванням граничних умов маємо

$$x_k(t) = \frac{-2[x_k(T) - x_k(0)]}{T^3} t^3 + \frac{3[x_k(T) - x_k(0)]}{T^2} t^2 + x_k(0) \quad (9)$$

і після інтегрування отримуємо

$$\varphi(t) = \frac{\varphi(T)}{6T^3} t^3 - \frac{1}{4T^2} \varphi(T) t^2 + \varphi(0) \quad (10)$$

Далі при $t = T$ можна визначити невідоме значення кута повороту в кінцевий момент часу $\varphi(t)$.

Висновки. Представлені методи дозволяють оптимізувати роботу багатоприводної установки, збільшити швидкість і мінімізувати динамічні помилки при розробці програмних рухів. Було отримано система диференціальних рівнянь, що описують рух маніпулятора, знайдені за допомогою рівнянь Лагранжа. Рівняння динаміки для багатоприводних систем були проаналізовані.

ЛІТЕРАТУРА / LITERATURE

1. Лебеденко Ю.О. Інформаційно-вимірювальна підсистема багатоприводної каркасної установки з механізмами паралельної структури / Ю.О. Лебеденко, А.А. Омельчук, О.О. Сафьяник // Вісник Херсонського національного технічного університету. Вип. 3(62). Т.1. – Херсон: ХНТУ, 2017. – С. 317 – 322.
2. Рудакова Г.В. Розробка спеціалізованого програмного забезпечення для проектування каркасних установок з механізмами паралельної структури / Г.В. Рудакова, С.А. Русанов, С.В. Ревенко // Вісник Херсонського національного технічного університету. – 2017. – № 4. – С. 181-187.
3. Дьяшкин-Титов В.В. Задача оптимального управління перемещением схвата манипулятора-трипода [Текст] / В.В. Дьяшкин-Титов, В.Е. Павловский // Известия нижеволжского агроуниверситетского комплекса - № 4 (36), 2014, – С. 1 – 6.
4. Красовский А.А. Справочник по теории автоматического управления / А.А. Красовский – М.: Наука. Гл. ред. физ. -мат. лит. , 1987. –712 с.

REFERENCES

1. Lebedenko Yu.O. Information-measuring subsystem of multi-drive frame installation with mechanisms of parallel structure / Yu. Lebedenko, A.A. Omelchuk, O.O. Safyanik // Bulletin of the Kherson National Technical University. No. 3 (62). T.1. - Kherson: KhNTU, 2017. - pp. 317 - 322.
2. Rudakova G.V. Development of specialized software for the design of frame installations with mechanisms of parallel structure / G.V. Rudakova, S.A. Rusanov, S.V. Revenko // Bulletin of the Kherson National Technical University. - 2017. - № 4. - pp. 181-187.
3. Dyashkin-Titov VV The problem of optimal control of the movement of the grip of the manipulator-tripod [Text] / V.V. Dyashkin-Titov, V.E. Pavlovsky2 // Proceedings of the Lower Volga agro-university complex - No. 4 (36), 2014, - pp. 1 - 6.
4. Krasovsky A.A. Reference on the theory of automatic control / A.A. Krasovsky - M.: Science. Ch. ed. physical -mat. lit. , 1987. –712 p.

Received 04.03.2020.
Accepted 10.03.2020.

**Оптимальное управление многоприводной системой каркасной установки
параллельной конструкции**

Статья описывает каркасную установку параллельной конструкции. Приведены формулы механики и движения каркасной установки. С помощью зависимостей определены положения центра платформы, угол отклонения нормы от вертикальной оси, описаны соотношения координат структуры. Проанализированы уравнения динамики для многоприводных систем. С помощью уравнений Лагранжа получена система дифференциальных уравнений, описывающих оптимальное по отклонению от заданой траектории движение манипулятора.

Optimal control of the multi-drive system framework installation of parallel construction

The article is devoted to solving the problem of managing complex technological equipment, which includes complex trajectories and combinations of movements of the executive body. Multifunctional production systems with parallel structure mechanisms are a progressive form of production organization that ensures efficient operation with a limited number of production personnel.

Multipurpose frame installations are versatile in the efficient solution of many industrial problems. When choosing a design or layout of such equipment, there are difficulties associated with the location of the actuators. To achieve these goals effectively, such installations must be equipped with modern computerized control systems.

In the design of frame installations, kinematic regularities are analyzed for the selected structure, namely: displacement ranges and velocity plans of moving structural elements.

The article describes the frame installation of parallel construction that designed in Kherson National Technical University. The movement and mechanics of this device are disassembled. The movement of the platform with a working tool, which is determined by the movement of individual nodes along the guide rods, which is provided by the operation of individual engines.

The mechanical submodel allows to determine the position of the center of the site, the angle of deviation of the normal from the vertical axis, as well as the relationship of the coordinates of the structure.

The limiting possibilities of movement of the working body can be estimated on the basis of the solution of the direct kinematics problem, and in order to find the ranges of change of the parameters of operation of individual actuators (limiting speeds and accelerations) it is necessary to solve the inverse kinematics problem.

Formulas for mechanics and movement of this device are given. By means of dependencies the positions of the center of the platform are determined, the angle of deviation of the normal from the vertical axis. Relations of the coordinates of the structure were also described. Dynamics equations for multi-drive systems were analyzed. A system of differential equations describing the motion of a manipulator obtained using Lagrange equations was obtained.

Ревенко Сергій Володимирович - Херсонський національний технічний університет, аспірант кафедри автоматизації, робототехніки та мехатроніки.

Тоуфак Едмонд Родріг - Херсонський національний технічний університет, аспірант кафедри автоматизації, робототехніки та мехатроніки.

Лебеденко Юрій Олександрович - к.т.н., доцент, Херсонський національний технічний університет, доцент кафедри автоматизації, робототехніки та мехатроніки.

Ревенко Сергей Владимирович - Херсонский национальный технический университет, аспирант кафедры автоматизации, робототехники и мехатроники.

Тоуфак Эдмонд Родриг - Херсонский национальный технический университет, аспирант кафедры автоматизации, робототехники и мехатроники.

Лебеденко Юрий Александрович - к.т.н., доцент, Херсонский национальный технический университет, доцент кафедры автоматизации, робототехники и мехатроники.

Revenko Serhii – Kherson National Technical University, Postgraduate Student, Department of Automation, Robotics and Mechatronics.

Tchoufack Edmond – Kherson National Technical University, Postgraduate Student, Department of Automation, Robotics and Mechatronics.

Lebedenko Yurii – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Kherson National Technical University, Associate Professor of the Department of Automation, Robotics and Mechatronics.

І.А. Соловйова, Ю.М. Николаєнко

ПРОГНОЗУВАННЯ ТОЧНОСТІ ТРУБ ПРИ БЕЗОПРАВОЧНОМУ ВОЛОЧІННІ

Анотація. Проведено дослідження технологічних параметрів виробництва труб з різних марок сталей при безоправочному волочінні. Визначені фактори, що впливають на зміну різностінності труб за допомогою кореляційно-регресійного аналізу та побудовані регресійні моделі. Результати досліджень впроваджені в розрахунки маршрутів та технологічних карт виробництва з метою прогнозування різностінності готових труб при волочінні та запровадженню скорочення витрат металу на виробництві.

Ключові слова: безоправочне волочіння, заготовка, труба, різностінність, обтиснення, регресійна модель, кореляційно-регресійний аналіз, ступінь тонкостінності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженню вдосконалення технології безоправочного волочіння присвячено багато наукових робіт сучасних вчених: Орлова Г.А, Каргіна Б.В., Окулова Р.А., Паршина С.В. та інших. Ці роботи спрямовані на вивчення:

- волочіння в блок волок;
- волочіння через волоку, що обертається;
- моделювання процесу волочіння.

У роботах вирішуються питання, що дозволяють збільшити ступінь деформації при волочінні, продуктивність, зв'язати зміни товщини стінки з енергосиловими параметрами процесів.

Деякі роботи В.А. Кочкина, М.З. Єрманка, М.М. Бернштейна, Ю.Ф. Шевакіна, А.Б. Ламіна присвячені інженерним методам розрахунку товщини стінки труби після волочіння в одну волоку та отримані деякі лінійні залежності зміни різностінності. У світі сучасних вимог до точності труб виникає інтерес до проблеми зміни різностінності труб після волочіння для прогнозування точності готових труб.

Мета дослідження. Метою даної роботи є дослідження впливу технологічних параметрів безправочного волочіння труб з різних марок сталей та визначення факторів, що впливають на зміну різностінності труб за допомогою кореляційно-регресійного аналізу.

Викладення основного матеріалу дослідження. Безправочному волочіння піддають труби після короткооправочного волочіння або прокатки на станах ХПТ або ХПТР, тобто труби, які мають певну різностінність.

З метою оцінки точності труб після безправочного волочіння були спроектовані та досліджені технологічні маршрути виробництва труб з різних марок сталей. За розробленими маршрутами за технологією виробництва протягалися партії труб [1], від кожної партії відбиралися зразки і проводилися виміри товщини стінки в рівновіддалених точках поперечного перерізу труби.

Для кожного проходу волочіння розраховані:

- абсолютна $\Delta t = t_{\max} - t_{\min}$ і відносна різностінність заготовки $\delta_0 = \frac{\Delta t_0}{t_{0cp}}$ і готової труби $\delta = \frac{\Delta t}{t_{cp}}$;
- коефіцієнт обтиснення по діаметру $\frac{D_0}{D}$;
- ступінь тонкостінності $\frac{t_0}{D_0}$;
- ступінь деформації ε ;
- коефіцієнт зміни різностінності $k = \frac{\delta}{\delta_0}$.

За результатами вимірювань виконаний кореляційно-регресійний аналіз, визначені фактори, що впливають на зміну різностінності і побудовані регресійні моделі [1].

Інтервали варіювання вихідними даними наведені в таблиці 1.

Інтервали варіювання вихідних даних для аналізу

Параметр	Діапазон варіювання параметру	
	нержавіючі сталі	вуглецеві сталі
$\delta_0, \%$	0,80 ... 13,5	1,2 ... 16,5
$\frac{D_0}{D}$	1,12 ... 1,5	1,05 ... 1,6
$\frac{t_0}{D_0}$	0,05 ... 0,235	0,02 ... 0,21
D_0	10, 16, 25, 36	
t_0	0,97 ... 3,0	

Як впливає з визначення при $k < 1$ різностінність зменшується, при $k > 1$ різностінність готової труби більше різностінності заготовки.

Значимість коефіцієнтів отриманих рівнянь оцінювалася за критерієм Стюдента, а адекватність моделі за критерієм Фішера. Отримані моделі є адекватними і зі значимими коефіцієнтами [1]. Наприклад, моделі для наступних сталей мають вигляд:

- для сталі 08X22H6T

$$k = 1,681 + \frac{3,304}{\delta_0} - 0,522 \frac{D_0}{D} - 10,110 \frac{t_0}{D_0} + 29,128 \left(\frac{t_0}{D_0} \right)^2 - 0,003\varepsilon;$$

- для сталі 06ХН28МДТ:

$$k = 1,126 + \frac{3,015}{\delta_0} - 1,177 \frac{D_0}{D} + 8,097 \frac{t_0}{D_0} - 27,980 \left(\frac{t_0}{D_0} \right)^2 - 0,003\varepsilon;$$

- для сталі 10

$$k = 1,974 + \frac{2,324}{\delta_0} - 0,718 \frac{D_0}{D} - 8,442 \frac{t_0}{D_0} + 23,616 \left(\frac{t_0}{D_0} \right)^2 - 0,003\varepsilon.$$

Таким чином прогнозуючи очікувану поперечну різностінність готової труби після безоправочного волочіння можна використовувати регресивну залежність:

- для сталі 08X22H6T

$$\delta_{s1} = 3,304 + \delta_{s0} \left(1,681 - 0,522 \frac{D_0}{D} - 10,110 \frac{t_0}{D_0} + 29,128 \left(\frac{t_0}{D_0} \right)^2 - 0,003\varepsilon \right);$$

- для сталі 10

$$\delta_{s1} = 2,324 + \delta_{s0} \left(1,974 - 0,718 \frac{D_0}{D} - 8,442 \frac{t_0}{D_0} + 23,616 \left(\frac{t_0}{D_0} \right)^2 - 0,003\varepsilon \right),$$

де δ_{s0} – поперечна різностінність вихідної заготовки;

δ_{s1} – поперечна різностінність готової труби.

При аналізі отриманих залежностей [1, 3] можна зробити деякі висновки: чим пластичніший метал, тим менша зміна різностінності. Менш пластичні сталі мають більшу тенденцію до зміни різностінності. При малих значеннях δ_0 коефіцієнт k досягає величини 3,5, тобто різностінність збільшується в 3,5 рази, а при великих значеннях δ_0 інтенсивніше її виправлення.

Інтенсивність виправлення ($k < 1$) залежить від коефіцієнта обтиснення по діаметру $\frac{D_0}{D}$: чим більше значення $\frac{D_0}{D}$, тим інтенсивніше виправлення різностінності. Тобто з метою виправлення різностінності ($\delta_0 > 4\%$) при безоправочному волочінні необхідно збільшувати коефіцієнт витяжки.

Залежність зміни різностінності від відносного обтиснення по діаметру та від ступеню тонкостінності наведена на рисунках 1 та 2 для сталі 08X22H6T.

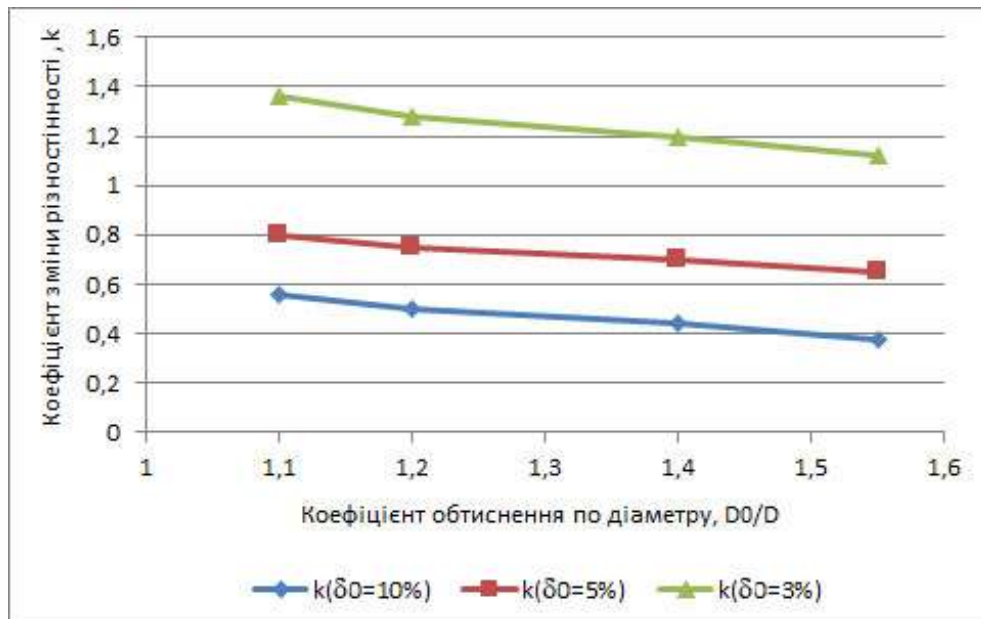


Рисунок 1 – Залежність зміни різностінності від обтиснення по діаметру (сталі 08X22H6T)

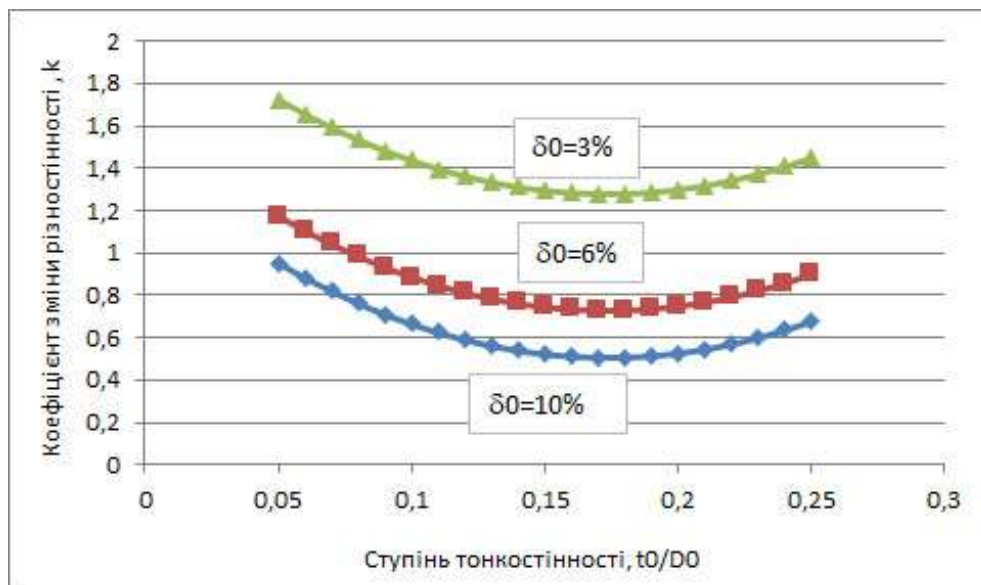


Рисунок 2 - Залежність коефіцієнта зміни різностінності від ступеня тонкостінності (сталі 08X22H6T)

Висновок. Результати досліджень впроваджені в розрахунки маршрутів та технологічних карт виробництва [2] з метою прогнозування різностінності готових труб при волочінні та запровадженню скорочення витрат металу на виробництві.

ЛІТЕРАТУРА / LITERATURE

1. Соловьева И.А. Разработка многовариантной технологии, исследование и внедрение рациональных режимов производства холоднодефор-

мированих труб: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05 / Соловьева Инна Анатольевна. – Днепропетровск, 1987. – 200 с.

2. Соловйова, І.А. Проектування комбінованих маршрутів виробництва холоднодеформованих труб / І.А. Соловйова, В.Ф. Балакін, Ю.М. Ніколаєнко, К.С. Білан // Системні технології. – 2017. – № 4. – С. 56-62.

3. Кучеренко В.Р. Анализ существующих режимов деформации при волочении и разработке рекомендаций по их оптимизации: Отчет о НИР / В.Р. Кучеренко, Е.В. Кондратьев, И.А. Соловьева. – Днепропетровск: ДМетИ, 1976. – 91 с.

REFERENCES

1. Solovyova I.A. Development of multivariate technology, research and implementation of rational production modes of cold-deformed pipes: dis. ... cand. tech. Sciences: 05.16.05 / Soloveva Inna Anatolevna. - Dnepropetrovsk, 1987. - 200 p.

2. Solovyova I.A. Designing of combined routes of production of cold-deformed pipes / I.A. Solovieva, V.F. Balakin, Yu.M. Nykolayenko, K.S. Bilan // System technologies. - 2017. - № 4. - P. 56-62.

3. Kucherenko V.R. Analysis of existing deformation modes during drawing and development of recommendations for their optimization: Research report / V.R. Kucherenko, E.V. Kondratiev, I.A. Solovyova. - Dnepropetrovsk: DMetI, 1976. - 91 p.

Received 03.03.2020.

Accepted 10.03.2020.

Прогнозування точності труб при безправочному волочінні

Безправочному волочіння піддають труби після короткоправочного волочіння або прокатки на станах ХПТ або ХПТР, тобто труби, які мають певну різностінність.

З метою оцінки точності труб після безправочного волочіння були спроектовані і досліджені технологічні маршрути виробництва труб з різних марок сталей. За розробленими маршрутами за технологією виробництва протягалися партії труб, від кожної партії відбиралися зразки і проводилися виміри товщини стінки в рівновіддалених точках поперечного перерізу труби.

Для кожного проходу волочіння розраховані: абсолютна і відносна різностінність заготовки і готової труби, коефіцієнт обтиснення по діаметру, ступінь тонкостінності, ступінь деформації, коефіцієнт зміни різностінності.

За результатами вимірювань виконаний кореляційно-регресійний аналіз, визначені фактори, що впливають на зміну різностінності та побудовані регресійні залежності прогнозування очікування поперечної різностінності труб при безправочному волочінні.

При аналізі отриманих залежностей можна зробити наступні висновки: чим пластичніший метал, тим менше зміна різностінності. Менш пластичні сталі мають більшу тенденцію до зміни різностінності.

Інтенсивність виправлення ($k < 1$) залежить від коефіцієнта обтиснення по діаметру - чим більше значення його значення, тим інтенсивніше виправлення різностінності. Тобто з метою виправлення різностінності ($\delta_0 > 4\%$) при безправочному волочінні необхідно збільшувати коефіцієнт витяжки.

Висновок. Результати досліджень впроваджені в розрахунки маршрутів та технологічних карт виробництва з метою прогнозування різностінності готових труб при волочінні та запровадженню скорочення витрат металу на виробництві.

Predicting the accuracy of pipes at sinking

Sinking is subjected to pipes after short-term drawing or rolling on cold rolling mills or roll rolling mills, ie pipes having a certain difference.

In order to assess the accuracy of pipes after sinking, technological routes of pipe production from different grades of steel were designed and investigated. According to the developed routes by the production technology, batches of tubes were drawn, samples were taken from each batch and wall thickness measurements were made at equally distant points of pipe cross-section.

For each passage of the drawing are calculated: absolute and relative difference of the work piece and the finished pipe, the coefficient of compression in diameter, the degree of thinness, the degree of deformation, the coefficient of change of the difference.

According to the results of measurements, correlation-regression analysis was performed, factors influencing the variation of difference were determined, and regression dependencies of the prediction of the expectation of the transverse difference of pipes at the block were constructed.

In the analysis of the dependences obtained, we can draw the following conclusions: the more plastic the metal, the smaller the difference in difference. Less plastic steels tend to change in diversity.

The intensity of the correction ($k < 1$) depends on the compression ratio in diameter - the greater the value of its value, the more intense the correction of the difference. That is, in order to correct the difference ($\delta_0 > 4\%$) at sinking, it is necessary to increase the coefficient of drawing.

Conclusion. The results of the researches are incorporated into the calculations of routes and technological maps of production in order to predict the difference of finished pipes during drawing and to introduce a reduction of metal costs in production.

Соловьева Инна Анатольевна - к.т.н., доцент кафедры технологического проектирования Национальной металлургической академии Украины.

Николаенко Юлия Николаевна - старший преподаватель кафедры технологического проектирования Национальной металлургической академии Украины.

Соловйова Інна Анатоліївна - к.т.н., доцент кафедри технологічного проектування Національної металургійної академії України.

Николаєнко Юлія Миколаївна - старший викладач кафедри технологічного проектування Національної металургійної академії України.

Solovyova Inna - Ph.D., Associate Professor, Department of Technological Design of the National Metallurgical Academy of Ukraine.

Nykolayenko Yulia - Senior Lecturer of the Department of Technological Design of the National Metallurgical Academy of Ukraine.

А.Н. Хомченко, О.І Литвиненко, І.О. Астіоненко

НЕСТАНДАРТНА МОДЕЛЬ ТРИКУТНОГО СКІНЧЕННОГО ЕЛЕМЕНТА T7

Анотація. У роботі розглянуто трикутник T7, який має сім вузлів (три вузли у вершинах, три вузли на серединах сторін і один вузол у барицентрі). В математиці T7 використовують у якості обчислювального шаблону для наближеного інтегрування у трикутних областях. Зустрічається трикутник T4, який також використовують у якості обчислювального шаблону. Між іншим, трикутник (двовимірний симплекс) – невичерпне джерело нових результатів. Засновник сучасного і дуже ефективного методу скінченних елементів (МСЕ) Р. Курант реалізував свої геніальні ідеї саме на трикутниках (трикутник Куранта, комірка Куранта). Але не всі трикутники здатні виконувати подвійну роль: обчислювального шаблону і скінченного елемента. До скінченних елементів вимоги більш жорсткі, наприклад, залежність між порядком елемента і кількістю вузлів, необхідних для поліноміальної інтерполяції. Ось чому серед трикутних СЕ зустрічаються тільки члени арифметичного ряду «трикутних» чисел Піфагора: T3, T6, T10... Ми переконалися, що T7, як і стандартний T10, може виконувати подвійну роль, а порушення міжелементної неперервності (несумісність) на границі з трикутним T6 або квадратним Q8 не має небажаних наслідків. Модель T7 успішно витримує кускове тестування. При цьому «дута» мода T7 відкриває можливості генерувати шляхом конденсації безліч альтернативних моделей T6.

Ключові слова: трикутник T7, нестандартна модель, обчислювальний шаблон, скінченний елемент, кускове тестування.

Постановка проблеми. Особливість трикутних СЕ полягає в тому, що існує тісний зв'язок між порядком елемента n і кількістю S необхідних для інтерполяції вузлів. Ця формула $S = \frac{1}{2}(n+1)(n+2)$ відома з часів Піфагора. Вона зустрічається в роботах Ньютона (біном), Паскаля (трикутник). Цікаво, що графічні зображення «трикутних» чисел без будь-якої зміни потрапили у 20 століття і використовуються у якості носіїв фінітних функцій МСЕ. Цей популярний метод починався у 1943 році саме з трикутників. Рівень популярності трикутних СЕ не спадає. Сьогодні у

комбінації з квадратними СЕ трикутники використовують у приграничній смужці областей з криволінійними границями. Назвемо три перші моделі трикутних СЕ: Т3 (три вузли у вершинах трикутника), Т6 (три вузли у вершинах, три вузли на серединах сторін), Т10 (три вузли у вершинах, шість вузлів у точках трисекції сторін, один вузол у барицентрі). Внутрішні вузли виникають природним шляхом, як «трикутні» числа Піфагора. Ставлення фахівців до внутрішніх вузлів залежить від того, з якою метою створюється модель. Якщо трикутник виконує роль СЕ, внутрішні вузли небажані. Щоб виключити внутрішні параметри, вигадали процедуру конденсації (редукції). Якщо трикутник виконує роль обчислювального шаблону для чисельного інтегрування, наявність внутрішнього вузла (у барицентрі) позитивно впливає на точність обчислень. Мова йде про відомі шаблони Т4, Т7, Т10. До речі, модель Т10 успішно виконує подвійну роль. Цікава проблема стосується дослідження можливості подвійного використання трикутника Т7. Якщо ансамблювання СЕ не передбачається (трикутний суперелемент), достатньо сконструювати базис, який задовольняє інтерполяційній гіпотезі Лагранжа. Якщо передбачається ансамблювання, треба шляхом кускового тестування дослідити поведінку базису Т7 на границі з трикутником Т6 або квадратом Q8. Саме цим проблемам присвячена стаття.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Трикутник, як двовимірний симплекс, вважається найбільш розповсюдженим СЕ. Одна із причин цього в тому, що будь-яку область у двовимірному просторі можна апроксимувати багатокутниками, які завжди можна розбити на трикутники. Крім того, повним поліномом порядку n можна скористатися для інтерполяції функції $f(x, y)$ за відомими значеннями у $\frac{1}{2}(n+1)(n+2)$ симетрично розташованих вузлах трикутника. Стандартні моделі трикутників різних порядків можна знайти у книгах [1–3]. Вперше кусково-лінійні функції на трикутнику були запропоновані Курантом (1943). Пізніше їх незалежно досліджував Тернер. Ці моделі іноді називають трикутниками Куранта-Тернера [4]. Проблеми конструювання несумісних моделей висвітлює автор [5]. Інформацію про кускове тестування можна

знайти у роботах [1, 4, 6, 7]. Про процедуру конденсації (редукції) на T10 (рецепт Сьярле-Рав'яра, 1972) нагадують автори [1].

Мета дослідження. Метою дослідження є конструювання поліноміального базису нестандартного елемента T7, визначення спектра еквівалентних вузлових навантажень від одиничної масової сили, виконання кускового тестування на міжелементну неперервність на границі із стандартними CE: T6 або Q8, генерування модельного ряду альтернативних T6.

Викладення основного матеріалу дослідження. Основний матеріал краще починати з арифметичного ряду і трикутних чисел Піфагора (рис. 1).

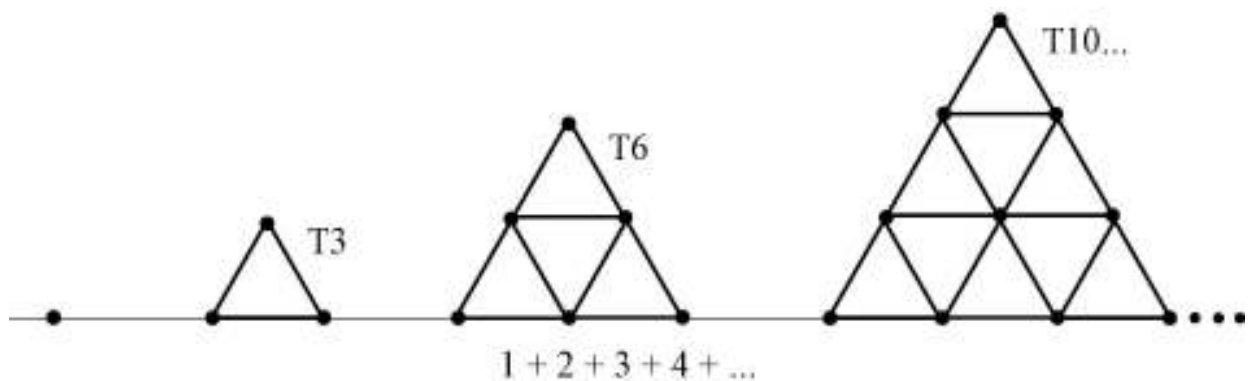


Рисунок 1 - Трикутні числа Піфагора (трикутні CE)

Саме ці трикутники тепер використовують у якості скінченних елементів (CE). Перші носії фінітних функцій сучасного методу скінченних елементів (МСЕ) мали трикутну форму. Трикутні CE і сьогодні вважаються найбільш корисними, особливо в задачах з криволінійними границями розрахункових областей. Від порядку елемента n залежить кількість необхідних вузлів k :

$$k = \frac{(n+1)(n+2)}{2}. \quad (1)$$

Правило (1) дає можливість зрозуміти, чому серед трикутників Піфагора, а також серед трикутних CE не зустрічаються, наприклад, T4 або T7. Між іншим, T4 і T7 часто використовують в обчислювальній математиці у якості шаблонів для кубатурних формул. Цікаве спостереження: в МСЕ внутрішні вузли елементів небажані. Для їх виключення навіть

вигадали спеціальну процедуру конденсації (редукції) [1]. А в обчислювальних шаблонах кубатур, навпаки, внутрішні вузли відіграють провідну роль. Як бачимо, модель T10 має подвійне призначення. Нижче ми спробуємо сконструювати модель T7 із подвійним призначенням. Головна проблема, як завжди в МСЕ, побудувати базисні функції (функції впливу) моделі T7. Як відомо [1-3], базисні функції трикутних SE вищих порядків зручно виражати через барицентричні координати симплексу T3, тобто через базис першого порядку. Барицентричні координати можна виразити через декартові координати, наприклад,

$$L_1(x, y) = \frac{1}{2S} \begin{vmatrix} 1 & x & y \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix}, \text{ де } S = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & x & y \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix} - \text{площа трикутника.} \quad (2)$$

Аналогічно, для $L_2(x, y)$, $L_3(x, y)$ шляхом циклічної перестановки індексів.

На рис. 2 а зображено типовий трикутний елемент T3 (симплекс), на рис. 2, б – нестандартний T7.

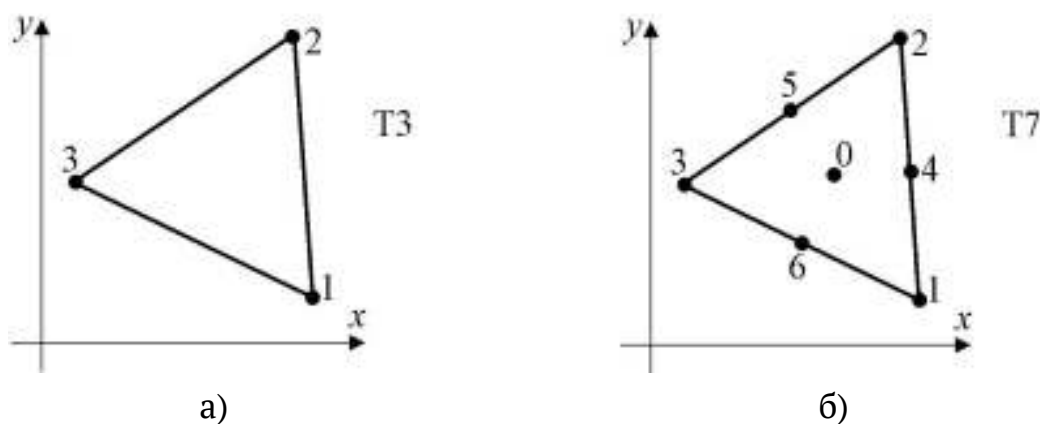


Рисунок 2 - Трикутні елементи у площині (x, y)

Неважко переконатися, що функції $L_i(x, y)$ є інтерполяційними для T3. Вони задовольняють вимогам інтерполяційної гіпотези Лагранжа:

$$L_i(x, y) = \begin{cases} 1, & i = j, \\ 0, & i \neq j, \end{cases} \quad 0 \leq L_i(x_i, y_i) \leq 1, \quad \sum_{i=1}^3 L_i(x, y) = 1. \quad (3)$$

де i – номер функції, j – номер вузла.

За допомогою суперпозиції лінійних функцій $L_i(x, y)$ можна сконструювати базисні функції $N_i(x, y)$ елементів вищих порядків. Наприклад, для Т6 базис має вигляд [1]:

$$\begin{aligned} N_1(x, y) &= L_1(2L_1 - 1), \text{ аналогічно для } i = 2, 3; \\ N_4(x, y) &= 4L_1 L_2, \text{ аналогічно для } i = 5, 6. \end{aligned} \quad (4)$$

Зауважимо, що базис (4) реалізує неприродний спектр еквівалентних вузлових навантажень від одиничної масової сили. Зазвичай, вузлові навантаження γ_i обчислюють за формулою Ньютона-Котеса:

$$\gamma = \frac{1}{S} \iint_D N_i(x, y) dS.$$

Інтегрування у барицентричних координатах виконується за правилом [1–3]:

$$\gamma_i = \frac{1}{S} \iint_D L_1^a L_2^b L_3^c dS = \frac{2a!b!c!}{(a+b+c+2)!}. \quad (5)$$

Таким чином, для моделі Т6 маємо:

$$\gamma_i = 0, \quad i = 1, 2, 3; \quad \gamma_i = \frac{1}{3}, \quad i = 4, 5, 6. \quad (6)$$

Для створення кубатури такий розподіл вагових коефіцієнтів не ефективний, тому що із шести вузлів половина не працює. Це одна із причин нашої уваги до моделі Т7. Навіть, якщо модель Т7 буде непридатною у якості скінченного елемента, можна сподіватися, що «дута» мода забезпечить побудову модельного ряду обчислювальних шаблонів Т6 з фізично адекватними ваговими коефіцієнтами (на замовлення).

Покажемо інтерполяційний базис для Т7 (рис. 2, б):

$$\begin{aligned} N_0(x, y) &= 27L_1 L_2 L_3, \\ N_1(x, y) &= \frac{1}{2}(6L_1^3 - 5L_1^2 + L_1), \text{ аналогічно для } i = 2, 3; \end{aligned} \quad (7)$$

$$N_4(x, y) = 4(L_1 L_2 - 3L_1 L_2 L_3), \text{ аналогічно для } i = 5, 6.$$

За формулою (5) отримаємо спектр вузлових навантажень

$$\gamma_0 = \frac{27}{60}, \quad \gamma_i = \frac{3}{60}, \quad i = 1, 2, 3; \quad \gamma_i = \frac{8}{60}, \quad i = 4, 5, 6.$$

Цей трикутник несумісний з Т6 і квадратом Q8, тому що на границі спостерігається порушення неперервності. Далі ми покажемо, що Т7 успішно витримує кускове тестування [6, 7], тому небажаних наслідків немає. Інтерполянт, що відновлює функцію $f(x, y)$ на трикутнику Т7, має вигляд:

$$f(x, y) = \sum_{i=0}^6 N_i(x, y) f_i,$$

де f_i – відомі аплікати поверхні $z = f(x, y)$.

Тепер запишемо кубатуру для наближеного обчислення подвійних інтегралів на трикутних областях

$$\iint_D f(x, y) dS \approx S \left(\frac{9}{20} f_0 + \frac{1}{20} \sum_{i=1}^3 f_i + \frac{2}{15} \sum_{i=4}^6 f_i \right).$$

Цю формулу можна підтвердити методом невизначених коефіцієнтів [8]. Поступово з'являється довіра до нового базису (7). Далі ми покажемо, як звільнитися від внутрішнього вузла та перетворити Т7 у Т6. У 1972 р. Сьярле і Рав'яр [1] перетворили Т10 у Т9, але не помітили, що «рецепт» конденсації має бути не тільки математично обґрунтованим, але і фізично адекватним. Ми пропонуємо просту процедуру нематричної конденсації, яка дозволяє замовляти спектр вузлових навантажень моделі Т6. Позначимо через \overline{N}_i базисну функцію нової моделі Т6. Нову функцію зручно конструювати як лінійну комбінацію функцій Т7:

$$\overline{N}_i = N_i + \alpha \cdot N_0. \quad (8)$$

Щоб визначити коефіцієнт α , запишемо відповідну залежність між вузловими навантаженнями: $\overline{\gamma}_i = \gamma_i + \alpha \cdot \gamma_0$.

Після цього повертаємось до залежності (8). Наприклад, цікаво дізнатися, яким буде новий базис Т6, якщо замовити відомий спектр (6). В цьому випадку для кутової функції

$$0 = \frac{3}{60} + \alpha \cdot \frac{27}{60}, \text{ звідки } \alpha = -\frac{1}{9}, \text{ тому}$$

$$\overline{N}_1 = \frac{1}{2} (6L_1^3 - 5L_1^2 + L_1) - \frac{1}{9} \cdot 27 \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot L_3 = L_1 \left(3L_1^2 - \frac{5}{2}L_1 + \frac{1}{2} \right) - 3L_1 \cdot L_2 \cdot L_3.$$

Для проміжної функції $\alpha = \frac{4}{9}$, тому

$$\overline{N}_4 = 4 \cdot L_1 \cdot L_2 - 12 \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot L_3 + \frac{4}{9} \cdot 27 \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot L_3 = 4 \cdot L_1 \cdot L_2 .$$

Таким чином, рельєф кутової поверхні став більш складним, проміжна поверхня не змінилася. Це означає, що міжелементну неперервність порушують лише кутові функції. Саме вони мають пройти перевірку шляхом кускового тестування. Нижче ми покажемо, що ці функції успішно витримують тестування як за версією Айронса-Раззака, так і за версією Паттерсона. Щоб збагатити інформацію про нематричну конденсацію, побудуємо математично обґрунтований і (головне) фізично адекватний спектр еквівалентних вузлових навантажень модифікованої моделі Т6.

Рецепт розподілу: $\gamma_0 = \frac{27}{60}$; по $\frac{2}{60}$ у кутові вузли $\left(\alpha = \frac{2}{27}\right)$, по $\frac{7}{60}$ у проміжні вузли $\left(\alpha = \frac{7}{27}\right)$. Спектр має вигляд: $\gamma_i = \frac{1}{12}$, $i = 1, 2, 3$; $\gamma_i = \frac{1}{4}$, $i = 4, 5, 6$. Такий спектр майже не відрізняється від емпіричного, який можна отримати в експериментах з блукаючими частинками і поглинаючими вузлами на границі Т6. Кускове тестування кутових поверхонь полягає у порівнянні поведінки N_i і \overline{N}_1 на границі, що проходить через вершину 1, наприклад 1–2. Феномен порушення міжелементної неперервності ілюструє рис. 3.

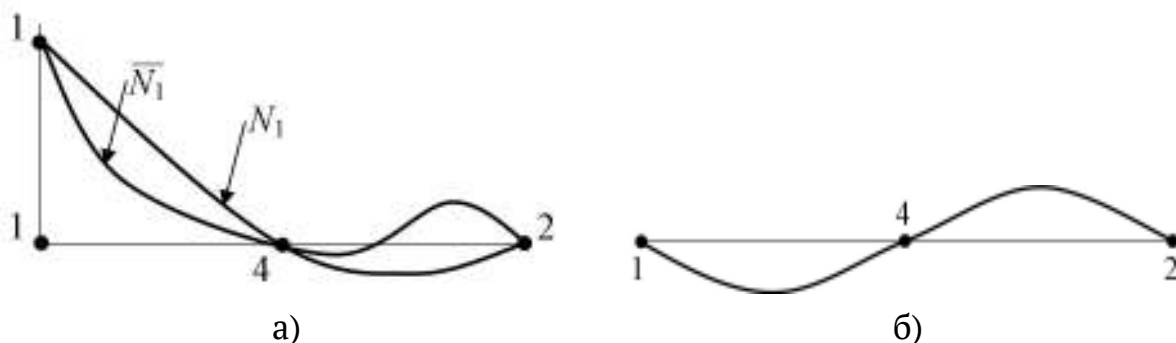


Рисунок 3 - а) параболи: квадратична N_i , кубічна \overline{N}_1 ;

б) стрибок $\varphi = \overline{N}_1 - N_i$

Як бачимо, (рис. 3, а) \overline{N}_1 змінюється за законом кубічної параболи, а N_i – за законом квадратичної параболи. Різниця $\varphi = \overline{N}_1 - N_i$ називається стрибком (рис. 3, б). За Айронсом-Раззаком [7] вважається, що мо-

дифікована модель успішно витримує тестування, якщо інтеграл від стрибка дорівнює 0. Стрибок змінюється за законом кубічної параболи із центром симетрії у вузлі 4. За Паттерсоном [6] вважається, що несумісна модель успішно витримує тестування, якщо стрибок на границі, як мінімум двічі, набуває значення 0. На рис. 3, б таких точок три.

Висновки. Вперше побудовано поліноміальний базис нестандартного трикутника T7. Доведено, що T7 можна використовувати не тільки як обчислювальний шаблон для наближеного інтегрування, а і як скінченний елемент (самостійно або в ансамблі з T6 і Q8). За допомогою T7 тепер можна генерувати множину нових моделей T6 із різними інтегральними характеристиками. Варто відзначити, що серед лагранжевих і серендипових трикутників ще не зустрічалися несумісні елементи. Отримані результати свідчать, що свідоме конструювання несумісних елементів – цікава і корисна справа. І, як це часто трапляється в математиці, ми отримали більше, ніж очікували.

ЛІТЕРАТУРА / LITERATURE

1. Mitchell A.R., Wait R. The finite Element Method in partial differential equations. – London: Wiley (1977).
2. Norrie D. H., de Vries G. An introduction to finite element analysis, Academic Press, N.Y. (1978).
3. Zienkiewicz O. C., Taylor R.L. The Finite Element Method. Fifth edition. Vol. 1. Bristol Printed and bound by MPG Books Ltd. Butterworth – Heinemann, (2000).
4. Strang G., Fix G. J. An Analysis of the finite element method, Prentice-Hall, INC, Englewood Cliffs, N.Y. (1973).
5. Broun J. H. Non-conforming finite elements and their applications. M.Sc. Thesis, Univ. of Dundee (1975).
6. Patterson C. Sufficient conditions for convergence in the finite element method for solution of finite energy, in: The Mathematics of Finite Elements and Applications. Academic Press (1973). – P. 213–224.
7. Irons B.M. The patch test for engineers / B.M. Irons // Proc. Finite Element Symp., Atleas Computer Lab., Chilton, Didcot, England, 26–28 march, 1974. – P. 171–192.

8. Марчук Г. И., Агошков В. И. Введение в проекционно-сеточные методы. – М. : Наука, 1981. 416 с.

REFERENCES

1. Mitchell A.R., Wait R. The finite Element Method in partial differential equations. – London: Wiley (1977).
2. Norrie D. H., de Vries G. An introduction to finite element analysis, Academic Press, N.Y. (1978).
3. Zienkiewicz O. C., Taylor R.L. The Finite Element Method. Fifth edition. Vol. 1. Bristol Printed and bound by MPG Books Ltd. Butterworth – Heinemann, (2000).
4. Strang G., Fix G. J. An Analysis of the finite element method, Prentice-Hall, INC, Englewood Cliffs, N.Y. (1973).
5. Broun J. H. Non-conforming finite elements and their applications. M.Cs. Thesis, Univ. of Dundee (1975).
6. Patterson C. Sufficient conditions for convergence in the finite element method for solution of finite energy, in: The Mathematics of Finite Elements and Applications. Academic Press (1973). – P. 213–224.
7. Irons B.M. The patch test for engineers / B.M. Irons // Proc. Finite Element Symp., Atleas Computer Lab., Chilton, Didcot, England, 26–28 march, 1974. – P. 171–192.
8. Marchuk G. I., Agoshkov V. I. Vvedenie v proektsionno-setochnyye metody. M.: Nauka, 1981. 416 s.

Received 10.03.2020.

Accepted 13.03.2020.

Нестандартная модель треугольного конечного элемента T7

Рассмотрен треугольник T7, который имеет семь узлов (три узла в вершинах, три узла на серединах сторон и один узел в барицентре). Показано, что T7, как и стандартный T10, может выполнять двойную роль: вычислительного шаблона и конечного элемента, а нарушение межэлементной непрерывности (несовместимость) на границе с треугольным T6 или квадратным Q8 не несет нежелательных последствий. Модель T7 успешно выдерживает кусочное тестирование. При этом «дуплая» мода T7 открывает возможность генерировать путем конденсации множество альтернативных моделей T6.

Non-standard model of triangular finite element T7

Triangular as a two-dimensional simplex is considered to be the most common FE. One of the reasons of this is that any area in two-dimensional space can be approximated by polygons, which can always be divided into triangles. The paper considers the triangle T7, which has seven nodes (three nodes in the points, three nodes in the middle of the sides and one node in the barycenter). In mathematics T7 is used as a computational template for approximate integration in triangular domains. There is a T4 triangle, which is also used as a computational template. The triangle (two-dimensional simplex) is an inexhaustible source of new results. The founder of the modern and very efficient finite element method (FEM) R. Courant implemented his brilliant ideas precisely on triangles (the Courant triangle, the Courant cell). But not all triangles can ful-

fil a dual role: both of a computational pattern and a finite element. The requirements for finite elements are stricter, for example, the relationship between the order of the element and the number of nodes required for polynomial interpolation. That is why among triangular FE there are only the members of the arithmetic series of "triangular" Pythagorean numbers: T3, T6, T10... For the first time the polynomial basis of the non-standard triangle T7 is constructed in the work. It is proved that T7, as well as standard T10, can be used not only as a computational template for approximate integration, but also as a finite element. If no SE ensemble is provided (a triangular super element), it is sufficient to construct a basis that satisfies the Lagrange interpolation hypothesis. If ensemble is envisaged the behavior of the T7 basis at the boundary with triangle T6 or square Q8 should be investigated by lump testing. Violation of inter-element continuity (incompatibility) at the boundary with triangular T6 or square Q8 has no undesirable effects. T7 model successfully withstands testing both according to Irons-Razzak and Patterson versions. In this case, the "blown" mode of T7 opens the possibility to generate by condensation many alternative models of T6 with different integral characteristics.

Хомченко Анатолий Никифорович - д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры интеллектуальных информационных систем Черноморского национального университета имени Петра Могилы (г. Николаев).

Литвиненко Елена Ивановна - К.т.н., доцент, доцент кафедры высшей математики и математического моделирования Херсонского национального технического университета.

Астионенко Игорь Александрович - к.ф.-м. н., доцент, доцент кафедры высшей математики и математического моделирования Херсонского национального технического университета.

Хомченко Анатолій Никифорович - д.ф.-м.н., професор, професор кафедри інтелектуальних інформаційних систем Чорноморського національного університету імені Петра Могили (м. Миколаїв).

Литвиненко Олена Іванівна - к.т.н., доцент, доцент кафедри вищої математики і математичного моделювання Херсонського національного технічного університету.

Астіоненко Ігор Олександрович - к.ф.-м. н., доцент, доцент кафедри вищої математики і математичного моделювання Херсонського національного технічного університету.

Khomchenko Anatoliy - doctor of physical and mathematical sciences, Professor, Professor of the Department of Intellectual Information Systems of the Petro Mogyla Black Sea National University.

Litvinenko Olena - Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Higher Mathematics and Mathematical Modelling of the Kherson National Technical University.

Astionenko Igor - Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Higher Mathematics and Mathematical Modelling of the Kherson National Technical University.

Л.М. Васильев, Д.Л. Васильев, Н.Г. Малич, А.Е. Назаров

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД

Аннотация. Разработана математическая модель разрушения цилиндрических образцов горных пород при наличии контактного трения. Разработан метод расчета предельного вертикального напряжения в вершине трещины и расчета предела прочности цилиндрических образцов горных пород с использованием трех показателей свойств (предел сопротивления материала сдвигу, угол внутреннего трения, коэффициент контактного трения), которые простыми способами могут быть установлены экспериментально в условиях горнорудных предприятий, где результаты расчета могут быть оперативно использованы для управления процессами дезинтеграции.

Ключевые слова: математическая модель разрушения, цилиндрические образцы горных пород, трещина, внутреннее трение, контактное трение.

Постановка проблемы и цель исследования. Для объяснения механизма разрушения горных пород широко применяется критерий Кулона максимальных эффективных касательных напряжений на линиях скольжения (ЛС). Теория Кулона [1–3] для связных сред основана на предположении, что сопротивление породы сдвигу на рассматриваемой наклонной площадке равна сумме сопротивления чистому сдвигу. и величины, пропорциональной нормальному напряжению на этой площадке, от внутреннего трения

$$|\tau_{\alpha}| = k_n + \mu \sigma_{\alpha} \quad (1)$$

или

$$\tau_e \geq k_n = |\tau_{\alpha}| - \mu \sigma_{\alpha}, \quad (2)$$

где τ_e – эффективные касательные напряжения на линиях скольжения, Па; k_n – предел прочности материала на сдвиг; μ – коэффициент внутреннего трения; τ_{α} – сопротивление породы сдвигу, Па; σ_{α} – нормальное напряжение на наклонной площадке, Па.

© Васильев Л.М., Васильев Д.Л., Малич Н.Г., Назаров А.Е., 2020

Из первого равенства следует, что разрушение не произойдет, если левая часть меньше правой. Для определения предела прочности пород σ (Па) на основании критерия при условии прямолинейности развития трещины - линии скольжения (ЛС) получена известная аналитическая формула [1,2,4 – 6]

$$\sigma = \frac{2k_n \cos \rho}{1 - \sin \rho}, \quad (3)$$

где ρ – угол внутреннего трения, рад.

Согласно формуле (3) предел прочности материала является постоянной величиной для любой точки на ЛС. При условии постоянства предельных вертикальных напряжений при равенстве $\tau_e = k_n$ (образование трещины) на траектории максимальных эффективных касательных напряжений (ТМЭКН) с появлением первой трещины происходило бы спонтанное разрушение тела. В реальных условиях это не происходит. Слоистые горные породы при наличии трещин несут определенную нагрузку [5]. Дело в том, что в процессе разрушения неизбежно участвует контактное трение и линии скольжения искривляются. При разрушении хрупких горных пород, обладающих внутренним и внешним трением, формула (3) существенно искажает конечный результат расчета напряжений в вершине трещины в образцах горных пород, да в целом, и в массиве. При наличии же контактных касательных напряжений, например от контактного трения, критерий Кулона предельного состояния соблюдается только локально, в вершине трещины. В остальных областях на ЛС материал находится в упругом состоянии, т.е. при $k < k_n$, где k – текущее значение сопротивления материала сдвигу на ЛС, Па.

Поэтому для слоистых материалов формула (3) неприменима. Это положение требует разработки нового подхода к описанию процесса локального разрушения слоистых горных пород. Должны быть приняты другие исходные условия, приближающие теорию к реальным процессам. Нужно в математической модели процесса учесть локальность разрушения материала.

Цель данной статьи – разработать математическую модель и вскрыть механизм локального разрушения горных пород.

Методика исследований. Известно, что при деформировании сплошных твердых тел образуется два вида линий скольжения. При превышении эффективными касательными напряжениями предельного значения сопротивления материала сдвигу k_n в какой-нибудь точке на ТМЭКН происходит образование трещины. При увеличении вертикального напряжения на части материала, не вышедшей из-под нагрузки, трещина получает развитие. Для иллюстрации изобразим образец породы в виде тела с выпуклыми боковыми поверхностями, нагруженного плитами прессы при наличии контактного трения между ними и образцом с распределением контактных напряжений по Прандтлю (рис. 1). Выпуклость возникает при продольном деформировании образца за счет удержания смещения верхних слоев материала у контактных поверхностей силами контактного трения, направленными против их поперечного скольжения [3]. Знаки касательных напряжений приняты согласно известным правилам знаков.

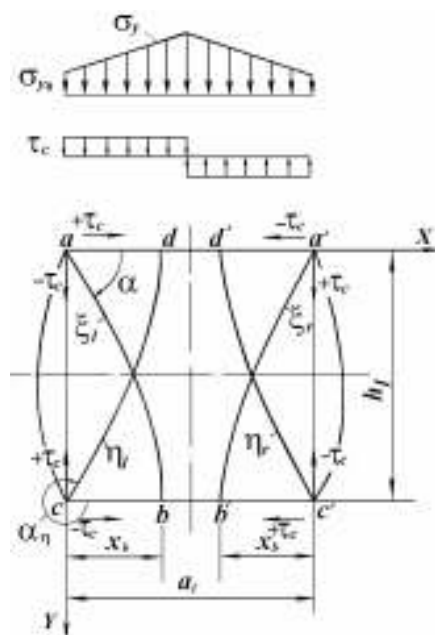


Рисунок 1 - Схемы внешних нагрузок и траекторий эффективных касательных напряжений (ТМЭКН ξ и ТМЭКН η) в левой и правой части образца

На рис. 1 индексами σ_{y0} , σ_y и τ_c обозначены контактные угловые, текущие нормальные и касательные напряжения, Па; ξ_l , ξ_r , η_l и η_r – левые и правые ТМЭКН соответственно; a_1 и h_1 – длина (м) и высота (м) образца

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

ца; точки a, a', c, c' и b, b', d, d' – начальные и конечные точки ТМЭКН ξ и ТМЭКН η соответственно; α_τ и α_η' – углы наклона ТМЭКН ξ и ТМЭКН η относительно оси абсцисс aX , рад; x_b – абсцисса точки b (b') на нижней плоскости, м.

Для разработки метода расчета предельных напряжений используем известный метод расчета напряжений на косых площадках.

Дифференциальное уравнение равновесного состояния материала на ТМЭКН ξ будет иметь вид:

$$\frac{d\sigma_\alpha}{d\alpha_\xi} = -2(k + \mu\sigma_\alpha). \quad (4)$$

Аналогично поступим с выражениями напряжений на левой ТМЭКН η . Получим уравнение изменения нормального напряжения со знаком плюс

$$\frac{d\sigma_\alpha}{d\alpha_\eta} = 2(k + \mu\sigma_\alpha), \quad (5)$$

где α_η – угол наклона касательной к ТМЭКН η относительно оси aX , рад;

Решение уравнения (5) сводится к интегралу на ТМЭКН ξ между точкой в вершине трещины и точкой b (рис. 1)

$$\int_{\sigma_{\alpha_\xi}}^{\sigma_{\alpha_b}} \frac{d(k + \mu\sigma_\alpha)}{\mu(k + \mu\sigma_\alpha)} = -2 \int_{\alpha_\xi}^{\alpha_b} d\alpha, \quad (6)$$

где σ_{α_ξ} и σ_{α_b} – нормальные напряжения в вершине трещины и в точке b , Па;

α_ξ и α_b – углы наклона касательной к ТМЭКН ξ в вершине трещины и в точке b относительно оси абсцисс aX , рад.

Решение уравнения (6) имеет вид

$$\ln(k + \mu\sigma_\alpha) \Big|_{\sigma_{\alpha_\xi}}^{\sigma_{\alpha_b}} = -2\mu\alpha_{b\xi}, \quad (7)$$

где $\alpha_{b\xi}$ – разность углов поворота ТМЭКН ξ в точке b и в вершине трещины, рад.

Учтем, что в вершине трещины локально на ТМЭКН ξ текущее значение сопротивления породы чистому сдвигу (эффективное касательное напряжение) равно пределу прочности на сдвиг k_n , а в точке b эффективное касательное напряжение не достигает значения предела

прочности на сдвиг и обозначено через τ . Различие значений эффективных касательных напряжений обусловлено их зависимостью от угла поворота траекторий.

Тогда окончательно получим

$$\frac{k_b + \mu \sigma_{\alpha_b}}{k_n + \mu \sigma_{\alpha_\xi}} = \exp(-2\mu \alpha_{b\xi}), \quad (8)$$

где k_b – эффективное касательное напряжение на ТМЭКН ξ в контактной точке b , Па.

Приведем полученную на основании решения интеграла (8) окончательную систему уравнений для определения вертикальных напряжений в вершине трещины $\sigma_{\xi(\eta)}$ (Па) на ТМЭКН ξ и ТМЭКН η [3].

$$\sigma_{y_{\xi(\eta)}} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{k_n(1+\mu d) \left(1 + \sin \rho \sqrt{1-b_{\xi(\eta)}^2} \right) \cdot \exp(\mp \mu (\beta_{b(d)} + \beta_{\xi(\eta)}))}{1 - \sin \rho \sqrt{1-b_{b(d)}^2}} - k_{b(d)} \right), \quad (9)$$

где

$$k_{b(d)} = \frac{(k_n + \mu \sigma_{y_{\xi(\eta)}}) \cdot (1 - \sin \rho \sqrt{1-b_{\xi(\eta)}^2})}{(1 + \mu d) \left(1 + \sin \rho \sqrt{1-b_{b(d)}^2} \right) \cdot \exp(\mp 4\mu \beta_{b(d)})}; \quad (10)$$

$$d = \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{f_c \sigma_{y_{\xi(\eta)}} \left(1 - \frac{2y}{h_1} \right)}{k_n + \mu \sigma_{y_{\xi(\eta)}}} \right). \quad (11)$$

$$b_{\xi(\eta)} = \pm \frac{f_c \cdot \sigma_{y_{\xi(\eta)}} \left(1 - \frac{2y}{h_1} \right)}{k_n + \mu \sigma_{y_{\xi(\eta)}}}; \quad (12)$$

$$b_{b(d)} = - \frac{f_c \sigma_{y_{\xi(\eta)}} \left(1 + \frac{x_{b(d)}}{h_1} \right)}{k_b + \mu \sigma_{y_{\xi(\eta)}} \left(1 + \frac{x_{b(d)}}{h_1} \right)}; \quad (13)$$

$$\beta_{\xi(\eta)} = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{b_{\xi(\eta)} \cos \rho}{\sin \rho - \sqrt{1-b_{\xi(\eta)}^2}}; \quad (14)$$

$$\beta_{b(d)} = - \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{b_{b(d)} \cos \rho}{\sin \rho - \sqrt{1-b_{b(d)}^2}}. \quad (15)$$

где d – коэффициент приращения прочности от действия горизонтальных напряжений, $x_{b(d)}$ – абсцисса точки выхода ТМЭКН ξ (η) на контактную плоскость, м; $k_{b(d)}$ – эффективные касательные напряжения на ТМЭКН ξ в контактной точке b (на ТМЭКН η в точке d), Па; $b_{\xi(\eta)}$ – коэффициент в вершине трещины на ТМЭКН ξ (на ТМЭКН η); $b_{b(d)}$ – коэффициент в контактной точке b (на ТМЭКН η в точке d); $\beta_{\xi(\eta)}$ – угол поворота ТМЭКН ξ (ТМЭКН η) от контактного трения в вершине трещины, рад; $\beta_{b(d)}$ – угол поворота ТМЭКН ξ (ТМЭКН η) от контактного трения в точке $b(d)$, рад; ρ – угол внутреннего трения, рад.

Углы наклона ТМЭКН ξ и ТМЭКН η относительно оси абсцисс aX , рад:

$$\alpha_{\xi} = \frac{\pi}{4} + \frac{\rho}{2} - \beta_{\xi}, \quad (16)$$

$$\alpha_{\eta} = \frac{7\pi}{4} - \frac{\rho}{2} - \beta_{\eta}. \quad (17)$$

где β_{ξ} – угол поворота ТМЭКН ξ от контактного трения в вершине трещины, β_{η} – угол поворота ТМЭКН η от контактного трения в вершине трещины

Результаты и их обсуждение. В качестве примера приведем расчет предела прочности цилиндрического образца хрупкой горной породы. Для расчета σ_y мы имеем систему из 8 уравнений при 12 параметрах, из которых три экспериментальные характеристики породы (k_n , μ , f_c) и два измеряемых геометрических параметра (длина a_1 , высота h_1). В частном рассматриваемом случае принимаем $a_1 = h_1$. В локальной области в вершине трещины, например в точке a или c , эффективные касательные напряжения в момент разрушения по Кулону $\tau_e = k_n$. Подчеркиваем, что в других точках, вне вершины трещины, на ТМЭКН ξ и ТМЭКН η материал находится в упругом состоянии, т.е. в этих точках $\tau_e < k_n$.

Для расчета предела прочности образца еще нужно знать распределение нормальных напряжений на контактной поверхности. Если представить нагружение на цилиндрический образец в виде двухскатной крыши согласно рис.1, то можем записать, что сила одноосного сжи-

мающего действия на образец определяется по формуле согласно Л. Прандтлю[3]

$$P = 2\sigma_{\xi} \int_0^{S_1} \left(1 + \frac{2f_c \cdot S_1}{2rh_1} \right) dS_1 = 2\sigma_{y_1} \left(S_1 + \frac{f_c}{2rh_1} S_1^2 \right), \quad (18)$$

где S_1 – половина площади поперечного сечения образца – площади сегмента круга цилиндра, м^2 .

Тогда предел прочности цилиндрического образца (Па):

$$\sigma = \frac{\sigma_y}{S} \left(2S_1 + \frac{f_c}{rh} S_1^2 \right) = \sigma_y \left(1 + \frac{f_c S}{4rh_1} \right), \quad (19)$$

где S – площадь поперечного сечения (круга) образца, м^2 .

Напишем формулу контура (окружности) сечения образца (рис. 2)

$$(x_1 - r)^2 + y_1^2 = r^2, \quad (20)$$

где r – радиус окружности, м ;

y_1 – значение ординаты точки на окружности, м ;

x_1 – значение абсциссы точки на окружности, м ;

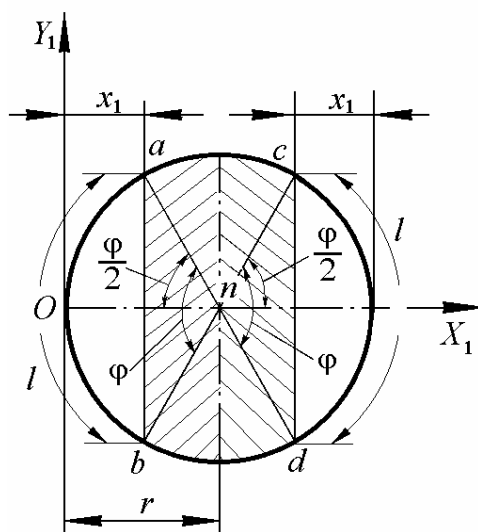


Рисунок 2 - Схема формирования несущей площади при развитии двух симметричных трещин в цилиндрическом образце

На рис. 2 обозначены: n – центр круга образца; OY_1 и OX_1 – оси системы координат; φ – угол сегмента, рад; l – длина дуги, м ; x_1 – длина стрелы сегмента, м ; a , b , c и d – точки на окружности, ограничивающие длину хорд.

Из преобразования формулы (15 - 19) имеем, $y_1 = \sqrt{2rx_1 - x_1^2}$, где y_1 – ордината сегмента .

Длина хорды равна удвоенному значению y_1 . Известно, что площадь сегмента

$$S_1 = \frac{1}{2} \left(lr - 2 \left(\sqrt{2rx_1 - x_1^2} \right) (r - x_1) \right), \quad (21)$$

где $l = 2\pi r\varphi$.

Угол φ сегмента определяется из условия, что

$$\sin \frac{\varphi}{2} = \frac{\sqrt{2rx_1 - x_1^2}}{r}. \quad (22)$$

Тогда имеем

$$\varphi = \arcsin \frac{2\sqrt{2rx_1 - x_1^2}}{r}. \quad (23)$$

Угол сегмента, равного площади половины круга керна, равен π .

Теперь перейдем к образцу, диаметр и высота которого по ГОСТу [8] равна 0,04 м.

С использованием выражений (19) – (23) преобразуем формулу (22) и получим формулу для расчета предела прочности образца в размерности МПа при образовании первой трещины для $f_c = 0,25$

$$\sigma = \sigma_y \left(1 + \frac{f_c}{4rh} S \right) = 1,097 \cdot \sigma_y. \quad (24)$$

Средняя сходимость расчетных значений пределов прочности с экспериментальными составляет 85,5 %, что свидетельствует о высокой сходимости согласно известным рекомендациям А.И. Барона [8,9] по допустимой достоверности теории с экспериментом и высокой результативности предлагаемого метода расчета предела прочности цилиндрических образцов горных пород.

Сопоставление расчетных значений пределов прочности
при усеченно-пирамидальной форме разрушения образцов
с экспериментальными данными

Тип породы		Эксперименталь- ные		Расчетные		Стра- ница в [7]
	k_n , МПа	ρ , рад	σ , МПа	σ , МПа	Сходи- мость, %	
1	2	3	4	5	6	7
Руда гранд-магнетитовая	22,0	40	117	118	99,1	67
Монцонит	24	40	127	128	99,1	105
Монцонит	60	41	260	330	86,6	104
Руда магнетитовая	15	42	97	84	86,6	67
Монцонит	8,5	41	47	47	100	103
Песчаник	16,5	42	126	92	73,0	145
Алевролит	12,0	42	60,5	67	90,6	208
Алевролит	9,6	43	62	55	88,7	145
Кварц	12,5	44	100	71	71,0	103
Руда магнетитовая	10	45	86,1	60	69,0	67
Алевролит	53	45	255	312	81,8	145
Алевролит	5,33	45	37,5	32	85,3	209
Песчаник	17,4	49	126	114	90,4	161
Монцонит	5,5	49	34,0	37	97,8	104
Песчаник	9,72	50	81,5	65	79,8	145
Монцонит	5,2	51	33	36	94,6	105
Монцонит	7,5	52	48	52	92,3	103
Монцонит	10,5	52	63	74	85,1	104

Выводы

1. Известная, широко применяемая формула предельного состояния, полученная на основании критерии прочности Кулона, не отражает процессы локального разрушения слоистых горных пород.

2. Предложена математическая модель и раскрыт механизм локального разрушения горных пород, заключающийся в формировании в вершинах трещин предела прочности сдвигу пород – предельных эффективных касательных напряжений и значения эффективных касательных

напряжений, не достигающих предела прочности сдвигу в точках выхода их траекторий на граничную поверхность.

3. Выведена формула для расчета предела прочности цилиндрических образцов горных пород при усеченно-пирамидальной форме их разрушения с использованием трех показателей их свойств: k_n – предела сопротивления материала сдвигу, ρ – угла внутреннего трения, f_c – коэффициента контактного трения, которые простыми способами могут быть установлены экспериментально в условиях горных предприятий, где результаты расчета могут быть оперативно использованы для повышения эффективности дезинтеграции.

4. Сопоставление расчетных значений пределов прочности при одноосном сжатии образцов с экспериментальными убедительно свидетельствуют о высокой результативности предлагаемого аналитического метода расчета предела прочности образцов горных пород. Средняя схожимость расчетных данных с экспериментальными составляет 85,5 %.

ЛИТЕРАТУРА / ЛІТЕРАТУРА

1. Protosenya M.G., Karasev M.V., Belyakov N.A. (2015). Uprugo-plasticheskaya zadacha dlya vyrabotok razlichnyh form poperechnykh sechenij pri uslovii predelnogo sostoyaniya Kulona. Fiziko-texnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh (FTPRPI), 3, 48-56.
2. Vasyliiev L.M., Vasyliiev D.L. (2013). Teoreticheskoe obosnovanie formirovaniya gorizontalnykh normalnykh napryazhenij v massivah gornyx porod. FTPRPI, 2, 81-90.
3. Vasyliiev L. M., Vasyliiev D. L. (2015). Uchet kontaktnogo treniya v zadache o razrushenii gornyx porod szhatiem. FTPRPI, 3, 48-56.
4. Podyminogin G.M., Chanyshiev A.I. (2015). Opredelenie maksimalno dopustimoy vysoty borta karera po sxeme zhestkoplasticheskogo tela. FTPRPI, 3, 32-40.
5. Nesmashnyj E.A., Bolotnikov A.V. (2017). Opredelenie prochnosti skalnykh porod s ispol`zovaniem sovremennogo oborudovaniya na primere mestorozhdeniya "Bolshaya Glivatka". Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost, 3, 82-87.
6. Petrenko V.D., Tiutkin O.L., Lubinchyk O.I., Kildeev V. R. (2017). Rezultaty doslidzhennia stiikosti ukosiv zemlianooho polotna vysokykh nasypiv za dopomohoiu prohrami "OTKOS". Ukrainskaia zaliznytsa, 3-4 (45-46), 18-21.
7. Spravochnik (kadastr) fizicheskikh svojstv gornyx porod. (1975). Pod red. Melnikova N.V., Rzhavskogo V.V., Protodyakonova M.M. Moskva: Nedra.
8. Baron L.I. Gorno-tehnicheskoe porodovedenie. (1977). M.: Nauka
GOST 21153.2-88. Porodyi gornye. Metodyi opredeleniya prochnost pri jednoosnom szhatii. (1984). M.: Goststandartizdat.

REFERENCES

1. Protosenya M.G., Karasev M.V., Belyakov N.A. (2015). Uprugo-plasticheskaya zadacha dlya vyrabotok razlichnyh form poperechnykh sechenij pri uslovii predelnogo sostoyaniya Kulona. Fiziko-texnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh (FTPRPI), 3, 48-56.
2. Vasyliiev L.M., Vasyliiev D.L. (2013). Teoreticheskoe obosnovanie formirovaniya gorizontalnykh normalnykh napryazhenij v massivah gornykh porod.FTPRPI,2,81-90.
3. Vasyliiev L.M., Vasyliiev D.L. . (2015). Uchet kontaktnogo treniya v zadache o razrushenii gornykh porod szhatiem. FTPRPI, 3, 48-56.
4. Podymnugin, G.M., Chanyshiev, A.I. (2015). Opredelenie maksimalno dopustimoy vysoty borta karera po sxeme zhestkoplasticheskogo tela. FTPRPI, 3, 32-40.
5. Nesmashnyj E.A., Bolotnikov A.V. (2017) .Opredelenie prochnosti skalnykh porod s ispol'zovaniem sovremennogo oborudovaniya na primere mestorozhdeniya "Bolshaya Glivatka". Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost, 3, 82-87.
6. Petrenko V.D., Tiutkin O.L., Lubinchyk O.I., Kildeev V. R. (2017). Rezultaty doslidzhennia stiikosti ukosiv zemlianoho polotna vysokikh nasypiv za dopomohoiu prohrami "OTKOS". Ukrainskaia zaliznytsa, 3-4 (45-46), 18-21.
7. Spravochnik (kadastr) fizicheskikh svojstv gornykh porod. (1975). Pod red. Melnikov N.V., Rzhetskogo V.V., Protodyakonova M.M. Moskva: Nedra.
8. Baron L.I. Gorno-tehnicheskoe porodovedenie. (1977). M.: Nauka GOST 21153.2-88. Porodyi gornye. Metodyi opredeleniya prochnost pri odnoosnom szhatii. (1984). M.: Goststandartizdat.

Received 13.03.2020.

Accepted 16.03.2020.

Модельовання процесу руйнування циліндричних зразків гірських порід

Розроблено математичну модель руйнування циліндричних зразків гірських порід при наявності контактної тертя. Розроблено метод розрахунку граничного вертикального напруження в вершині тріщини. і розрахунку межі міцності, в окремому випадку, циліндричних зразків гірських порід з використанням трьох показників властивостей (межа опору матеріалу зсуву, кут внутрішнього тертя, коефіцієнт контактної тертя), які простими способами можуть бути встановлені експериментально в умовах гірничорудних підприємств, де результати розрахунку можуть бути оперативно використані для управління процесами дезінтеграції.

Simulation of the process of destruction of cylindrical rock samples

The shear strength of a material is a constant for any point on the crack line. In this case, on the trajectory of maximum effective tangential stresses with the appearance of the first crack, spontaneous destruction of the body would occur. In real conditions, this does not happen. Layered rocks in the presence of cracks carry a certain load. The fact is that contact friction is inevitably involved in the fracture process and slip lines are not linear. During the destruction of brittle rocks with internal and external friction, the final result of the calculation of stresses at the crack tip in rock samples, and in general, in the massif, is significantly distorted. In the presence of contact tangential stresses, for example, from contact friction, the Coulomb criterion of the limiting state is met only locally, at the crack top. In other areas of the slip lines, the material is in an elastic state.

Therefore, for layered rocks, this situation requires the development of a new approach to describing the process of local destruction, which must be taken into account.

The purpose of this article is to develop a mathematical model and reveal the mechanism of local rock destruction.

The work considers a cylindrical rock sample loaded with press plates with a distribution of contact stresses between the sample and the plate according to Prandtl.

A mathematical model is proposed and the mechanism of local fracture is revealed, which consists in the formation of ultimate shear strength of rocks at the crack tops - ultimate effective shear stresses and effective shear stress values that do not reach the shear strength at the points where their trajectories reach the boundary surface.

A dependence is derived for calculating the tensile strength of cylindrical rock samples with a truncated pyramidal form of fracture using the tensile strength of the material, the angle of internal friction, and the coefficient of contact friction, which can be easily established experimentally in mining enterprises, where the calculation results can be quickly used.

A comparison of the calculated values of the ultimate strength under uniaxial compression of the samples with the experimental ones convincingly indicates the high efficiency of the proposed analytical method.

Васильев Леонид Михайлович – д.т.н., профессор, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, Украина.

Васильев Дмитрий Леонидович - д.т.н., с.н.с, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, Украина.

Малич Николай Григорьевич – к.т.н., доцент, Национальная металлургическая академия Украины, Украина.

Назаров Александр Евгеньевич – м.н.с. Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, Украина.

Васильев Леонід Михайлович - д.т.н., професор, Інститут геотехнічної механіки ім. Н.С. Полякова НАН України, Україна.

Васильев Дмитро Леонідович - д.т.н., с.н.с, Інститут геотехнічної механіки ім. Н.С. Полякова НАН України, Україна.

Маліч Микола Григорович - к.т.н., доцент, Національна металургійна академія України, Україна.

Назаров Олександр Євгенович - м.н.с. Інститут геотехнічної механіки ім. Н.С. Полякова НАН України, Україна.

Vasilyev Leonid - doctor of technical sciences, professor, Institute of Geotechnical Mechanics. N.S. Polyakov NAS of Ukraine, Ukraine.

Vasilyev Dmytro - doctor of technical sciences, doctor of science (Science), Institute of Geotechnical Mechanics. N.S. Polyakov NAS of Ukraine, Ukraine.

Malich Mykola - candidate of technical sciences, associate professor, National Metallurgical Academy of Ukraine, Ukraine.

Nazarov Alexander - M.Sc. Institute of Geotechnical Mechanics. N.S. Polyakov NAS of Ukraine, Ukraine.

І.С. Дмитрієва, Д.М. Грищенко

ОГЛЯД ПРОБЛЕМИ ПЕРЕВАНТАЖЕННЯ ВУЛИЧНО-ДОРОЖНЬОЇ МЕРЕЖІ ТА МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ДЕЯКИХ ЇЇ ДІЛЯНОК

Анотація. Можливість експлуатації транспортної мережі у великих містах здебільше не можлива без перевантаження, тому особливо важливою стає задача організації дорожнього руху. В роботі для спроби рішення деяких елементів даної задачі застосовано моделювання роботи ділянок вулично-дорожньої мережі.

Ключові слова: моделювання, вулично-дорожня мережа, транспортні вузли, Simulink, MATLAB.

Вступ та актуальність. В останні десятиріччя у великих містах України вичерпані або близькі до вичерпання можливості експлуатації транспортних мереж без перевантаження, а також можливості їх подальшого розвитку. Це зумовлено тим, що зростає фізична та економічна неможливість розширення пропускної здатності транспортних мереж. Тому особливу важливість набуває проектування вулично-дорожніх мереж (ВДМ), організація руху, оптимізація системи маршрутів громадського транспорту. Рішення таких завдань неможливе без моделювання транспортних мереж [1].

Дійсна користь від моделювання може бути отримана тільки при дотриманні двох умов:

- модель забезпечує коректне відображення властивостей оригіналу, суттєвих з точки зору дослідження;
- модель дозволяє усунути проблеми, притаманні даному реальному об'єкту.

Основна частина. Виділяють п'ять основних завдань застосування технологій інтелектуальних транспортних систем:

1 - оптимізація містобудівних рішень шляхом урахування особливостей організації дорожнього руху на стадіях техніко-економічного обґрунтування;

2 - забезпечення максимальної пропускної спроможності існуючої вулично-дорожньої мережі міста;

3 - пріоритетність рух маршрутних транспортних засобів і автомобілів служб екстреного реагування;

4 - розташування та місткість паркінгів;

5 - зниження екологічного навантаження на місто.

Зрозуміло, програмно-методичне забезпечення інтелектуальних транспортних систем у всіх перерахованих областях передбачає взаємодію всіх завдань. Тим не менше, кожна така система повинна будуватися і функціонувати незалежно, оскільки спроби побудувати «всеосяжну систему» регулювання міського транспорту закінчуються втратою керованості через спотворення пріоритетів.

Математичні моделі, що використовуються для аналізу транспортних мереж, різноманітні за класом вирішуваних завдань, тому неможливо дати конкретну вичерпну класифікацію. У роботі увага приділена імітаційному моделюванню вулично-транспортної мережі, для реалізації чого використано середовище MATLAB (Simulink і SimEvents).

SimEvents - це бібліотека Simulink для моделювання систем з дискретними станами, що використовує теорію черг та систем масового обслуговування. Вона дозволяє створювати імітаційні моделі проходження об'єкта через мережі і черги, забезпечує моделювання системи, яка залежить не від часу, а від дискретних станів. Дозволяє аналізувати такі характеристики продуктивності моделі як інтенсивність потоку, втрата пакетів тощо[2].

Імітаційне моделювання в даній роботі повинно відповідати на питання: як в деталях буде відбуватися рух, якщо відомі в середньому розмір потоку, напрямок його руху і пріоритет обслуговування.

Завдання імітаційного моделювання дорожнім рухом зводиться до поліпшення, окремо або в сукупності, критеріїв якості роботи ВДМ:

– пропускної спроможності критичних складових;

- середньої швидкості на головних напрямках;
- середньої витрати палива.

Специфіка накладає деякі обмеження на технологічні прийоми підвищення показників якості роботи ВДМ. Таких прийомів є шість:

- оптимізація режимів роботи світлофорів;
- організація міських швидкісних доріг з регульованим в'їздом/виїздом;
- інформування учасників руху про складної транспортної ситуації;
- удосконалення систем реагування на інциденти;
- оптимізація зв'язків перехресть;
- обмеження доступу автомобілів до критичних зон (елементів) ВДМ, введення платного в'їзду на найбільш навантажені міські магістралі.

Найефективнішим і тим, що найбільш складно реалізується є оптимізація режимів роботи світлофорів. Таким чином, необхідно створювати світлофорну мережу, яка узгоджено працює і характеристики якої будуть задовольняти наступним вимогам:

- злагоджена робота світлофорних об'єктів повинна бути організована з урахуванням особливостей просторових зв'язків і характеристик вимог транспортних потоків;
- режими роботи світлофорів повинні бути визначені на підставі достовірних статистичних даних про параметри транспортних потоків та оптимізовані, виходячи з навантаження на ВДМ.

В даній роботі було реалізовано розбиття системи, що розглядалась, на елементарні транспортні вузли (пішохідний перехід, Т-перехрестя, Х-перехрестя) і моделювання їх роботи.

Більш детально розглянемо найпростіший елемент вулично-дорожньої мережі - пішохідний перехід ділянки автомобільної дороги з одностороннім рухом (дивись рисунок 1).

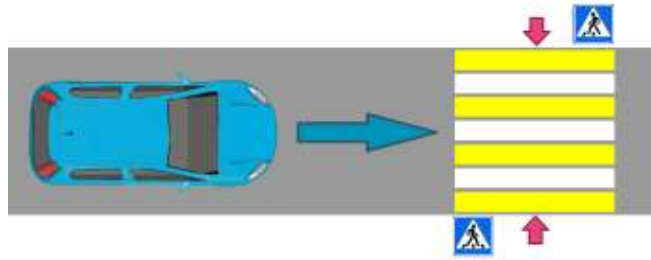


Рисунок 1 - Схема ділянки автомобільної дороги з одностороннім рухом

На обслуговування надходять заявки: автомобілі і пішоходи. Розглядаємо систему як черга з пріоритетом. Заявки на обслуговування від автомобілів надходять частіше, ніж заявки на обслуговування від пішоходів. Пріоритетними є заявки типу «пішохід». Час обслуговування переходом пішохода більше, ніж час обслуговування автомобіля.

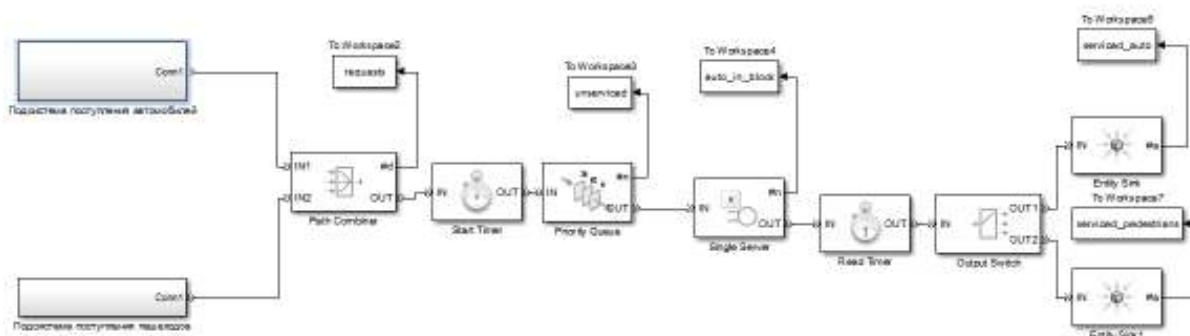


Рисунок 2 - Модель пішоходного переходу, реалізована в середовищі MATLAB

Проведено серію дослідів, в яких заявки типу «пішохід» у всіх дослідях встигали бути обслуговані, в той час як неперіоритетні заявки типу «автомобіль» змогли стати обслугованими лише після того, як була знижена інтенсивність надходження як неперіоритетних, так і пріоритетних заявок. Це свідчить про те, що параметри розподілу для інтервалу приходу заявок несе дуже велике навантаження на транспортний вузол.

Так само було проведено моделювання ділянки автомобільної дороги з двостороннім рухом, перехресть типу Т-перехрестя, Х-перехрестя. Результати моделювання були схожими, тобто транспортні вузли несуть

великі перевантаження, і навіть зниження інтенсивності надходження автомобілів не знижує навантаження на транспортний вузол.

Висновок. Оскільки проведені дослідження показали, що на основі статистичних даних спостереження за ділянками автомобільної дороги різних типів немає можливості змодельовати транспортний потік без перевантаження, то для коректної роботи транспортного вузла було прийнято рішення в подальших дослідженнях до їх моделювання додати систему світлофорного регулювання.

ЛІТЕРАТУРА / LITERATURE

1. Швецов В.И., Алиев А.С. Математическое моделирование загрузки транспортных сетей. – М., 2003. – 62с.
2. SimEvents [Електронний ресурс], режим доступу URL: <http://matlab.ru/products/simevents/> вільний (25.02.2020).

REFERENCES

1. Shvetsov V.I., Aliev A.S. Matematicheskoe modelirovanie zagruzki transportnyih setey. – M., 2003. – 62s.
2. SimEvents [Elektronnyi resurs], rezhym dostupu URL: <http://matlab.ru/products/simevents/> vilnyi (25.02.2020).

Received 14.03.2020.

Accepted 17.03.2020.

Огляд проблеми перевантаження вулично-дорожньої мережі та моделювання роботи деяких її ділянок

Можливість експлуатації транспортної мережі у великих містах здебільше не можлива без перевантаження, тому особливо важливою стає задача організації дорожнього руху. В роботі для спроби рішення деяких елементів даної задачі застосовано моделювання роботи ділянок вулично-дорожньої мережі. Розглянуто особливості складових транспортної мережі та їх зв'язок. У роботі увага приділена імітаційному моделюванню вулично-транспортної мережі, для реалізації чого використано середовище MATLAB (Simulink і SimEvents). В даній роботі було реалізовано розбиття системи, що розглядалась, на елементарні транспортні вузли і зробити моделювання їх роботи. Було проведено моделювання ділянок автомобільної дороги з одностороннім та двостороннім рухом, перехресть типу Т-перехрестя, Х-перехрестя.

Результати моделювання були схожими, тобто транспортні вузли несуть великі перевантаження, і навіть зниження інтенсивності надходження автомобілів не знижує навантаження на транспортний вузол. Оскільки проведені дослідження показали, що на основі статистичних даних спостереження за ділянками автомобільної дороги різних типів немає можливості змодельовати транспортний потік без перевантаження, то для коректної роботи транспортного вузла було прийнято рішення в подальших дослідженнях до їх моделювання додати систему світлофорного регулювання.

***Overview of the problem of overloading the street transport network
and modeling the operation of some of its sections***

The ability to operate the transport network in large cities is mainly impossible without overload, so the task of organizing traffic becomes especially important. In the work, to try to solve some elements of this problem, modeling of the operation of sections of the road network is applied. The features of the components of the transport network and their connection are considered. Attention is paid to the simulation of the street transport network, for the implementation of which the MATLAB environment (Simulink and SimEvents) is used. In this work, a partition of the system was implemented, it was considered into elementary transport nodes and modeling of their work was done. One-way and two-way road sections, intersections of the T-intersection, X-intersection type were simulated.

The simulation results were similar, that is, transport hubs carry large overloads, and a decrease in the intensity of vehicle inflows does not reduce the load on the transport hub. Since the studies showed that based on the statistical data on monitoring sections of various types of roads, it is not possible to simulate the traffic flow without overload, for the correct operation of the transport hub, it was decided to add a traffic light control system in their further studies.

Дмитрієва Ірина Сергіївна – доцент кафедри інформаційних технологій і систем Національної металургічної академії України.

Грищенко Дар'я Михайлівна – маг. кафедри інформаційних технологій і систем Національної металургічної академії України.

Дмитрієва Ірина Сергіївна – доцент кафедри інформаційних технологій і систем Національної металургічної академії України.

Грищенко Дар'я Михайлівна – магістр кафедри інформаційних технологій і систем Національної металургічної академії України.

Dmytriieva Iryna - Associate Professor, Department of Information Technologies and Systems, National Metallurgical Academy of Ukraine.

Hryshchenko Daria - master, Department of Information Technologies and Systems, National Metallurgical Academy of Ukraine.

А.Г. Станчиц, Т.В. Селівьорстова, Г.Ю. Станчиц

ФРАКТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РІЧКИ ДНІПРО

Анотація. Розглядаються питання дослідження фрактальності стока р. Дніпро у 1818-1872 роках.

Ключові слова: фрактали, RS-аналіз, DFA-метод, сток річки, фрактальний аналіз.

Постановка проблеми. Водні ресурси Дніпра з давніх часів використовуються для різних цілей. Особливо зросло господарське значення водних ресурсів Дніпра, коли виникла загроза дефіциту водних ресурсів і здійснені широкі заходи щодо їх комплексного використання. Розрахунок багаторічної мінливості водності річки стає важливою ланкою в плануванні розвитку виробничих сил країни. Щоб вирішити проблему водності в майбутньому, потрібно базуватися на багатовікових відомостях за минулі часи [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Здійснено аналіз дослідження стоку Дніпро [1], але дані були отримані спираючись на статистичні показники. В даній статті пропонується розглянути інші підходи до обробки цих даних, наприклад, як в дослідженнях Херста [2].

Мета дослідження. Дослідити фрактальність стоку річки Дніпро на основі даних, які були отримані різними способами, обробивши їх за допомогою основних методів.

У минулі часи великою перешкодою плавання по Дніпру були дніпровські пороги, переправа через які нерідко закінчувалися трагічно. Для успішної переправи через пороги необхідні були відомості про глибини на судноплавній трасі в порогах. Такий водомір був встановлений на Каменуватому острові, розташованим перед порогами проти селища Лоцманська Кам'янка (в межах м. Дніпро). На скелі острова водомір був встановлений таким чином, що точка нуль співпадає з найвищими

камінням, що лежать на фарватері Ненаситецького порога (самий великий поріг), а це дозволяє відразу сказати який рівень води над порогами. Функціонування цього поста умовно відноситься до 1656 р проте дані вдалося виявити тільки з 1778 р. [1].

Відновлення багатовікових рядів гідрологічних відомостей по річці Дніпро представляє складну задачу і особливо в формі хронологічно безперервного ряду з інтервалами часу не більше року. Існують різні способи відновлення даних, наприклад, по даним гідрометеостанцій, відкладанням у водоймам, за письмових джерел тощо. Але найбільш реальним шляхом відновлення відомостей за минулі століття можуть служити природні пам'ятки, створені природою в органічному світі, мінеральних відкладеннях, льодовиках. Процес накопичення опадів у водоймах залежить від багатьох факторів, але провідними є кліматичні. Під впливом періодичності їх змін формуються сезонні різновиди відкладень, які характеризують річні цикли накопичення опадів (досліджуються по кернам) і дають можливість датувати з річними інтервалами часу.[1]

Дані стоку Дніпра відновлювались за відомостями про відкладення солі в Сакському озері. У цих відкладах помічається сезонна закономірність: взимку відкладаються світлі мули, а влітку - більш темні, насичені продуктами водної та вітрової ерозії. Розглянуто дані за період з 1818 по 1872 роки (Таблиця 1), так як з 1873 року через видобуток солі, споруди додаткових каналів тощо, явно знизилася надходження в озеро продуктів водної ерозії.[1] А також було взято гідрометричні дані з 1818 по 1872 роки (Таблиця 2), які були отримані завдяки водоміру на Каменуватому острові.

Таблиця 1

Фрагмент даних відкладення солей у Сакському озері за 10 років[1]

Рік	Відкладення (мм)
1818	1,3
1819	3,0
1820	3,0
1821	2,0
1822	1,6
1823	1,5
1824	1,6
1825	1,6
1826	0,9
1827	1,8
1828	1,4

Таблиця 2

Фрагмент гідрометричних даних стоку Дніпра за 10 років[1]

Рік	Сток Дніпра(м ³ /с)
1818	1780
1819	1790
1820	2630
1821	1480
1822	1940
1823	1690
1824	1090
1825	1000
1826	1820
1827	1370
1828	1320

Для цих двох рядів був застосований R/S-метод для знаходження показника Херста [2]. Проведено фрактальний аналіз даних по відкладенню солей у Сакському Озері (див. фрагмент у табл. 1) та

гідрометричних даних (див. фрагмент у табл. 2) за період з 1818 р. по 1872 р., в результаті якого було отримано значення показника Херста $H=0.7894$ та $H=0.7227$ відповідно, які підтверджують фрактальність (природну самоподібність) стоку Дніпра. При цьому закономірність отриманого результату полягає у практично повному збігу значень показників Херста щодо розливу р. Нил ($H \approx 0.73$), що отримано ще самим Гарольдом Ервіном Херстом [2], а також з результатом, що отримано значно пізніше для агрегатованого самоподібного трафіку у комп'ютерних мережах [3].

Розрахунок показника проводиться відповідно формули (1):

$$H = \frac{\ln \ln E \left[\frac{R(n)}{S(n)} \right] - \ln \ln \lambda}{\ln \ln n} \quad (1)$$

У якості величини $R(n)$ виступає розмах накопичених відхилень n значень від середнього значення ряду даних. Стандартне відхилення ряду представлено величиною $S(n)$. Показник Херста розраховується як відношення різниці натуральних логарифмів математичного сподівання і константи, в нашому випадку $\lambda = 0,33$, до натурального логарифму проміжку часу ряду. Так як показник Херста рахується для проміжку 1818 – 1872, величина проміжку часу становитиме 55.

Також для ряду гідрометричних даних та даних отриманих з Сакського озера був застосований метод DFA. В рамках цього методу спочатку здійснюється зведення даних до нульового середнього, а саме здійснюється пошук середнього значення, після чого віднімається від ряду та будується випадкове блукання відповідно до формули (2):

$$y(k) = \sum_{i=1}^k [z(i) - \bar{z}] \quad (2)$$

Далі ряд $y(k)$ розбивається на відрізки довжини n , в рамках кожного з яких за допомогою метода найменших квадратів визначається рівняння прямої, апроксимуючої послідовності $y(k)$. Знайдена апроксимація розглядається в якості локального тренду. Далі розраховується середня квадратична помилка лінійної апроксимації відповідно до формули (3):

$$F(n) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [y(k) - y_n(k)]^2} \quad (3)$$

Залежність $F(n)$ має степенний характер відповідно до формули (4):

$$F(n) \sim n^{\alpha} \quad (4)$$

Значення α характеризують типи корельованої динаміки.[4] Для ряду даних отриманих гідрометричним шляхом та завдяки кернам Сакського озера, α в обох випадках належить проміжку від 0.5 до 1, що показує корельовану динаміку.

Висновки. Проведена обробка даних часового відрізка 1818-1872 отриманих з Сакського озера та водоміра на Каменуватому озері RS та DFA методами, в результаті яких була доведена фрактальна залежність.

ЛІТЕРАТУРА / LITERATURE

1. Шве́ц Г.И. Многовековая изменчивость стока Днепра. – Л.: Гидрометеоиздат, 1978. – 84 с.
2. Херст Г. Нил: Общее описание реки и использования ее вод = Hurst H. The Nile: A General Account of the River and the Utilization of Its Waters. London, 1952 / Гарольд.
3. Петров В.В., Платов В.В. Исследование самоподобной структуры телеграфика беспроводной сети // Радиотехнические тетради. 2004. №30.- С. 58- 62.
4. Павлов А.Н., Солнцева О.В., Зиганшин А.Р. Мультифрактальный анализ хаотической динамики взаимодействующих систем // СГУ - С. 1 – 20.

REFERENCES

1. Shvets G.I. Mnogovekovaya izmenchivost stoka Dnepra. – L.: Hidrometioizdat, 1978. – 84 s.
2. Herst G. Nil: Obschee opisanie reki i ispolzovaniya ee vod = Hurst H. The Nile: A General Account of the River and the Utilization of Its Waters. London, 1952 / Garold.
3. Petrov V.V., Platov V.V. Issledovanie samopodobnoy strukturyi teletrafika besprovodnoy seti // Radiotekhnicheskie tetradi. . 2004. . #30. - S. 58- 62.
4. Pavlov A.N., Solntseva O.V., Ziganshin A.R. Multifraktalniy analiz haoticheskoy dinamiki vzaimodeystvuyuschih sistem // SGU - C. 1 – 20.

Received 16.03.2020.

Accepted 18.03.2020.

Фрактальные исследования реки Днепр

Водные ресурсы Днепра с древних времен используются для различных целей. Особенно возросло хозяйственное значение водных ресурсов Днепра, когда возникла угроза дефицита водных ресурсов и осуществлению широкие мероприятия по их комплексного

использования. Расчет многолетней изменчивости водности реки становится важным звеном в планировании развития производственных сил страны. Чтобы решить проблему водности в будущем, нужно основываться на многовековых сведениях за прошлые времена, поэтому рассматривается фрактальность стока реки.

Fractal studies of the Dnieper River

The article deals with the research of fracture of the Dnieper river drainage in 1818-1872.

The Dnieper water resources have long been used for various purposes. The economic importance of the Dnieper water resources was especially increased when there was a threat of water scarcity and extensive measures were taken to use them comprehensively. The calculation of the long-term variability of the river water becomes an important link in planning the development of the country's productive forces. To solve the problem of water in the future, you need to rely on centuries-old information from the past.

In the past, the Dnieper rapids were a major obstacle to navigation on the Dnieper River, the crossing of which often ended tragically. Successful crossing over rapids required depth information on the shipping route in rapids. Such a hydrometer was installed on the Rocky Island, located in front of the rapids opposite the village of Pilot Kamenka (within the Dnipro River). On the cliff of the island the hydrometer was installed in such a way that the point zero coincides with the highest stones lying on the fairway of the Nenasitsky threshold (the largest threshold), and it allows to tell at once what level of water above the thresholds. The functioning of this post is conditionally related to 1656, but the data was only discovered from 1778

The Dnieper drainage data were recovered following the information on salt deposition in Saki Lake. Seasonal patterns are observed in these sediments: in the winter, light mules are deposited, and in the summer, darker ones, saturated with products of water and wind erosion, are deposited. Data for the period from 1818 to 1872 (Table 1) are considered, since since 1873 due to salt extraction, construction of additional canals, etc., the flow of water erosion products into the lake has clearly decreased. Also, hydrometric data from 1818 to 1872 were obtained, which were obtained from a water meter on the Rocky Island.

Two data sets are processed based on RS and DFA methods.

Селиверстова Татьяна Витальевна - к.т.н, доц. каф. ИТС, НМетАУ.

Станчиц Антон Георгиевич - аспирант каф. ИТС, НМетАУ.

Станчиц Георгій Юрійович - ст. п. каф. ИТС, НМетАУ.

Селівьорстова Тетяна Віталіївна - к.т.н, доц. каф. ИТС, НМетАУ.

Станчиц Антон Георгійович - аспірант каф. ИТС, НМетАУ.

Станчиц Георгій Юрійович - ст. п. каф. ИТС, НМетАУ.

Seliverstova Tatyana - ph.d., assoc. caf. ITS, NMetAU.

Stanchyts Anton - graduate student caf. ITS, NMetAU.

Stanchic Georgij - st. t. caf. ITS, NMetAU.

Т. Булана, Б. Молодець

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ВАРІАНТІВ КЛАСИФІКАЦІЇ ХВОРИХ НА СЕРЦЕВО-СУДИННИМИ ЗАХВОРЮВАННЯМИ ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЙРОННИМИ МЕРЕЖАМИ

Анотація. Робота присвячена аналізу інформаційних технологій хронобіологічного моніторингу кардіосистем, розробці систему підтримки прийняття рішень для лікаря-дослідника на базі методів класифікації з використанням нейронних мереж таких як імовірнісна неронна мережа PNN (Probabilistic Neural Networks), багатoshаровий персептрон MLP NN (Multi-Layer Perceptron), каскадно-кореляційна мережа CasCor (Cascade Correlation). У результаті отримано наступне: найкращим класифікатором є нейромережа каскадної кореляції з 85-88% точністю класифікації. Найгіршим класифікатором стала ймовірнісна нейронна мережа, оскільки точність цього алгоритму залежить від розміру набору даних.

Ключові слова: хронобіологія, інформаційна технологія моніторингу, нейронні мережі, класифікація.

В наш час науково-технічний прогрес увійшов майже у всі сфери нашого життя. Насичення всіх галузей сучасного життя комп'ютерними технологіями не залишило осторонь і медицину. Зі зростанням темпу життя від лікаря часто вимагається оперативності в постановці діагнозу та виборі оптимального і сучасного виду лікування. Зрозуміло, що для виконання таких непростих завдань необхідні відповідні інструменти. Медична культура й охорона здоров'я нині на порозі технічної революції. Інформаційні технології стрімко вторгаються в усі сфери медицини й організації охорони здоров'я. Сьогодні практично жоден етап діагностики не обходиться без комп'ютерних технологій. Поряд з цим, інтелектуальні інформаційні системи доволі обмежено застосовують у практичній медицині. Застосування інтелектуальних систем в медицині, без сумніву, сприяє прогресивному розвитку інформаційного потенціалу,

який є універсальним засобом вирішення широкого кола завдань на різних етапах лікування пацієнта [1].

В XX столітті вивчення часових особливостей біологічних структур виділилось у два нові напрями науки – хрономедицину та хронобіологію. В 1937 році у шведському курортному місті Роннебі вперше зібрались представники різноманітних теоретичних та практичних дисциплін та заснували міжнародну спільноту по вивченню біологічних ритмів. Тим самим вони започаткували розвиток науки та розширенню числа розуміючих важливість часового фактору для життя. Одне з ключових положень хронобіології: часовий фактор у вигляді у вигляді ритмів характерний для всіх процесів життєдіяльності. Таким чином, можна сказати що хронобіологія – це дослідження ритмів[2].

На сьогодні через досить примітивну будівлю програмного забезпечення для приладів-реєстраторів не дозволяє проводити детальний комплексний аналіз оцінок, показників і характеристик кардіосистем, який необхідний для виявлення прихованих закономірностей; в основному діагностика ґрунтується на досвіді і знанні лікаря; неясно, який обсяг показників добового моніторингу артеріального тиску необхідно використовувати для оцінки ефективності проведеного лікування і не існує системи, яка б дозволяла оцінити якість проведеної лікувальної терапії. Таким чином, прийняття рішення виглядає наступним чином (рис 1.).

Для вирішення цієї проблеми було вирішено використати провести аналіз деяких нижче перелічених мереж: метод каскадної кореляції (CasCor), багатошаровий персептрон (MLP), та ймовірнісна нейронної мережі (PNN). В якості методу відбору інформативних ознак було обрано множинну логістичну регресію. Перевагою запропонованого методу відбору інформативних ознак є скорочення обсягу інформації: вплив кожного фактора шляхом оцінювання коефіцієнтів регресійного рівняння. Основним недоліком логістичної регресії є умова, що змінна відгуку повинна бути бінарною.

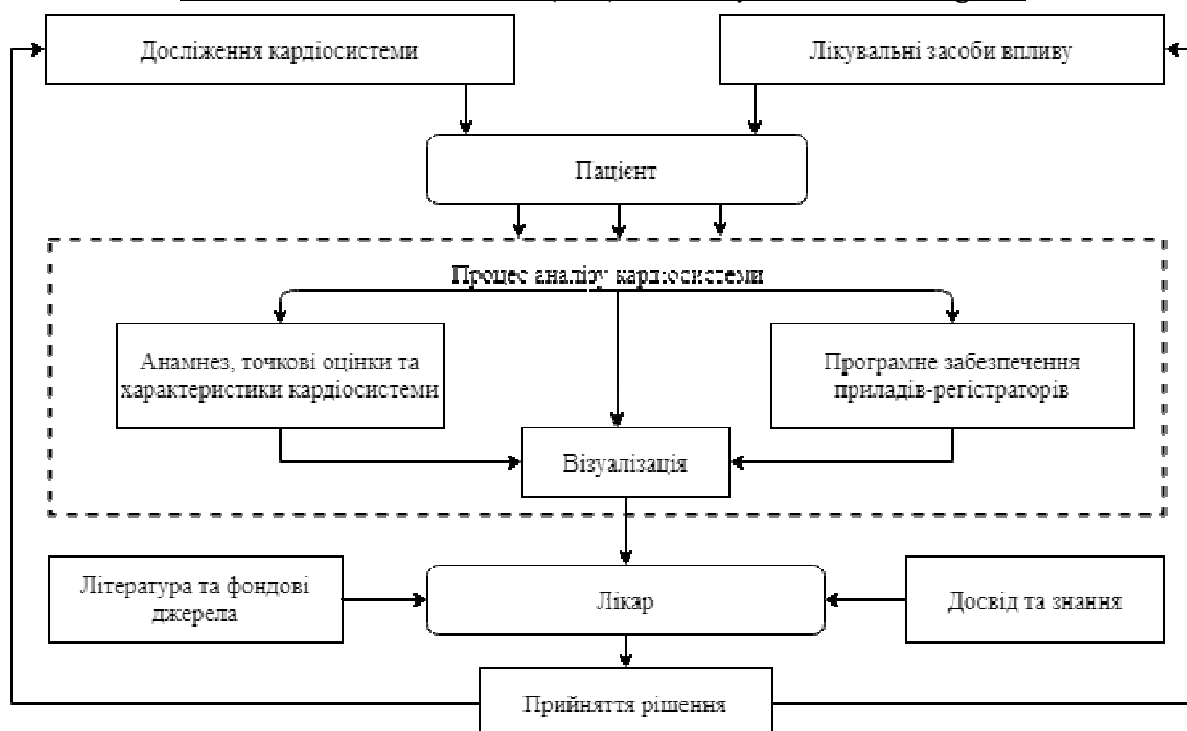


Рисунок 1 - Схема проведення діагностики стану кардіосистеми пацієнта

Багатошаровий персептрон найбільш вдало реалізує ідею керованого навчання, в якому розглядається відображення вхідного вектора в цільовій вихідний вектор. Але для вдалого управління навчанням необхідно мати дані, які мають відому класифікацію, і обсяг, достатній для проведення навчання і тестування НМ.

В свою чергу Імовірнісні нейронні мережі (PNN, Probabilistic Neural Networks), також відносяться до НС з прямою передачею інформації і по архітектурі є «найближчими родичами» радіально-базисних і узагальнених регресійних мереж Дані мережі призначені для вирішення завдань байєсівської класифікації (розпізнавання образів на основі байєсівського підходу), в основі якої лежить формула Байєса[3]. Особливістю цієї мережі є фіксована структура, що будується один раз по набору навчальних пар. В процесі функціонування ваги синапсів не змінюються. До нейронних мереж з прямою передачею інформації відносяться і так звані каскадно-кореляційні мережі, основна особливість яких полягає в можливості додавання нових вузлів в процесі навчання.

Алгоритм каскадної кореляції комбінує дві ключові ідеї: перша - це каскадна архітектура, в якій приховані нейрони додаються до мережі один раз і не змінюються після того, як вони були додані[4]; друга - навчальний алгоритм, який створює і налаштовує нові приховані нейрони (рис. 2). Для кожного нового прихованого нейрона, необхідно максимізувати величину кореляції між виходом нового нейрона і сигналом похибки, який необхідний знизити.

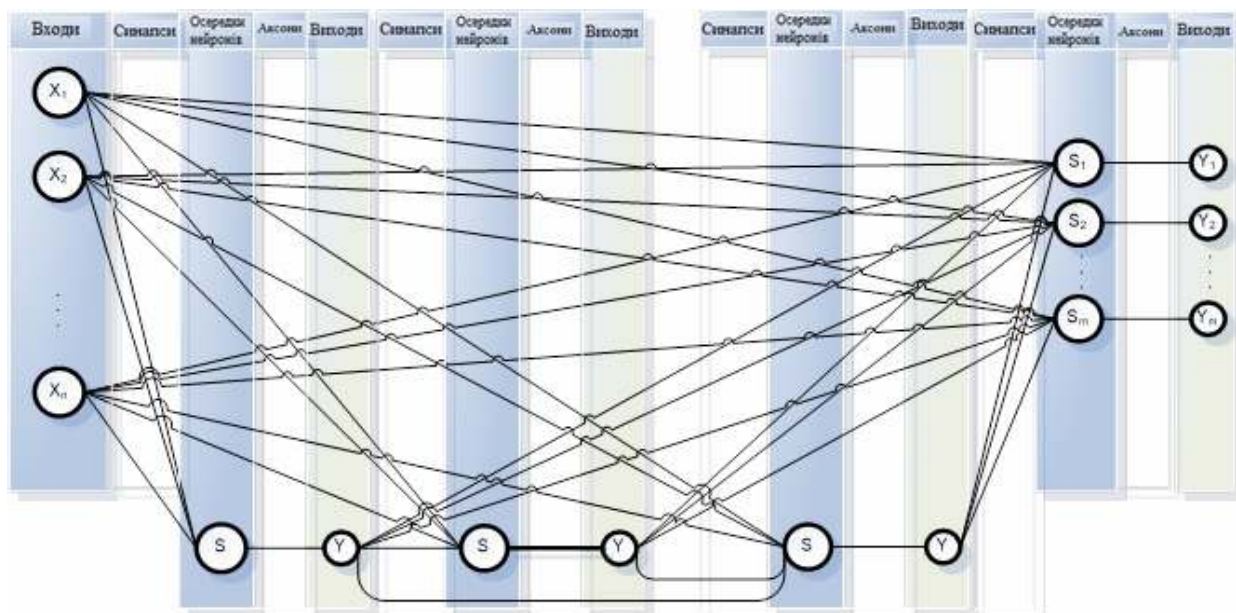


Рисунок 2 - Загальна архітектура нейронної мережі каскадної кореляції

Вхідні данні, що надходять до нашої програми можна розділити на первинні неопрацьовані данні та данні опрацьовані лікарем-дослідником. Відмінною характеристикою даних є їх частота отримання. Апарат вимірювання артеріального тиску закріплюється на пацієнта на добу. Частота забору – чотири заміри за одну годину, тобто 96 на добу. Переваги такого хронобіологічного моніторингу табору даних є відсутність ефекту «білого халату» - данні збираються не у стаціонарному режимі, тобто пацієнт не повинен знаходитись на території медичного закладу.

Загальна кількість оцінок, наданих лікарями-дослідниками для проведення хронобіологічного аналізу, становить 157 серед яких такі кількісні показники: САТ (сistolічний артеріальний тиск) мінімум за

добу, САТ мінімум за добу, САТ мінімум вночі, САТ індекс площі гіпотонії за добу та інше (рис. 3). У пацієнта також є такі якісні параметри як вага, зріст, дата звернення до лікарні, стаж хвороби, діагноз, менопауза. Серед якісних показників є вживання алкоголю, куріння, спадкова схильність до інфаркту міокарда. Нормування навчальних даних проводилось в інтервалі [-1;1]. А для класифікації використовувалось кількість вхідних параметрів в розмірі восьми оцінок. Тип вхідних оцінок – числовий (ДАТ середнє за добу, ПАТ середнє за добу, САТ середнє за добу та інші). Навчальна вибірка склала 80% від загальної кількості хворих (278 навчальних пар), а тестова вибірка – 20% (65 навчальних пар). Представлена вибірка даних є високорепрезентативною, враховуючи кількість пацієнтів: всього внесено даних по 343 хворих з серцево-судинними ускладненнями (1 клас – 142, 2 клас – 207).

Характеристики	
САТ середнє за добу	157 параметрів
САТ середнє за ніч	
САТ середнє за день	
САТ мінімум за ніч	
...	
Пульс МАХ (макс. ранковий підйом)	
Пульс середній за день	

Рисунок 3 - Таблиця ознак у вхідній вибірці

Але на даних, що отримуються в результаті цього моніторингування, існують похибки трьох типів: похибка виміру приладу, похибка взаємодії пацієнта з приладом, похибка обчислювального процесу.

Одна з головних причин виникнення похибки першого типу є несправність приладу, бо у кожного з них є певні гарантійні терміни роботи, які не завжди збігаються з реальністю.

Другий тип похибку обумовлений процедурою моніторингу та машино-людина відносинами. Щоб розуміти цю похибку треба ознайомитись з принципами роботи прибору моніторингу артеріального тиску: раз в N хвилин (де N – довільна величини, що залежить від марки приладу) без попереднього оповіщення пацієнта, починається процедура заміру – починається стискуватись манжетка; якщо пацієнт в стані неспокою(не фіксує руку – що є необхідним для отримання точного результату), прилад продовжує накачувати манжетку штучно спотворюючи цей результат. Під час сну деякі пацієнти можуть знімати прилади або послаблювати манжетку, що призведе до спотворення даних. Також данні спотворює емоційний стан людини.

Третя похибка виникає у будь-якому виді мануального заповнення даних до БД лікарем-дослідником.

Спираючись на вище описані спостереження, було вирішено граничні значення АТ досліджувати окремо.

У результаті отримано наступне: найкращим класифікатором є нейромережа каскадної кореляції з 85-88% точністю класифікації. Найгіршим класифікатором стала ймовірнісна нейронна мережа, оскільки точність цього алгоритму залежить від розміру набору даних - якість буде кращою, якщо використати великий за обсягом датасет. Також потрібно зауважити, що віковий діапазон пацієнтів у вибірці 50-60 років. З вище описаних зауважень можна зробити висновки про необхідність накопичення даних для збільшення навчальної вибірки.

Схожі дослідження були проведені співробітниками Ліонський університет І імені Клода Бернара. Для класифікації пацієнтами потенційно схильними до інфаркту міокарда вони використовували дерево рішень, (CART) та багат шаровий перцептрон (MLP) та логістичної регресії (Logistic Regression). В якості даних для навчання та тестування були використані данні з бази даних INDANA (INdividual Data ANALysis of Antihypertensive interventions). Ця вибірка була випадковим чином розбита на навчальну (кількість записів – 10,296) та тестову (кількість записів – 5,148). Ознаки пацієнтів які приймали участь у навчанні: вік, стать, систолічний артеріальний тиск (CAT), діастолічний

артеріальний тиск (ДАТ), захворювання діабетом, наявність шкідливих звичок (куріння), гіпертрофія лівого шлуночка на ЕКГ, індекс маси тіла та рівень холестерину. У результаті були отримане наступне: найбільш інформативними ознаками виявились вік та стать пацієнта. Якість розпізнання «уражених» пацієнтів наступні: логістична регресія (LR) – 65.9%, дерево прийняття рішень (CART) – 69.1%, багат шаровий перцептрон (MLP) – 76% [5].

ЛІТЕРАТУРА / LITERATURE

1. Дзяк Г. В. Суточное мониторирование артериального давления / Г. В. Дзяк, Т. В. Колесник, Ю. Н. Погорецкий. – Днепропетровск, 2005. – 200 с.
2. Г. Хильдебрандт , Хронобиология и хрономедицина / Г. Хильдебрандт, М. Мозер, М.Лехофер. М.: Арнебия. 2006. – 144с.
3. Буланая Т.М. Диагностика сердечно-сосудистой системы на основе вероятностных нейронных сетей / Т. М. Булана // Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем Мрзис-2007: міжн. наук.-практ. конф., 14–16 листопада 2007 р.: тези доп. – Дніпропетровськ, 2007.– С. 31.
4. Булана Т.М. Інформаційні технології моніторингу й оцінки ефективності діагностування стану технічних та кардіосистем: Дис, ... кандидата тех. наук: 05.13.06: – Захищене 27.06.2018; Затв. 23.10.2018. – Д., 2018. – 145 с.
5. Colombet I., Ruelland A., Chatellier G., Gueyffier F., Degoulet P., Jaulent M.C. Models to predict cardiovascular risk: Comparison of CART, multilayer perceptron and logistic regression. Proceedings AMIA Symposium , 2000. 156–160.

REFERENCE

1. Dziak G.V. Daily blood pressure monitoring / G.V. Dziak, T.V. Kolesnik, Y.N. Pogoretskii. – Dnipropetrovsk, 2005. – 200 p.
2. H. Khildebrandt , Chronobiology and Chronomedicine / H. Khildebrandt, M. Mozer, M. Lekhofer. M.: Arnebia. 2006. – 144p.
3. Bulanaya T.M. Diagnosis of the cardiovascular system based on probabilistic neural networks / T. M. Bulanaya // Мрзис-2007: international Research Practice Conf., 14 – 16 november 2007 p.: thesis. – Dnipropetrovsk, 2007. – p. 31.
4. Bulanaya T.M. Information technologies for monitoring and evaluating the efficiency of diagnosing the condition of technical and cardio systems: Dis, ...

Candidate of Technical Sciences: 05.13.06: – Defended 27.06.2018; Approved 23.10.2018. – D., 2018. – 145 p.

5. Colombet I., Ruelland A., Chatellier G., Gueyffier F., Degoulet P., Jaulent M.C. Models to predict cardiovascular risk: Comparison of CART, multilayer perceptron and logistic regression. Proceedings AMIA Symposium, 2000. 156–160.

Received 16.03.2020.

Accepted 18.03.2020.

**Аналіз існуючих варіантів класифікації хворих
на серцево-судинними захворюваннями за допомогою нейронними мережами**

Проведено аналіз інформаційних технологій хронобіологічного моніторингу кардіосистем на базі методів класифікації з використанням нейронних мереж. У результаті найкращим класифікатором є нейромережа каскадної кореляції з 85-88% точністю класифікації, найгіршим класифікатором - ймовірнісна нейронна мережа, оскільки точність цього алгоритму залежить від розміру набору даних.

**Analysis of existing options for the classification of patients
with cardiovascular disease using neural networks**

The work is devoted to the analysis of information technologies of chronobiological monitoring of cardiac systems, development of decision support system for physician-researcher based on classification methods using neural networks such as PNN (Probabilistic Neural Networks), multilayer perceptron and CasCor (Cascade Correlation).

The training sample was 80% of the total number of patients (278 training pairs), and the test sample was 20% (65 training pairs). The presented data sample is highly representative, considering the number of patients: dataset includes 343 patients with cardiovascular complications (class 1 - 142, class 2 - 207). The age range of patients in the sample is 50-60 years old.

The result is the following: the best classifier is the neural network of cascade correlation with 85-88% classification accuracy. The worst classifier was the probabilistic neural network, since the accuracy of this algorithm depends on the size of the data set.

Молодець Богдан Владимирович – асистент, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара.

Буланая Татьяна Михайловна – доцент, к.т.н., Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара.

Молодець Богдан Володимирович – асистент, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара.

Булана Тетяна Михайлівна – доцент, к.т.н., Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара.

Molodets Bohdan – Assistant Professor, Oles Honchar Dnipro National University.

Bulanaya Tatyana – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Oles Honchar Dnipro National University.

ПРИМЕНЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛА КВАЗИПРОТЯЖЕННОСТИ В ЗАДАЧАХ АППРОКСИМАЦИИ ИСКАЖЕННЫХ ДАННЫХ

Аннотация. Исследована эффективность применения функционала квазипротяженности для решения задач аппроксимации данных, описываемых параметрической моделью. Представлены результаты теоретического и численного анализа, которые демонстрируют особенности поведения этого функционала как целевой функции линейного и нелинейного параметров модели данных для разных уровней шума в предположении, что параметры модели принимают одно или несколько значений. Сформулированы рекомендации по эффективному использованию функционала квазипротяженности для решения задач аппроксимации данных.

Ключевые слова: функционал, аппроксимация, данные.

Введение. Функционал квазипротяженности предназначен для решения задач обработки данных в условиях, когда исходные данные искажены шумом и аномальными значениями [1]. Для решения задач аппроксимации искаженных данных посредством заданной параметрической модели этот функционал целесообразно строить на основе функции невязки между данными и их моделью [2]. В данной работе представлены результаты исследования эффективности применения функционала квазипротяженности невязки в задачах аппроксимации искаженных данных, которые включают результаты теоретического и численного анализа поведения функционала квазипротяженности для случаев, когда на интервале наблюдения данных неизвестные параметры принимают одно или несколько значений, а данные искажены аддитивным шумом.

Постановка задачи и цель исследований. Постановка задачи заключается в исследовании эффективности применения функционала квазипротяженности, построенного на основе функции невязки между данными и их параметрической моделью, для решения задач аппрокси-

мации искаженных данных. Целью работы является формирование рекомендаций по эффективному использованию функционала квазипротяженности для решения задач аппроксимации искаженных данных.

Анализ последних исследований и публикаций. Согласно [1], постановка задачи аппроксимации данных заданной параметрической моделью заключается в минимизации функционала квазипротяженности функции невязки между этими данными и их моделью. Для непрерывного случая этот функционал задается в виде:

$$E^{(\alpha, \beta, q)}[r(x)] = \int_{-\infty}^{\infty} \psi_S^{(\alpha, \beta, q)}[r(x)] dx, \quad (1)$$

где $r(x)$ есть функция невязки, $\psi_S^{(\alpha, \beta, q)}(x) = k_S^{(\alpha, \beta, q)}[(1 + |x/\alpha|^q)^{\beta/q} - 1]$ есть стоимостная функция, α – параметр сглаживания; q – параметр степени сглаживания, причем $0 < q < \infty$; β – параметр формы, причем $-\infty < \beta \leq 1$ и $\beta < q$; $k_S^{(\alpha, \beta, q)} = 1/[(1 + |x_0/\alpha|^q)^{\beta/q} - 1]$; x_0 – точка нормировки $\psi_S^{(\alpha, \beta, q)}(x)$ на единицу. Параметры α , β , q имеют смысл свободных параметров и позволяют менять поведение стоимостной функции, обеспечивая широкие возможности по настройке процесса обработки данных на текущую шумовую обстановку [3]. В [4] отмечено, что функционал (1) не является выпуклым за исключением своих крайних случаев, а его первая вариация в точке минимума может не существовать. Однако в отличие от традиционно используемого в задачах аппроксимации квадратичного функционала [5], функционал квазипротяженности (1) предоставляет возможность решения задач аппроксимации в условиях, когда исходные данные искажены грубыми ошибками, а неизвестные параметры могут принимать не одно, а несколько значений [4]. Подобными свойствами также обладают функционалы, построенные на основе квазинормы пространства L_p ; $0 < p < 1$ [6] или на основе "минимаксно-вогнутой штрафной функции" (minimax-concave penalty function) в случае их применения к невязке решения [7].

Основная часть. Эффективность применения различных функционалов в задачах аппроксимации данных определяется, в первую очередь, наличием у них локальных минимумов, отвечающих искомым зна-

чениям неизвестных параметров модели. Для непрерывного случая из (1) можно получить, что функционал квазипротяженности для случая неизвестного линейного параметра A принимает вид целевой функции:

$$E^{(\alpha, \beta, q)}(A) = k_S^{(\alpha, \beta, q)} \int_X [(1 + |(g(x) - Af(x))/\alpha|^q)^{\beta/q} - 1] dx, \quad (2)$$

где функция $g(x)$ описывает данные, $f(x)$ – известную форму модели данных, а X – область наблюдения. В (2) для $0 < \beta < 1$ имеем $k_S^{(\alpha, \beta, q)} > 0$, для $-\infty < \beta < 0$ имеем $k_S^{(\alpha, \beta, q)} < 0$, а для $\beta \rightarrow \pm 0$ вместо (2) получаем:

$$E^{(\alpha, 0, q)}(A) = k_S^{(\alpha, 0, q)} \int_X \ln[1 + |(g(x) - Af(x))/\alpha|^q] dx, \quad (3)$$

где $k_S^{(\alpha, 0, q)} = 1/\ln[1 + |x_0/\alpha|^q] > 0$. Из (2) и (3) видно, что для тех значений параметра A , которые обращают в нуль модуль невязки $|g(x) - Af(x)|$, на графике целевой функции могут возникать локальные минимумы, отвечающие этим значениям параметра A .

Аналогично (2)-(3), функционал квазипротяженности для случая неизвестного нелинейного параметра θ имеет вид целевой функции:

$$E^{(\alpha, \beta, q)}(\theta) = k_S^{(\alpha, \beta, q)} \int_X [(1 + |(g(x) - s(x; \theta))/\alpha|^q)^{\beta/q} - 1] dx; \quad \beta \neq 0, \quad (4)$$

$$E^{(\alpha, 0, q)}(\theta) = k_S^{(\alpha, 0, q)} \int_X \ln[1 + |(g(x) - s(x; \theta))/\alpha|^q] dx; \quad \beta = 0, \quad (5)$$

где функция $s(x; \theta)$ задает модель данных с точностью до неизвестного параметра θ . Из (4)-(5) видно, что для тех значений параметра θ , которые обращают в нуль модуль невязки $|g(x) - s(x; \theta)|$, на графике целевой функции также могут возникать локальные минимумы, отвечающие этим значениям θ . В силу нелинейности параметра θ , эти локальные минимумы могут возникать даже тогда, когда при тех же условиях целевая функция для линейного параметра является выпуклой.

Рассмотрим поведение функционала квазипротяженности при наличии шума в данных для частного случая $\alpha = 0$ и $0 < \beta < 1$, когда этот функционал отражает понятие квазинормы ненормированного пространства L_β ; $0 < \beta < 1$. В этом случае возможен следующий теоретический анализ искажений истинного значения линейного параметра модели. Пусть шум $n(x)$ проявляется в том, что для каждого $x \in X$ вместо

$g(x) = A_{true} f(x)$, где A_{true} есть истинное значение A , фиксируются значения $g(x) = (A_{true} + \xi)f(x)$, т.е. $n(x) = \xi f(x)$, где ξ есть случайная величина, распределенная по закону $p(\xi)$ и для которой существует математическое ожидание. Тогда невязка между $g(x) = (A_{true} + \xi)f(x)$ и моделью $Af(x)$ в каждой точке $x \in X$ равна: $r(x) = (A_{true} + \xi)f(x) - Af(x) = (A_{true} - A + \xi)f(x)$ и вместо (2) имеем:

$$E^{(0,\beta,q)}(A; \xi) = c(\beta) \cdot |A - A_{true} - \xi|^\beta, \quad (6)$$

где $c(\beta) = \int_x |f(x)|^\beta dx / |x_0|^\beta$; $0 < \beta \leq 1$. Усредняя по ξ , из (6) получаем:

$$\mathbf{M}[E^{(0,\beta,q)}(A; \xi)] = c(\beta) \cdot \int_{-\infty}^{\infty} |A - A_{true} - \xi|^\beta p(\xi) d\xi. \quad (7)$$

Соотношение (7) указывает, что в этом случае имеем свертку функции (функционала) $E^{(\beta)}(A) = c(\beta) \cdot |A - A_{true}|^\beta$ и закона распределения $p(\xi)$. Очевидно, что эта свертка приводит к сглаживанию функционала $E^{(\beta)}(A)$, вызывая уменьшение глубины его минимумов и их уширение. Однако детали такого сглаживания могут быть разными. Так, если закон распределения $p(\xi)$ имеет «гладкую вершину» (например, как закон Гаусса), то локальные минимумы функционала $E^{(\beta)}(A)$ будут сглажены и закруглены. Однако для «островершинного» закона распределения (например, для закона Лапласа) сглаживание не будет закруглять локальные минимумы. При этом для дискретного случая можно отметить, что в предположении эргодичности случайного процесса такое сглаживание будет описываться соотношением (7) тем лучше, чем будет большим число дискретных точек. В дополнение отметим, что при отсутствии шума имеем: $p(\xi) = \delta(\xi)$, где $\delta(\xi)$ есть дельта-функция Дирака, и тогда из (7) получаем $E^{(\beta)}(A)$.

В общем случае исследование поведения функционала квазипротяженности целесообразно выполнять посредством численного моделирования. Это обусловлено, в первую очередь, сложностью необходимых аналитических преобразований, а также быстротой численного анализа самых различных ситуаций, связанных с шумом.

На рис.1 приведен пример численного моделирования функционала квазипротяженности $E^{(\beta)}(A)$; $\beta = 1/2$ для случая линейного параметра, которым являлась амплитуда модельной функции, которая принимала одно ($A = 1$; рис. 1а) и два ($A = 1$ и $A = 2$; рис. 1б) значения. Исходные данные искажались гауссовским шумом $N(0, \sigma^2)$. Видно, что полученные результаты подтверждают результаты теоретического анализа, согласно которым сглаживание локальных минимумов становится тем большим, чем большим становится шум.

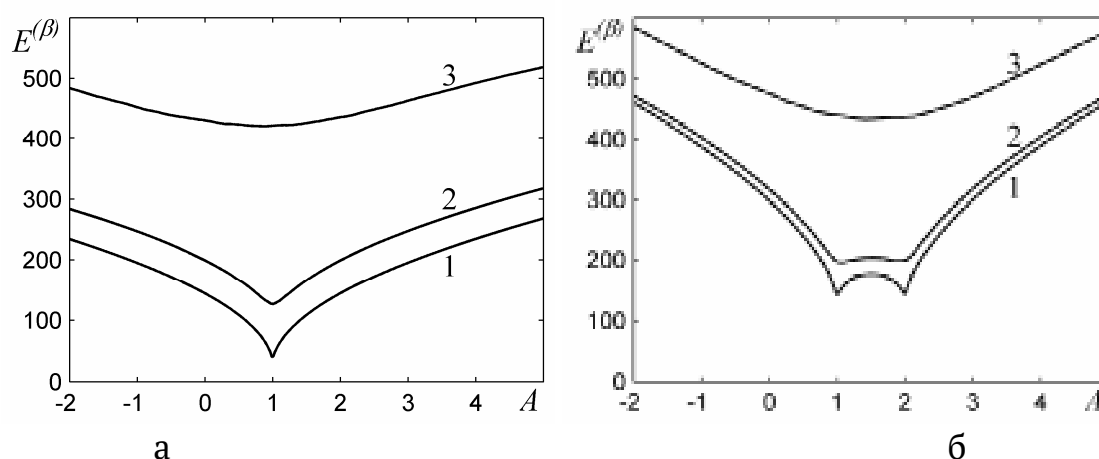


Рисунок 1 – Целевая функция функционала квазипротяженности для линейного параметра, который принимает одно (а) и два значения (б); кривые 1, 2 и 3 получены для $\sigma = 0.01$, $\sigma = 0.1$ и $\sigma = 1$, соответственно

На рис.2 приведен пример численного моделирования функционала $E^{(\beta)}(A)$; $\beta = 1/2$ для нелинейного параметра, которым являлась частота синусоиды единичной амплитуды, принимающая одно ($\nu = 1$; рис. 2а) и два ($\nu = 1$ и $\nu = 2$; рис. 2б) значения. Исходные данные искажались гауссовским шумом $N(0, \sigma^2)$. Видно, что малый уровень шума практически не влияет на поведение функционала (кривые 1 и 2), тогда как большой шум (кривая 3) сильно заглаживает его локальные минимумы, делая их трудно различимыми на осциллирующем фоне.

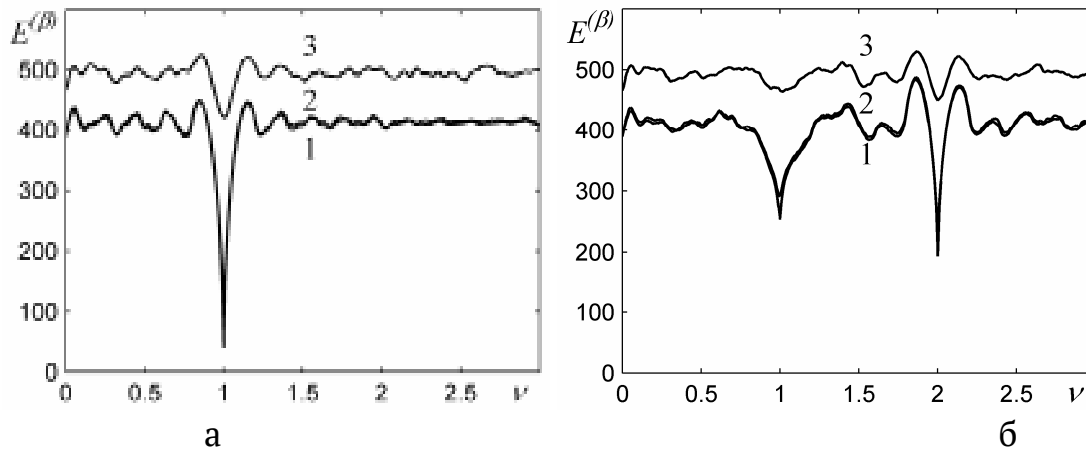


Рисунок 2 – Целевая функция функционала квазипротяженности для нелинейного параметра, который принимает одно (а) и два значения (б); кривые 1, 2 и 3 получены для $\sigma = 0.01$, $\sigma = 0.1$ и $\sigma = 1$, соответственно

Численное моделирование для случая $\alpha > 0$ показало, что функционал $E^{(\alpha, \beta, q)}$ является эффективным тогда, когда отношение "сигнал/шум" больше 10 и $\alpha \approx \sigma$. В частности, последнее справедливо для шума с законом распределения Коши, когда $\alpha = \sigma$, $\beta = 0$, $q = 2$.

Основываясь на результатах данных исследований, можно сформулировать такие рекомендации по использованию функционала квазипротяженности для эффективного решения задач аппроксимации: 1) необходим выбор адекватной параметрической модели искаженных данных; 2) необходима настройка функционала квазипротяженности на текущую шумовую обстановку; 3) необходимо применение методов оптимизации неунимодальных функций; 4) желательно комбинирование функционала квазипротяженности невязки с теми ограничениями, которые позволяют привлечь дополнительную априорную информацию.

Выводы. Эффективность применения функционала квазипротяженности в задачах аппроксимации данных обусловлена как возможностью настройки процесса аппроксимации на текущую шумовую обстановку, так и возможностью аппроксимации искаженных данных в условиях, когда неизвестные параметры модели принимают несколько значений. Увеличение уровня шума в данных приводит к ухудшению качества аппроксимации.

ЛИТЕРАТУРА / ЛІТЕРАТУРА

1. Вовк С. М. Постановка задач обработки данных на основе критерия минимума протяженности / С. М. Вовк // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2019. – N.1 – С. 157–166. DOI: 10.15588/1607-3274-2019-1-15.
2. Вовк С. М. Критерій мінімуму протяжності / С. М. Вовк // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 1 (120). – Дніпро, 2019. – С. 19 – 25.
3. Вовк С. М. Метод обробки даних в умовах складного шумового оточення / С. М. Вовк, В. В. Гнатушенко // Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. – 2018. – Вип. 8. – Т.2. – С. 1–9. DOI: 10.31388/2220-8674-2018-2.
4. Вовк С.М. Оценивание параметра с несколькими значениями / С. М. Вовк, О. Н. Прокопчук // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2019. – N. 4. – С. 14–24. DOI: 10.15588/1607-3274-2019-4-2
5. Wolberg J. Data Analysis Using the Method of Least Squares: Extracting the Most Information from Experiments / J. Wolberg. – Berlin: SpringerVerlag, 2005. – 250 p.
6. Ming-Jun Lai and Jingyue Wang An Unconstrained ℓ_q Minimization with $0 < q \leq 1$ for Sparse Solution of Under-determined Linear Systems // SIAM Journal on Optimization, 2011. – V.21. – N 1. – P. 82-101.
7. Liu Q. Robust Sparse Recovery via Weakly Convex Optimization in Impulsive Noise / Q. Liu, C. Yang, Y. Gu, H. C. So // Signal Processing. – 2018. – Vol. 152. – P. 84–89. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2018.05.020>.

REFERENCES

1. Vovk S. M. Postanovka zadach obrabotki dannyih na osnove kriteriya minimuma protyazhennosti / S. M. Vovk // Radioelektronika, informatyka, upravlinnia. – 2019. – N.1 – S. 157–166. DOI: 10.15588/1607-3274-2019-1-15.
2. Vovk S. M. Kryterii minimumu protiazhnosti / S. M. Vovk // Systemni tekhnolohii. Rehionalnyi mizhvuzivskyi zbirnyk naukovykh prats. Vypusk 1 (120). – Dnipro, 2019. – С. 19 – 25.
3. Vovk S. M. Metod obrobky danykh v umovakh skladnoho shumovoho otoczenia / S. M. Vovk, V. V. Hnatushenko // Naukovyi visnyk Tavriiskoho derz-

havnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu. – 2018. – Vyp. 8. – T.2. – S. 1–9. DOI: 10.31388/2220-8674-2018-2.

4. Vovk S.M. Otsenivanie parametra s neskol'kimi znacheniyami / S. M. Vovk, O. N. Prokopchuk // Radioelektronika, informatyka, upravlinnia. – 2019. – N. 4. – S. 14–24. DOI: 10.15588/1607-3274-2019-4-2

5. Wolberg J. Data Analysis Using the Method of Least Squares: Extracting the Most Information from Experiments / J. Wolberg. – Berlin: SpringerVerlag, 2005. – 250 p.

6. Ming-Jun Lai and Jingyue Wang An Unconstrained ℓ_q Minimization with $0 < q \leq 1$ for Sparse Solution of Under-determined Linear Systems // SIAM Journal on Optimization, 2011. – V.21. – N 1. – P. 82-101.

7. Liu Q. Robust Sparse Recovery via Weakly Convex Optimization in Impulsive Noise / Q. Liu, C. Yang, Y. Gu, H. C. So // Signal Processing. – 2018. – Vol. 152. – P. 84–89. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2018.05.020>.

Received 17.03.2020.

Accepted 23.03.2020.

Застосування функціонала квазіпротяжності в задачах апроксимації спотворених даних

Досліджена ефективність застосування функціонала квазіпротяжності для розв'язання задач апроксимації даних, описуваних параметричною моделлю. Представлені результати теоретичного й чисельного аналізу, які демонструють особливості поведінки цього функціонала як цільової функції лінійного й нелінійного параметрів моделі даних для різних рівнів шуму в припущенні, що параметри моделі приймають одне або кілька значень. Сформульовані рекомендації з ефективного використання функціонала квазіпротяжності для розв'язання задач апроксимації даних.

Using of functional of the quasi-extent in the problems of approximation of distorted data

The quasi-extent functional is intended to process the data distorted by noise and anomalous values. To solve the approximation problem of distorted data described by a parametric model it is advisable to build this functional on the basis of a residual function. The goal of this paper is to formulate the recommendations to effective use of the quasi-extent functional for approximation of distorted data.

The effectiveness of using the various functionals in the data approximation problem is determined, first of all, by the presence of such local minima that correspond to the true values of unknown model parameters closely. In this paper, it is noted that the quasi-extent functional of solution residual contains such minima both for the case of a linear parameter of data model and for the case of a non-linear parameter of data model. In particular, by setting the corresponding values of free parameters, the quasi-extent functional can be tuned to a quasinorm of the space L_p ; $0 < p < 1$. While the noise is absence, the local minima of this quasi-extent functional will exactly correspond to those values of unknown data model parameter, when using

which the residual function strictly equals to zero on a certain argument interval, i.e. when at this interval the model coincides with the data exactly. However, in the presence of moderate noise, such minima are smoothed out, leading to a decrease in their depth and broadening. Moreover, in the presence of high noise, the neighboring local minima that correspond to the different values of the sought parameter can either merge into one minimum (for the case of linear parameter), or become indistinguishable against the general background of values (for the case of nonlinear parameter). Taking the features of the quasi-extent functional into account, the recommendations about its effective use to solve the data approximation problem are formulated. The effectiveness of using the quasi-extent functional to solve the data approximation problem is due to the possibility of tuning of approximation process to the current noise environment and the possibility of approximating of distorted data under condition when unknown model parameters take several values.

Вовк Сергей Михайлович - к.ф.-м.н., доцент, Днепровский национальный университет, доцент кафедры компьютерных наук и информационных технологий.

Вовк Сергій Михайлович - к.ф.-м.н., доцент, Дніпровський національний університет, доцент кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій.

Vovk Serhii - Ph.D, Associate Professor, Oles Honchar Dnipro National University, Associate Professor of Department of Computer Science and Information Technology.

В.Ю. Каштан, В.В. Гнатушенко

ВИДАЛЕННЯ ТІНЕЙ НА ЦИФРОВИХ КОСМІЧНИХ ЗНІМКАХ НА ОСНОВІ ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ

Анотація. Розглянуто проблему ідентифікації та компенсації тіней на космічних знімках високого просторового розрізнення. У роботі використано знімки міської території, отримані супутником WorldView-3. Наявність тіней на знімках може привести до втрати корисної інформації і навіть помилок в роботі алгоритмів розпізнавання, виявлення, відстеження і класифікації об'єктів. Запропоновано новий алгоритм автоматичного виявлення та усунення тіней цифрових космічних знімків, що дозволяє відновити освітленість та підвищити якість цих знімків. Для цього використано перехід до кольорової метрики HSV, вейвлет-перетворення та контурну сегментацію. Порівняння кількісних показників, а також візуальні результати показали перевагу використання запропонованого алгоритму. Результати роботи можуть бути використані при подальшому розпізнаванні об'єктів та тематичній обробці космічних знімків.

Ключові слова: космічні знімки, вейвлет-перетворення, сегментація, текстурна характеристика, виявлення тіні, видалення тіні, кольорова метрика HSV.

Постановка проблеми. Космічні знімки високого і надвисокого просторового розрізнення знаходять застосування в різних прикладних областях і дозволяють вирішувати найрізноманітніші завдання. За допомогою таких знімків можна діагностувати стан посівів, оцінювати типи ґрунтів та навантаження на них, прогнозувати врожаї, виділяти водні об'єкти, виконувати інвентаризацію лісів із визначенням видового та вікового складу, визначати екологічний стан території, тощо [1]. Необхідність вилучення корисної інформації з первинних даних вимагає розробки нових автоматизованих програмних комплексів, здатних обробляти велику кількість інформації [2,3]. Серед безлічі різних задач, які вирішуються за допомогою обробки даних дистанційного зондування особливе місце займає задача видалення тіней. Цей клас задач потребує визначен-

ня змін на різночасових сценах знімків високого просторового розрізнення за короткий термін. Часто космічні знімки поверхні Землі містять різні шуми, в тому числі і тіні від різних об'єктів (хмар і високих будівель, дерев та ін.). Наявність затінених ділянок та ступінь поглинання чи відбиття світлових променів ускладнює процес розпізнавання і локалізації різних об'єктів, що є одним з найбільш складних і дорогих з точки зору витрат часу. Через великі витрати на обробку даних, автоматизація цього процесу набуває актуального значення. Існуючі методи видалення тіней на космічних знімках мають ряд недоліків, основним з яких є поява неоднорідності спектральних характеристик та «роздробленості» об'єктів, що суттєво ускладнює подальшу тематичну обробку даних.

Аналіз останніх досліджень. В даний час для вирішення задачі видалення тіней на космічних знімках розроблено велику кількість методів та присвячено велику кількість робіт. Дана задача залишається однією з фундаментальних проблем аналізу інформації дистанційного зондування Землі. Існуючі методи видалення тіней можна розділити на використання фізичних властивостей світла, алгоритмічні методи та методи калібрування камери супутників. В роботах [4,5] запропоновано ефективний алгоритм видалення тіней RGB зображень, що використовує їх радіометричну постобробку. Це дозволило виділити тіні на супутникових знімках Quickbird. Основним недоліком є складність автоматичного підбору порогу бінаризації зображення. Роботи [4,6,7] присвячені виділенню тіней на мультиспектральних знімках з використанням інваріантності кольорового простору RGB. Виявлення тіні здійснюється на основі розкладу зображення на R, G, B компоненти. Потім попіксельно обчислюються матриці тіней r_m , g_m , і таким чином зменшується різниця між тіньовою областю та сусідніми освітленими областями. Перевагами даного методу є його швидкість, простота реалізації та ефективність. Але існуючий метод в досить складних сценах тінь не видаляє, а лише послаблює. В роботах [8, 9] запропоновано метод, в якому видалення тіней здійснюється в три етапи: створюється 1D безтіньове зображення з постійним освітленням, 2D зображення, яке містить інформацію про колір та 3D безтіньове кольорове зображення. При цьому границі тіні ко-

ригуються за допомогою процедури зафарбовування. Метод вимагає калібрування, крім того може помилково класифікувати деякі межі об'єктів результуючого зображення як границі тіні. Робота [10] присвячена виділенню тіней з використанням переходу до кольорового простору HSV. Виявлення тіні здійснюється на основі аналізу компонент H і S, зображення сегментується на декілька областей, які мають однакову щільність тіней. Для видалення тіней інтенсивність відповідних пікселів підвищується, а потім здійснюється корекція кольору затінених ділянок вже у колірному просторі RGB. Перевагою цього методу є його швидкість. Але метод добре працює на зображеннях з різкими границями тіні. Алгоритм запропонований у роботі [11] базується на аналізі форми віконних гістограм яскравостей космічних знімків. Алгоритм використовує вікна гістограм еталонного зображення та «спеціального» зображення, інваріантного до освітлення. В результаті порівняння значень яскравості віконних гістограм двох зображень будується нове вікно безтіньового зображення. Метод дає непогані результати для тіней з різкими границями, але потребує послідовності зображень, що містять одну сцену при різних умовах денного світла. Проведені дослідження підтвердили необхідність розробки більш ефективного алгоритму видалення тіней на космічних знімках високого просторового розрізнення з урахуванням спектральних та просторових ознак, апріорних і експертних відомостей.

Метою даної роботи є розробка нового алгоритму автоматичного видалення текстури тіньових областей космічних знімків з врахуванням спектральних та просторових ознак на основі HSV-, вейвлет-перетворення та контурної сегментації. У якості вхідних даних використовуються космічні знімки супутника WorldView-3. Для визначення ефективності розробленого алгоритму будуть отримані кількісні оцінки якості видалення тіней багатоспектрального зображення.

Виклад основного матеріалу. На основі проведених досліджень [12,13], в даній роботі пропонується алгоритм видалення тіней космічних знімків з використанням контурної сегментації даних [14] на основі побудови вейвлет-базисів з декореляцією первинних

видових даних. Схема алгоритма представлена на рис.1. Реалізація цього алгоритму наступна:

1. Завантажуємо багатоспектральне зображення RGB .
2. Декореляція первинного багатоспектрального зображення у кольорову модель HSV (позначимо HSV_{RGB}):

$$H = \begin{cases} \theta, & \text{якщо } B \leq G \\ 360^\circ - \theta, & \text{якщо } B > G \end{cases}; \quad (1)$$

$$S = 1 - \frac{3}{R + G + B} \min(R, G, B); \quad (2)$$

$$V = \frac{1}{3}(R + G + B). \quad (3)$$

$$\text{де } \theta = \cos^{-1} \left\{ \frac{\frac{1}{2}[(R - G) + (R - B)]}{\sqrt{(R - G)^2 + (R - B)(G - B)}} \right\}. \quad (4)$$

Оскільки тінь менш освітлена, ніж нетіньова частина зображення, то її можливо виявити при розгляді каналів насиченості (S) та яскравості (V), що зберігають інформацію про світлоту. Для більшості зображень значення компоненти V менше в тіньових областях. Тому для виявлення тіней аналізуємо значення параметрів S та V кожного пікселя.

3. Наступним етапом є застосування вейвлет-перетворення. Дане перетворення згладжує зміни яскравості об'єктів, так що локальні контрасти зображення зменшуються, що дозволяє виявити тіні об'єктів. Виконуємо вейвлет-перетворення над компонентами $S_{HSV_{RGB}}$ та $V_{HSV_{RGB}}$. Розклад відповідних компонентів зображення здійснюється до першого рівня декомпозиції (L), так як цього достатньо для виявлення тіней, за оптимального вейвлет-базису з розкладанням на апроксимуючі та деталізуючі коефіцієнти:

$$f_{RGB}(r) \rightarrow f_{XYZ}(r), \quad (5)$$

$$W(S) = Tc_X^L(S) + \sum_{l=1}^L [Td_X^{l,1}(S)], \quad (6)$$

$$W(V) = Tc_X^L(V) + \sum_{l=1}^L [Td_X^{l,1}(V)], \quad (7)$$

де Tc_X^L і $Td_X^{l,1}$ - апроксимуючі та деталізуючі коефіцієнти рівня L .

4. Апроксимуючі коефіцієнти зображень W_s та W_v містять позитивні значення вейвлет-перетворення, що асоціюються з яскравістю пікселя; деталізуючі коефіцієнти – значення, які коливаються близько нуля. Пікселі з найбільш високим абсолютним значенням вейвлет-коефіцієнтів $W_s(i,j) > W_v(i,j)$, позначаються як тіньові, а решта – як нетіньові. Пікселі з найбільш низьким абсолютним значенням вейвлет-коефіцієнтів $D(i,j) > T$ можуть бути класифіковані як ті, що належать тіні, а інші – як не тіньові. Далі обчислюємо відносну контрастну різницю та отримуємо тіньову маску:

$$D(i,j) = \frac{W_s(i,j) - W_v(i,j)}{W_s(i,j) + W_v(i,j)} \quad (8)$$

де $D(i,j)$ являє собою процентну різницю і порівнюється з граничним значенням T . Якщо різниця більше, ніж T , можна зробити висновок, що в еталонному зображенні в місці розташування (i, j) є тінь. Порівнюючи $W_s(i, j)$ зі $W_v(i, j)$, можна визначити, в якій із них знаходиться тінь.

5. Отримана на попередньому етапі тіньова маска часто містить велику кількість неправильно класифікованих пікселів, областей тіні, особливо ті, які розташовані поблизу тіньової границі та належать одному і тому ж типу об'єктів. Ці області мають різкі границі та інтенсивність, що містить мало інформації про текстуру поверхні та ускладнює її видалення зі збереженням природного вигляду текстури. Тому наступним етапом є застосування контурної сегментації до зображення $D(i,j)$, запропонованої у роботі [14], що дозволяє визначити просторові та спектральні особливості об'єкта одного і того ж типу з обох сторін та точно визначити границі тіньових областей.

6. Наступним етапом є видалення тіні з зображення. Для цього розраховуємо порогове значення області бінарної маски компоненти яскравості:

$$M_{shad} = \begin{cases} 1, & \text{при } W_v \geq D(i,j)_{wv} \wedge W_s \geq D(i,j)_{ws} \\ 0, & \text{в інших випадках} \end{cases} \quad (8)$$

7. Виконаємо зворотне вейвлет-перетворення та перехід до кольорової метрики RGB:

$$f_{\bar{XYZ}}(r) = App_X^L(r) + Det_{\bar{X}}(r),$$

$$f_{\bar{XYZ}}(r) = f_{\bar{RGB}}(r). \quad (9)$$

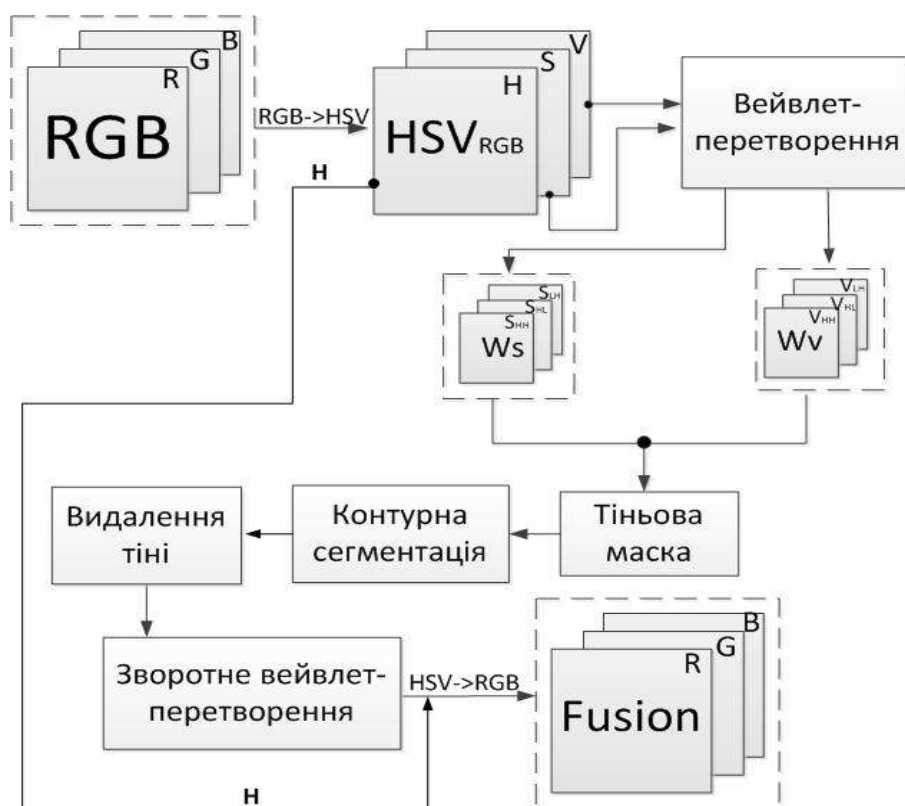


Рисунок 1 - Схема алгоритму видалення тіні

Запропонований алгоритм був протестований на космічних знімках Worldview-3 з просторовим розрізненням: 1,24 м – в багатоканальному режимі, 3,7 – в інфрачервоному діапазоні. На рис. 2 представлені зображення: до обробки – фрагмент багатоканального зображення з вибором у якості окремих R-, G-, B-компонент, що містить об'єкти місцевості (рис 2а), тіньової бінарної маски (рис.2б), контурної сегментації (рис. 2в) та після обробки запропонованим у роботі алгоритмом (рис.2г). Візуальний аналіз одержаних результатів дозволяє видалити текстуру тіньової області на супутниковому зображенні, що є близьким до еталонного зображення.

Крім візуальної якості обробки зображень була проаналізована точність виділення тіней космічних знімків:

1. Точність тіньових областей p_s [15]:

$$p_s = \frac{TP}{TP + FP}, \quad (10)$$

де TP – кількість пікселів еталонного зображення, FP – кількість не тіньових пікселів, що належать тіні.

2. Точність нетіньових областей p_n :

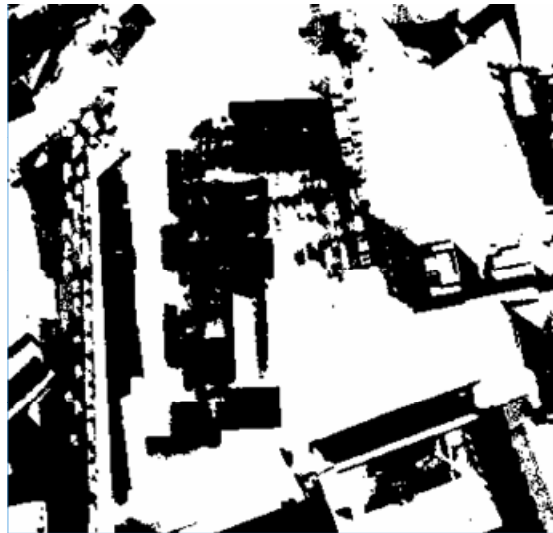
$$p_n = \frac{TN}{TN + FN}, \quad (11)$$

де – FN – кількість тіньових пікселів, що належать тіні, TN – загальна кількість не тіньових пікселів, що дорівнює:

$$TP + TN + FP + FN \quad (12)$$



а) первинне



б) тіньова маска



в) контурна сегментація



г) після обробки

Рисунок 2 - Фрагменти зображень

У таблиці 1 представлені експериментальні результати оцінки точності виділення тіней, отриманих окремо відомими кольоровими метриками (HSV, HSI, YIQ, HCV) і запропонованим у роботі алгоритмом. Показано, що запропонований алгоритм дозволяє краще виділяти області тіней у порівнянні з існуючими кольоровими метриками. При порівнянні двох зображень пропонується також використовувати пікове відношення сигнал-шум (*PSNR*), яке означає співвідношення між максимумом можливого значення сигналу і потужністю шуму, що спотворює значення сигналу:

$$PSNR = 20 \log_{10} \left(\frac{L^2}{\frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (I_r(x,y) - I_f(x,y))^2} \right), \quad (13)$$

де x_i, y_i - початкові координати, x_r, y_r - кінцеві координати.

Таблиця 1

Результати оцінки точності виділення тіней
за допомогою різних критеріїв

Кольорові метрики	Точність тіньових областей, $p_s(\%)$	Точність не тіньових областей, $p_n(\%)$
HSV	79,2	88,1
HSI	39,5	88,5
YIQ	88,1	92,4
HCV	80,8	70,3
Запропонований (Fusion) алгоритм	95,6	94,7

У таблиці 2 наведено розраховані коефіцієнти *PSNR* для первинного та синтезованого зображень. Аналіз отриманих результатів дозволяє визначити, що візуальна якість еталонного зображення нижча ніж при використанні запропонованого алгоритму, що впливає на якість розпізнавання об'єктів та підвищують якість первинних космічних знімків на 10–12%.

Таблиця 2

Результати коефіцієнта PSNR

Зображення	PSNR
Еталонне	17,1391
Після видалення тіней	22,1391

Для оцінки швидкості роботи існуючих методів видалення тіней (AP, K-means) та запропонованого в роботі алгоритму було розраховано середній час їх роботи для тестового космічного знімку. Оцінка швидкості роботи методів виконувалась на персональному комп'ютері з наступними параметрами: CPU Intel Core 2 Quad Q6600, 2.4 GHz, 8Гб оперативної пам'яті, операційна система Windows 10. Результати роботи методів видалення тіней наведені в таблиці 3.

Таблиця 3

Результати дослідження швидкості обробки методів видалення тіней

Методи	Швидкість обробки даних в сек.
	Космічний знімок (25228770 байт)
AP	120,11
K-means	45,13
Запропонований метод	1,50

Висновки. У роботі вирішено актуальну задачу автоматичного виявлення та видалення тіней на цифрових космічних знімках. Наукова новизна та практична цінність роботи полягає у розробці нового методу видалення тіней космічних знімках WorldView-2 на сонові HSV-, вейвлет-перетворення та контурної сегментації, що дозволяє скоротити час на обробку даних та підвищити точність подальшого розпізнавання об'єктів на зображеннях. Це досягається, зокрема, за рахунок згладжена зміни яскравості об'єктів, так що локальні контрасти зображення зменшуються, що дозволяє виявити області тіней об'єктів та виділити границі тіньових об'єктів зі збереженням природного вигляду текстури поверхні на основі комплексного використання вейвлет-перетворення та контурної сегментації. Тестування показали, що запропонований алго-

ритм підвищує достовірність видалення тіней цифрових зображень, при цьому враховує тіньові особливості на границях зображення, поданого до аналізу, і може використовуватися для попередньої обробки космічних знімків.

ЛІТЕРАТУРА / ЛИТЕРАТУРА

1. Schowengerdt R. (2007), Remote sensing: models and methods for image processing, New York: Academic Press. P.560.
2. Pansharpening technology of high resolution multispectral and panchromatic satellite images / V. V. Hnatushenko, Vik. V. Hnatushenko, O. O. Kavats, V. Yu. Shevchenko // Scientific Bulletin of National Mining University. – 2015. – № 4. – P. 91–98
3. Hnatushenko V.V., Hnatushenko Vik.V., Mozgovyi D.K., Vasyliiev, V.V. “Satellite technology of the forest fires effects monitoring”. Scientific Bulletin of National Mining University, 2016. Issue 1 (151), pp. 70-76.
4. Marchant J.A., Onyango C.M. Shadow invariant classification for scenes illuminated by daylight // Journal Optical Society of America A. – 2000. – Vol. 17. – № 12. – P.1952-1961.
5. Renno, J.-P.R. Evaluation of shadow classification techniques for object detection and tracking / J.-P.R. Renno, J. Orwell, G.A. Jones // International Conference on Image Processing. – Singapore, 2004. – Vol. 1. – P.143–146.
6. Chen, B. Shadow Detection Based on RGB Color Model // B. Chen, D. Chen / Intelligent Computing in Signal Processing and Pattern Recognition. Lecture Notes in Control and Information Sciences. – 2006. – Vol. 345. – P. 1068–1074.
7. Finlayson G. D. On the Removal of Shadows from Images / G. D. Finlayson, S. D. Hordley, C. Lu, M. S. Drew // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2006. – Vol. 28, № 1. – P. 59–68.
8. Giles, P. Remote sensing and cast shadows in mountainous terrain / P. Giles // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. – 2001. – Vol. 67 (7). – P. 833–839.
9. Rau, J.-Y. True orthophoto generation of built-up areas using multi-view images / J.-Y. Rau, N.-Y. Chen, L.-C. Chen // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. – 2002. – Vol. 68 (6). – P. 581–588.
10. R.Cucchiara, C.Grana, M. Piccardi, A. Prati, Detecting moving objects, ghosts, and shadows in video streams//IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 25, no. 10, 2003, pp. 1337-1342.

11. Dare, P.M. Shadow analysis in high-resolution satellite imagery of urban areas / P.M. Dare // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – 2005. – Vol. 71. – P. 169–177.
12. Kahtan V.Yu. Satellite Imagery Features for the Image Similarity Estimation [Electronic recourse] / Y. I. Shedlovskaya, V. V. Hnatushenko, V. Yu. Kashtan // International Young Scientists Forum on Applied Physics 2017, October, 16 – 20, Lviv, Ukraine : Proceedings. –Lviv, 2017. – p. 359-362.
13. Kahtan V.Yu. Processing technology of multispectral remote sensing images [Electronic recourse] / V.Yu. Kahtan, V. V. Hnatushenko, Y. I. Shedlovskaya // International Young Scientists Forum on Applied Physics. 2017. October, 16 – 20, Lviv, Ukraine: Proceedings. Lviv, 2017. – p. 355-358.
14. Каштан В.Ю. Контурна сегментація цифрових супутникових знімків з виділенням особливих точок на основі вейвлет-перетворення / В.Ю. Каштан, В.В. Гнатушенко // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 1 (120): зб. наук. праць. – Дніпро, 2019. – с. 3-11.
15. Eli Arbel and Hagit Hel-Or. "Shadow Removal Using Intensity Surfaces and Texture Anchor Points". IEEE. transactions on pattern analysis and machine intelligence, vol. 33, no. 6, June 2011.

REFERENCES

1. Schowengerdt R. (2007), Remote sensing: models and methods for image processing, New York: Academic Press. P.560.
2. Pansharpening technology of high resolution multispectral and panchromatic satellite images / V. V. Hnatushenko, Vik. V. Hnatushenko, O. O. Kavats, V. Yu. Shevchenko // Scientific Bulletin of National Mining University. – 2015. – № 4. – P. 91–98
3. Hnatushenko V.V., Hnatushenko Vik.V., Mozgovyi D.K., Vasyliiev, V.V. "Satellite technology of the forest fires effects monitoring". Scientific Bulletin of National Mining University, 2016. Issue 1 (151), pp. 70-76.
4. Marchant J.A., Onyango C.M. Shadow invariant classification for scenes illuminated by daylight // Journal Optical Society of America A. – 2000. – Vol. 17. – № 12. – P.1952-1961.
5. Renno, J.-P.R. Evaluation of shadow classification techniques for object detection and tracking / J.-P.R. Renno, J. Orwell, G.A. Jones // International Conference on Image Processing. – Singapore, 2004. – Vol. 1. – P.143–146.

6. Chen, B. Shadow Detection Based on RGB Color Model // B. Chen, D. Chen / Intelligent Computing in Signal Processing and Pattern Recognition. Lecture Notes in Control and Information Sciences. – 2006. – Vol. 345. – P. 1068–1074.
7. Finlayson G. D. On the Removal of Shadows from Images / G. D. Finlayson, S. D. Hordley, C. Lu, M. S. Drew // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2006. – Vol. 28, № 1. – P. 59–68.
8. Giles, P. Remote sensing and cast shadows in mountainous terrain / P. Giles // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. – 2001. – Vol. 67 (7). – P. 833–839.
9. Rau, J.-Y. True orthophoto generation of built-up areas using multi-view images / J.-Y. Rau, N.-Y. Chen, L.-C. Chen // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. – 2002. – Vol. 68 (6). – P. 581–588.
10. R.Cucchiara, C.Grana, M. Piccardi, A. Prati, Detecting moving objects, ghosts, and shadows in video streams//IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 25, no. 10, 2003, pp. 1337-1342.
11. Dare, P.M. Shadow analysis in high-resolution satellite imagery of urban areas / P.M. Dare // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – 2005. – Vol. 71. – P. 169–177.
12. Kahtan V.Yu. Satellite Imagery Features for the Image Similarity Estimation [Electronic recourse] / Y. I. Shedlovskaya, V. V. Hnatushenko, V. Yu. Kashtan // International Young Scientists Forum on Applied Physics 2017, October, 16 – 20, Lviv, Ukraine : Proceedings. –Lviv, 2017. – p. 359-362.
13. Kahtan V.Yu. Processing technology of multispectral remote sensing images [Electronic recourse] / V.Yu. Kahtan, V. V. Hnatushenko, Y. I. Shedlovskaya // International Young Scientists Forum on Applied Physics. 2017. October, 16 – 20, Lviv, Ukraine: Proceedings. Lviv, 2017. – p. 355-358.
14. Kashtan V.Iu. Konturna sehmentatsiia tsyfrovyykh suputnykovykh znimkiv z vydilenniam osoblyvykh tochk na osnovi veivlet-peretvorennia / V.Iu. Kashtan, V.V. Hnatushenko // Systemni tekhnolohii. Rehionalnyi mizhvuzivskiy zbirnyk naukovykh prats. – Vypusk 1 (120): zb. nauk. prats. – Dnipro, 2019. – s. 3-11.
15. Eli Arbel and Hagit Hel-Or. "Shadow Removal Using Intensity Surfaces and Texture Anchor Points". IEEE. transactions on pattern analysis and machine intelligence, vol. 33, no. 6, June 2011.

Received 18.03.2020.

Accepted 24.03.2020.

**Удаление теней на цифровых космических снимках
на основе вейвлет-преобразования**

В работе предложен новый метод автоматического удаления теней на цифровых космических снимках с использованием их цветных и текстурных характеристик на основе вейвлет-преобразования. Предложенный метод был протестирован на спутниковых изображениях. Полученные количественные показатели для предлагаемого метода, а также визуальные результаты показали преимущество использования предложенного метода. Результаты работы могут быть использованы при дальнейшем распознавании объектов и тематической обработке спутниковых снимков.

Shadow removal on digital satellite images using wavelet transforms

Shadow detection and removal in real scene images is always a challenging but yet intriguing problem. Shadows cause hindrance to correct feature extraction of image features like buildings, towers etc. in urban areas it may also cause false color tone and shape distortion of objects, which degrades the quality of images. Hence, it is important to segment shadow regions and restore their information for image interpretation. Shadows are generated by a local and relative absence of light. Shadows are, first of all, a local decrease in the amount of light that reaches a surface. Secondly, they are a local change in the amount of light rejected by a surface toward the observer. Most shadow detection and segmentation methods are based on image analysis. This paper presents a novel algorithm for automatic shadow detection and removing shadows using HSV color model, contour segmentation and wavelet transform based on a threshold determined by wavelet coefficients in complex urban color remote sensing images for solving problems caused by shadows. In the proposed algorithm shadows are detected using S and V components which is invariant to shadow i.e., it conveys the spectral and color characteristics of image features, regardless of variations in scene illumination condition and means of wavelet coefficients. The multi-resolution property of the wavelet transform leads into four different bands without the loss of spatial information. Once the shadows are detected they are classified and a non shadow area around each shadow termed as buffer area is estimated using contour segmentation. Experiments show that the new algorithm can accurately detect shadows from urban high-resolution remote sensing images and can effectively restore shadows with a rate of over 85%. The proposed algorithm can be used for further object recognition and thematic processing of scanner images.

Каштан Віта Юріївна – к.т.н, доцент кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара (м. Дніпро).

Гнатушенко Володимир Володимирович — д.т.н., професор, завідувач кафедри інформаційних систем та технологій Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» (м. Дніпро).

Каштан Вита Юрьевна – к.т.н., доцент кафедры компьютерных наук и информационных технологий Днепровского национального университета имени Олеся Гончара (г. Днепр).

Гнатушенко Владимир Владимирович – д.т.н., профессор, заведуючий кафедри інформаційних систем і технологій національного технічного університету «Дніпровська політехніка» (г. Дніпр).

Kashtan Vita – Ph.D. in technical science, assistant professor of department of computer science and information technologies, Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine.

Hnatushenko Volodymyr – doctor of technical science, professor, head of department of information systems and technologies, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine.

К.С. Красніков

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВАКУУМНОЇ ДЕГАЗАЦІЇ СТАЛІ У КОВШІ З АРГОННОЮ ПРОДУВКОЮ

Анотація. У статті подано математичну модель нестационарного процесу деазотації і дегідрогенізації розплаву сталі у вакууматорі камерного типу з аргонною продувкою. Дегазация сталі за допомогою вакууму — поширена серед металургійних підприємств технологія, яка дає можливість досягати надзвичайно низької концентрації водню та азоту у металевому розплаві, що необхідно для підвищення якості сталевих виробів. За відомою гіпотезою спочатку атоми газу знаходяться у розплаві у розчиненому стані. Бульбашки водню і азоту формуються з розчину на поверхні ковшової футерівки при умові достатньо низького феростатичного тиску металевого розплаву. Тиск, необхідний для появи бульбашки, визначається відповідно закону Сівертса. Значною мірою на дегазацию впливає і продувка аргоном, бульбашки якого збирають водень і азот на своєму шляху, спливаючи через розплав. Також важливим завданням є зменшення тривалості дегазации для збереження температури розплаву на достатньо високому рівні. Проведення чисельних досліджень означеного вище процесу на математичній моделі зменшує витрати часових і фінансових ресурсів, тому побудова моделі є актуальним завданням. Опис плинну розплаву і газів у ковші здійснюється на основі законів збереження маси та вектору кількості руху суцільного середовища, що виправдано через дрібний розмір бульбашок і їх велику кількість. З огляду на складність пошуку аналітичного розв'язку нелінійних диференціальних рівнянь у часткових похідних у тривимірній постановці, пропонується використовувати метод центральних різниць, який має достатню точність і широко використовується для подібних задач. Обчислювати математичну модель пропонується у комп'ютерній програмі на мові C#, яка має широкі можливості по програмуванню алгоритмів. Програмний додаток дозволить оцінити вплив інтенсивності аргонної продувки, а також глибини розплаву, на ступінь його дегазации, що може бути використано при впровадженні технологічних рекомендацій у виробництво сталі.

Ключові слова: вакууматор камерного типу, дегазация металевого розплаву, суцільне багатоскладове середовище, рівняння Нав'є-Стокса.

Постановка проблеми. Пошук доцільних технологічних параметрів камерного вакуумування, яке широко використовується сьогодні для

досягнення високої якості сталі, в промислових або лабораторних умовах є коштовним і, з огляду на високу температуру розплаву та умови перебігу процесу вакуумування, не достатньо інформативним. В той же час математичне моделювання дозволяє одержати детальний опис системного стану означеного процесу при значно меншій вартості проведення дослідів, кількість яких сягає сотні через вимогу достовірності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогоднішній день існує багато досліджень процесу вилучення водню та азоту. У роботі [1] автори надають інформацію про джерела азоту та водню в сталі, про транспортування азоту через шлак за законом Фіка та оцінюють ступінь десорбції азоту. Також наведено перелік параметрів експерименту, що використовуються з під час ковшових операцій, наприклад, вага металу, вага доданого коксу, час перемішування, швидкість потоку інертного газу, товщина шару шлаку, загальний вміст водню та азоту. Автори пропонують порівняння експериментальних і розрахункових концентрацій за формулами.

Багато математичних моделей дегазації азоту використовують рівняння у частинних похідних, наприклад, представлена в роботі [2] математична модель використовує зв'язані динаміку рідини та багатофазний потік для прогнозування розподілів азоту та водню в рідкій сталі. Відповідні рисунки показують поле швидкості та концентрацію газу.

Автори роботи [3] оцінюють параметри бульбашок для дегазації у стовпі аргону, який підіймається з дна ковша. Їх модель розглядає поверхневий натяг рідкої сталі, середній розмір бульбашки, який впливає на деазотацію. Припускається постійна кількість пузирів і постійна температура сталі (1600 °C).

У дисертації [4, с. 33-36] наведено графічну залежність вмісту водню від тривалості дегазації. Встановлено, що кінетику дегазації водню та азоту можна прогнозувати за допомогою реакції першого порядку. Вказується, що достатньо 10 хвилин, щоб зменшити вміст водню та азоту до необхідного рівня. Автор зауважує, що кисень та сірка впливають на видалення азоту, тому їх вміст повинен бути нижче 80 ppm.

Автор роботи [5, стор. 17-19, 63-75] надає деталі молекулярної реакції газу водню та азоту з їх коефіцієнтами дифузії у рідкому залізі. Автор робить помітки про бульбашки CO, які часто утворюються під час вакуумування, перемішують розплав та являють собою "малі вакуумні камери" для газів H_2 і N_2 . Така ж ситуація виникає, коли під час продування виникають тисячі бульбашок аргону. Автор подає вирази констант розчинності для H_2 , N_2 та залежність концентрації H в сталі від загального обсягу необхідного аргону та маси сталі в ковші. Також автор описує основні конструктивні особливості дегазаційних установок та технологічні варіанти сталевих вакуумування в ковші.

Робота [6] присвячена дослідженню десорбції азоту з розплавленої сталі на експериментальному апараті. Швидкість десорбції N_2 визначається рівняннями першого порядку за допомогою трьох стадій: перенесення азоту з розплаву в інтерфейс; хімічна реакція утворення молекул N_2 ; передача азоту від інтерфейсу до об'ємного газу.

Автори [7] розглядають 2D математичне моделювання розкислення з трьома пов'язаними процесами: течією розплаву з турбулентністю; кінетика коалесценції; динамічний кисневий баланс. Наявність шлаку на вільній поверхні не розглядається і передбачено стаціонарні умови процесу. Автори відобразили графічну залежність кількості часток включень від тривалості.

Серед існуючих методів вакуумної дегазації широко використовуються два методи: заглиблення спеціального рециркуляційного дегазатора у розплав і розміщення ковша у вакуумному дегазаторі.

Огляд літературних джерел виявив декілька особливостей перебігу вакуумної дегазації:

1) Розміщення ковша у вакуумному дегазаторі [8, с. 12-13] є суттєво легшим ніж організація роботи рециркуляційного способу вакуумної дегазації. Також у порівнянні з дегазацією у камері рециркуляційний спосіб має вищу інвестиційну і операційну коштовність (вимагає нагрівання перед заглибленням у розплав і потребує більше простору над ковшем), але дозволяє легше керувати кипінням, брати проби температури

і розплаву під вакуумом, розміщувати відеокамеру для спостереження поверхні розплаву [9].

2) Бульбашки інертного газу добре забирають водень і азот з розплаву, виносячи їх крізь товщу розплаву на поверхню. Врахування газу у рівняннях моделей відбувається за допомогою трьох способів: квазі-однофазного із зменшеною густиною розплаву; комбінування Ейлеревого опису з Лангражевим для прогнозуванням траєкторії руху бульбашок без їх взаємодії і з врахуванням наявності газу під час обчислення рівнянь Нав'є-Стокса для фази суцільного середовища розплаву; Ейлерів опис двох взаємопроникаючих фаз суцільного середовища і з постійним розміром бульбашок. На початку дегазації з продуванням аргонном швидкість вивільнення водню через бульбашки аргону у п'ять разів перевищує швидкість його вивільнення через поверхню металевому розплаву.

3) В існуючих роботах стисливість суміші розплав-газом часто не враховується, що може спричинити неадекватність результатів чисельних досліджень.

4) Вміст розчиненого водню і азоту у металевому розплаві визначається за законом Сівертса. Відповідно до нього при зменшенні тиску в розчині (по декільком причинам) створюються сприятливі умови виникнення бульбашок водню і азоту на твердих поверхнях ковша, на включеннях всередині розплаву або на бульбашках аргону під час продування.

Формулювання мети дослідження. Метою роботи є визначення залежності дегазації розплаву від інтенсивності продування і глибини розплаву на основі законів збереження у вигляді нелінійних диференціальних рівнянь у часткових похідних для подальшого визначення раціональних параметрів процесу.

Викладення основного матеріалу дослідження. Основні припущення для математичної моделі:

1) Поверхня розплаву є плоска.

2) Тіло розплаву має форму усіченого конуса (рис. 1), тіло зберігає постійний об'єм у ковші та є в'язкою рідиною Ньютона.

3) Водень і азот розчиняються в розплаві відповідно до закону Сівертса і формування пузирів відбувається на поверхні ковшової футерівки в залежності від феростатичного тиску розплаву.

4) Вакуумне наближення використовується для врахування стисливості газу.

5) Розчинені гази вивільняються з розплаву завдяки пузирям аргону зі швидкістю, пропорційною концентрації аргону та відповідного газу.

6) Газові пузирі представляються суцільним середовищем, яке рухається наскрізь розплав із постійною швидкістю, припускаючи миттєве її досягнення.

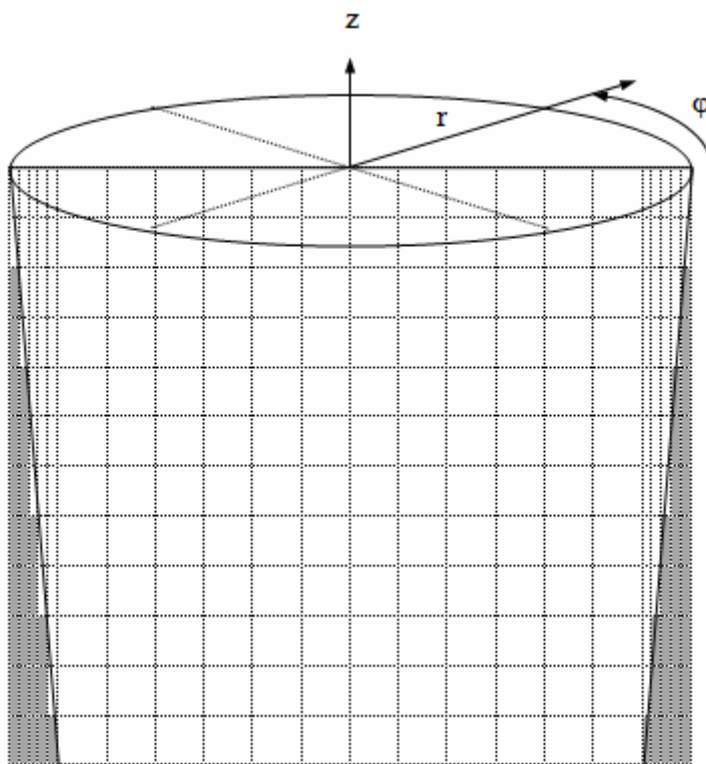


Рисунок 1 - Розрахункова область з урахуванням конусності ковша

Розплав представлений багатоскладовим суцільним середовищем з барицентричною швидкістю і з урахуванням ефективною стисливості газу [10]. Рівняння руху континууму виражається за допомогою наближення Буссинеска для плавучості:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -\vec{\nabla}\tilde{p} + \nu_e\Delta\vec{v} + \zeta'_e\vec{\nabla}(\vec{\nabla}\cdot\vec{v}) - \alpha\vec{g}, \quad (1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = -\Phi, \quad (2)$$

$$\Phi = \vec{\nabla} \cdot (\alpha \vec{w}_a^c + D_a \vec{\nabla} \alpha) - \Phi_a, \quad (3)$$

$$\Phi_a = \psi_a - \alpha \zeta \rho_0 \vec{g} \vec{v}_a, \quad (4)$$

Розрахунок газового руху враховує поле швидкості розплаву та стисливість середовища [10]:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot [\alpha (\vec{v} + \vec{w}_a^c)] = \vec{\nabla} \cdot (D_a \vec{\nabla} \alpha) + \psi_a - \zeta \rho_0 \vec{g} \cdot [\alpha (\vec{v} + \vec{w}_a^c) + D_a \vec{\nabla} \alpha] + \psi_{HN}, \quad (5)$$

$$\psi_{HN} = \max(H - K_H \sqrt{p_{H_2}}, 0) + \max(N - K_N \sqrt{p_{N_2}}, 0) \quad (6)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (H \vec{v}) = \vec{\nabla} \cdot (D_H \vec{\nabla} H) - k_H H \alpha - \max(H - K_H \sqrt{p_{H_2}}, 0), \quad (7)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (N \vec{v}) = \vec{\nabla} \cdot (D_N \vec{\nabla} N) - k_N N \alpha - \max(N - K_N \sqrt{p_{N_2}}, 0), \quad (8)$$

де ν_e — ефективна (з врахуванням турбулентної) в'язкість середовища; ζ' — друга в'язкість, що виникає через стисливість; \vec{w}_a^c — колективна швидкість газового поля; D_a , D_H , D_N — коефіцієнти ефективного розсіювання відповідно аргону, водню і азоту; k_H , k_N — коефіцієнти пропорційності захвату атомів газу бульбашками; ψ_a — джерело об'ємної частки аргону поблизу фурми; K_H , K_N — коефіцієнти розчинності поділеної на активність відповідних газів у розплаві; p_H , p_N — тиск, враховуючи і феростатичний і всередині бульбашки ($p_{atm} + \rho g h + 2\sigma / r$).

Рівняння доповнюються граничними умовами. Для поля швидкості: на поверхні розплаву, на стінках ковша і на вісі ковша — умова не протікання і вільного ковзання. Для поля аргону: на поверхні розплаву — вільне перенесення у повітря. Для полів азоту і водню: на поверхні розплаву — вивільнення з розплаву сталі.

Для чисельного розв'язання системи рівнянь (1)–(7) використовується циліндрична система координат і спеціально розроблений метод [10].

Висновки. Побудовано математичну модель, яка містить рівняння збереження вектору кількості руху металевому розплаву та об'ємної частки газів у ньому, доповнюючи рівняння граничними умовами для розв'язання. Циліндрична система координат добре відповідає геометрії

задачі. Пропонується використовувати метод центральних різниць для чисельного розв'язання рівнянь. Обчислювати математичну модель пропонується у комп'ютерній програмі на мові С#, яка має широкі можливості по програмуванню алгоритмів. Програмний додаток дозволить оцінити вплив потужності аргонної продувки, а також глибини розплаву на ступінь його дегазації, що може бути використано при впровадженні технологічних рекомендацій у виробництво сталі.

ЛИТЕРАТУРА / LITERATURE

1. Fruehan R.J., Misra S. Hydrogen and nitrogen control in ladle and casting operations. Report, Pittsburgh, PA. — 2005.
DOI: <https://doi.org/10.2172/1216251>.
2. Shan Yu, Miettinen J. and others. Mathematical modeling of nitrogen removal from the vacuum tank degasser. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim: Steel research int. 86 (2015) No. 5.
3. Gobinath R., Vetrivel Murugan R. Denitrogenation model for vacuum tank degasser. International Conference on Advances in Metallurgy, Materials and Manufacturing. IOP Publishing Ltd. — 2018.
4. Steneholm K. The effect of ladle treatment on steel cleanliness in tool steels. Doctoral thesis, Stockholm. — 2016.
5. Валуев Д. В. Внепечные и ковшовые процессы обработки стали в металлургии. Уч. пособие. 2-е испр. изд. / Д.В. Валуев; Юргинский технологический институт Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. — 202с.
6. Yamanaka R., Ogawa K. and others. Denitrogenization mechanism from molten steel by flux treatment. ISIJ International, Vol. 32 (1992), No. 1, pp. 136-141.
7. Shirabe K., Szekely J. A mathematical model of fluid flow and inclusion coalescence in the R-H vacuum degassing system. Transactions ISIJ, Vol. 23, 1983. pp. 465 — 474.
8. Shan Yu. Numerical modeling of dehydrogenation and denitrogenation in industrial vacuum tank degassers. A doctoral dissertation for the degree of Doctor of Science (Technology), Aalto University School of Chemical Technology, Espoo, Finland, 3 October, — 2014. 50 pp.
9. Zulhan Z., Schrade C. Vacuum Treatment of Molten Steel: RH (Ruhstahl Heraeus) versus VTD (Vacuum Tank Degasser) // SEAISI Conference and Exhibition, Kuala Lumpur. — 2014. p. 7.

10. Огурцов А. П., Самохвалов С. Є. Математичне моделювання теплофізичних процесів у багатофазних середовищах / Київ: Наукова думка. — 2001. — 409 с.

REFERENCES

1. Fruehan R.J., Misra S. Hydrogen and nitrogen control in ladle and casting operations. Report, Pittsburgh, PA. — 2005.
DOI: <https://doi.org/10.2172/1216251>.
2. Shan Yu, Miettinen J. and others. Mathematical modeling of nitrogen removal from the vacuum tank degasser. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim: Steel research int. 86 (2015) No. 5.
3. Gobinath R., Vetrivel Murugan R. Denitrogenation model for vacuum tank degasser. International Conference on Advances in Metallurgy, Materials and Manufacturing. IOP Publishing Ltd. — 2018.
4. Steneholm K.. The effect of ladle treatment on steel cleanliness in tool steels. Doctoral thesis, Stockholm. — 2016.
5. Valuev D. V. Out-of-furnace and ladle steel treatment processes in metallurgy. Tutorial. 2 correct. edition / D.V. Valuev; Yurga Institute of technology, TPU affiliate: Publisher of Tomsk polytechnic university, 2010. — 202с.
6. Yamanaka R., Ogawa K. and others. Denitrogenization mechanism from molten steel by flux treatment. ISIJ International, Vol. 32 (1992), No. 1, pp. 136-141.
7. Shirabe K., Szekely J. A mathematical model of fluid flow and inclusion coalescence in the R-H vacuum degassing system. Transactions ISIJ, Vol. 23, 1983. pp. 465 — 474.
8. Shan Yu. Numerical modeling of dehydrogenation and denitrogenation in industrial vacuum tank degassers. A doctoral dissertation for the degree of Doctor of Science (Technology), Aalto University School of Chemical Technology, Espoo, Finland, 3 October, — 2014. 50 pp.
9. Zulhan Z., Schrade C. Vacuum Treatment of Molten Steel: RH (Ruhstahl Heraeus) versus VTD (Vacuum Tank Degasser) // SEAISI Conference and Exhibition, Kuala Lumpur. — 2014. p. 7.
10. Ogurtsov A.P., Samokhvalov S.E. Mathematical modeling thermophysical processes in multiphase mediums / Kyiv: Naukova dumka. — 2001. — 409 p.

Received 18.03.2020.
Accepted 27.03.2020.

**Математическое моделирование вакуумной дегазации стали
в ковше с аргонной продувкой**

В статье представлена математическая модель нестационарного процесса деазотации и дегидрогенизации расплава стали в вакууматоре камерного типа с аргонной продувкой. Дегазация стали при помощи вакуума — распространенная среди металлургических предприятий технология, которая дает возможность достигать необычно низкие концентрации водорода и азота в металлическом расплаве, что необходимо для повышения качества стальных изделий. Проведение вычислительных опытов на предложенной математической модели уменьшает затраты временных и финансовых ресурсов, поэтому построение модели является актуальной задачей. Программное приложение позволит оценить влияние интенсивности аргонной продувки, а также глубины расплава, на степень его дегазации, что может быть использовано при внедрении технологических рекомендаций в производство стали.

Mathematical modelling vacuum degassing of steel in argon-stirred ladle

The article presents a mathematical model of a non-stationary process of denitrogenation and dehydrogenation of steel melt in vacuum chamber with argon stirring. Vacuum degassing is a technology that is widely used in metallurgical plants to achieve extremely low concentrations of hydrogen and nitrogen in the metal melt, which is needed to improve the quality of steel products. According to the well-known hypothesis, initially the gas in the melt is in the dissolved state. Hydrogen and nitrogen bubbles are formed from a solution on the surface of the ladle lining provided that the pressure of metal melt is sufficiently low. The pressure required for the bubble to appear is determined in accordance with Sieverts' law. To a large extent, the degassing is also affected by the argon stirring, when bubbles collect hydrogen and nitrogen in their paths, floating through the melt and flying off the free surface. It is also important to reduce the duration of degassing to keep the melt temperature at a sufficiently high level, as well as to speed up overall process. Conducting numerical studies of the above process on a mathematical model reduces the cost of time and financial resources, so building a model is an actual task. The description of the melt flow and gases in the ladle is based on the mass and impulse conservation laws for a continuous medium, which is justified by the small size of the bubbles and their large number. Given the complexity of finding the analytic solution of nonlinear differential equations in partial derivatives in three-dimensional formulation, it is proposed to use the central difference method, which is sufficiently accurate and widely used for similar problems. It is proposed to implement the mathematical model in a C# computer program, because that language has sufficient programming capabilities, including parallelization of computation. The software application will allow evaluating the influence of the intensity of argon stirring, as well as the depth of the melt, on the degree of degassing, which can be used in the implementation of technological recommendations in the production of steel.

Красников Кирилл Сергеевич – к.т.н., ст. преподаватель кафедры программного обеспечения Днепропетровского государственного технического университета.

Красніков Кирило Сергійович – к.т.н., ст. викладач кафедри програмного забезпечення Дніпровського державного технічного університету.

Krasnikov Kyrylo Serhiiovych – PhD, senior lecturer at systems software department of Dniprovskiy state technical university.

Я.С. Жихарева, В.М. Сидак, Т.А. Киселева, А.Г. Дубинский

ВЫБОР ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ПРАКТИКУМА ПО СОСТАВЛЕНИЮ АЛГОРИТМОВ

Аннотация. Студенты-медики должны понимать концепцию алгоритмов. Нам необходимо программное обеспечение для визуального представления медицинских алгоритмов диагностики и лечения. Мы используем упрощенную версию старого стандарта ISO 5807: 1985. По заданным требованиям мы выбрали программу «yEd Graph Editor», по таким причинам: простота в освоении и использовании, есть все блоки диаграмм, можно сохранять и экспортировать результаты, распространяется как freeware. Мы применяли это программное обеспечение два прошлых учебных года, и можем рекомендовать использовать его, когда время для практических занятий ограничено.

Ключевые слова: алгоритм, информатика, блок-схемы, ПО.

Постановка задачи. В перечень компетенций специалистов, получающих высшее образование, независимо от отрасли знаний, наименования специальности и уровня образования, безусловно входит целый ряд алгоритмических навыков. Знакомство с понятием “алгоритм” происходит еще во время обучения в средней школе, но, к сожалению, многие студенты, не осознавая фундаментальный характер информатики, ошибочно относят этот раздел знаний к непрофильным и полагают, что понимание алгоритмов необходимо только будущим программистам. Далеко не каждый студент своевременно испытывает озарение от осознания того факта, что разнообразные практические навыки, изучаемые на старших курсах, по сути своей являются именно алгоритмами решения конкретных прикладных задач.

Современный специалист должен уметь структурировать элементы своей деятельности, уметь распознавать повторяющиеся последовательности действий, находить единый общий метод выполнения серий однородных задач, понимать описания этих действий как алгоритмов –

© Жихарева Я.С., Сидак В.М., Киселева Т.А., Дубинский А.Г., 2020

все это входит в понятие «алгоритмическая грамотность» [1]. Алгоритмы могут быть записаны разными способами. Наиболее часто используются следующие три способа:

1. Текстовый или словесно-формульный;
2. Графический – с помощью блок-схем или диаграмм;
3. Программный – с помощью языка программирования или псевдокода.

Словесно-формульный способ слишком многословен и часто допускает неоднозначное толкование. Псевдокод или программный код используется обычно при обучении специальностям, непосредственно связанным с информационными технологиями, в т.ч. программной инженерией. Иные способы записи алгоритмов, например, структурные диаграммы (диаграммы Насси—Шнейдермана) используются значительно реже. Таким образом лучшим выбором является графический способ записи алгоритмов.

В программе курса медицинской информатики, который изучают студенты всех специальностей медицинской академии, для освоения темы “Формализация и алгоритмизация медицинских задач” выделено два практических занятия (четыре академических часа). Результатом практической работы студентов, которая оценивается преподавателем, является графическая запись нескольких медицинских алгоритмов. Для организации практических занятий необходимо определиться с выбором стандарта (формата) графической записи, подобрать подходящее программное обеспечение, убедиться в возможности его практического использования в учебном процессе.

Анализ исследований и публикаций. В методических разработках для старшеклассников, которые изучают информатику на школьных занятиях, в методических материалах часто вообще не упоминается про использование каких-либо компьютерных программ для построения графической записи алгоритмов. Видимо, предполагается, что учитель зарисовывает алгоритм мелом на доске, а ученики используют лишь бумагу и ручку. Некоторые студенты сообщают, что на школьных уроках информатики они создавали блок-схемы алгоритмов с помощью растро-

вых графических программ, в частности в Paint – стандартном приложении Microsoft Windows.

Составленные студентами схемы алгоритмов обычно содержат ошибки и нуждаются в исправлениях. Поэтому полагаем, что использование растровых графических редакторов неприемлемо.

В высшей школе ситуация несколько лучше. Информационные технологии и информатика в той или иной форме входит в программу обучения практически для всех специальностей в системе высшего образования. Соответственно практические задания по составлению алгоритмов можно найти в методических указаниях к лабораторным работам для студентов различных специальностей. В методических разработках для освоения текстового редактора Microsoft Word многие авторы либо явно указывают на возможность составления блок-схем через меню Вставка-Фигуры-Блок-схемы [2,3], либо прямо предписывают составлять диаграммы именно так [4].

Инструмент “фигуры” в Microsoft Office позволяет составлять схемы из векторных примитивов на листе Microsoft Word или на слайде Microsoft PowerPoint. Студенты уже владеют этими инструментами, но сталкиваются с рядом сложностей и недопустимо долгое время занимает размещение блоков на поверхности листа, их форматирование, добавление текстов, совместное перемещение блоков и линий и пр.

Более совершенным программным средством для построения схем алгоритмов является программа Visio, которая входит в профессиональную редакцию пакета Microsoft Office. Описанию возможностей использования этой программы посвящено достаточно много методических публикаций, см. [5-8].

В ряде обзорных работ указывается возможность использования и множества других программ, таких как ConceptDraw, Dia, Flow Breeze, Edraw Max [9], EdgeDiagrammer, DiagramStudio, Diagram Designer, CADE, UMLet, StarUML [10], упоминаются Kivio, веб-сервисы Creately.com, LucidChart [11]. Также см. сравнение утилит для диаграмм UML в [12].

Цель исследования – определить подходящий стандарт графической записи простых алгоритмов, выбрать простое и понятное про-

граммное обеспечение, которое позволит студентам быстро приступить к созданию схем алгоритмов без необходимости выделять дополнительное время на освоение интерфейса.

Основной материал исследования. Прежде всего необходимо определить, какому из существующих стандартов записи алгоритмов будем следовать. Традиционно для графического представления алгоритмов используют международный стандарт ISO 5807:1985 (он же ГОСТ СССР 19.701-90), также известный под неформальным названием “блок-схемы”. Утвержденный около 35 лет назад он считается морально устаревшим. Одна из попыток эволюционной модернизации этого стандарта известна как язык «ДРАКОН» [13].

В разработке информационных систем, в программной инженерии последние 20 лет используется унифицированный язык моделирования (Unified Modeling Language, UML), который является стандартом как де-факто, так и де-юре. Стандартами утверждены две вариации языка UML: версия 1.4.2 – ISO/IEC 19501:2005 и версия 2.4.1 – ISO/IEC 19505-1:2012.

Опыт проведения практических занятий по медицинской информатике показал нам, что для достаточного полного освоения темы нужно упрощать задачу студента, возможно в ущерб строгости записи результата. Поскольку исполнителем разбираемых нами медицинских алгоритмов является человек (обычно врач или медицинская сестра) нецелесообразно выделять отдельным типом блоков операции ввода-вывода информации. Богатство набора примитивов, утвержденных в старом стандарте излишне велико. Практически все простые медицинские алгоритмы могут быть изображены с использованием лишь трех типов блоков: действие, условие, ограничитель. Обычно в наших алгоритмах есть несколько ветвлений и один-два цикла [14].

Язык UML описывает большой набор типов диаграмм. Из них лишь одна – диаграмма деятельности (activity diagram) – является наследником традиционных блок-схем. Другие типы диаграмм нужны в основном при разработке в парадигме объектной ориентации или на других этапах жизненного цикла создания информационных систем. Та-

ким образом, говоря про UML как альтернативу, речь идет про использование лишь одного типа диаграмм.

К достоинствам схем на языке ДРАКОН относят простоту, безошибочность, соответствие правилам эргономических алгоритмов и др. [15]. Однако эти достоинства проявляются главным образом при работе с большими и сложными алгоритмами, которые не рассматриваем в рамках нашего практикума. Также это оборачивается необходимостью больших затрат времени на освоение языка.

Возвращаясь к лимитам времени, которое выделено на освоение этой темы в рабочей программе дисциплины, мы приходим к выводу, что следует продолжать использовать стандарт ISO 5807:1985 с упрощенным набором используемых блоков.

Второй ключевой вопрос – выбор программного обеспечения. Рассмотрим основные требования.

1. Размещение на локальном компьютере, работающем под управлением операционных систем семейства Microsoft Windows. Доступ к сети интернет из компьютерных классов не всегда возможен на высокой скорости. В случае перезагрузки сети, время ожидания отклика интернет-сервиса оказывается слишком велико для комфортной работы. Следовательно, программа должна выполняться на локальном компьютере. В компьютерных классах установлены разные версии операционной системы – Windows 7 или 10, есть и классы с тонкими клиентами, где пользователь работает в режиме терминала на Windows Server 2003 или 2016.

2. Лицензионная чистота, возможность бесплатной установки нужного количества экземпляров. Нужна программа, доступная бесплатно как freeware, или образовательное учреждение должно приобрести нужное количество лицензий для всех используемых в обучении компьютеров.

3. Регулярные обновления, выход новых версий. Если программа была написана 10 и более лет назад и с тех пор не обновляется, велика вероятность что перестанет работать после обновления компьютерного

парка или версии операционной системы. Мы уже не раз сталкивались с такой ситуацией в прошлом.

4. Функциональность и удобство использования, возможность быстрого освоения, для чего необходим «Интуитивно-понятный интерфейс». Когда действия по созданию диаграммы просты и студент усваивает как делать эти операции уже после первой демонстрации, а также легко вспоминает эти действия через неделю, на следующем занятии.

Первое требование заставляет отказаться от всех сетевых сервисов. Опыт прошлых лет преподавания показывает, что на протяжении семестра иногда возникают ситуации с падением скорости доступа к сетевым ресурсам, поэтому мы предпочитаем пользоваться локальными решениями. Также мы не рассматриваем программы, предназначенные для запуска под управлением других операционных систем.

Второе требование не позволило нам использовать Microsoft Visio. К сожалению, в стандартный набор Microsoft Office входит только Microsoft Visio Viewer. Любое freeware также выигрывает за счет возможность установить его на личные компьютеры студентов.

Третье требование заставило исключить из рассмотрения несколько неплохих программ с интерфейсом на русском языке, которые были созданы достаточно давно, но не нашли широкого распространения и не обновляются в последнее время.

Поиск подходящего векторного редактора привел нас к выбору yEd Graph Editor [16]. Это редактор диаграмм, который доступен как freeware. Набор графических примитивов на вкладке flowchart содержит все необходимые блоки. Соединение блоков стрелкой возможно двумя щелчками мыши. Текст внутрь блока или к соединяющей блоки стрелке добавляется через редактирование свойства по короткой клавише F2. Результат работы можно сохранить или экспортировать. Студенты осваивают основные действия в этом редакторе за несколько минут и на занятии остается достаточно времени, чтобы составить схему сложного алгоритма и внести в нее исправления по замечаниям преподавателя.

Выводы. При изучении темы, связанной с созданием алгоритмов, студентами, для которых информационные технологии не являются ос-

новой специальностью, в условиях дефицита выделенного времени можно ограничиться использованием устаревшего стандарта ISO 5807:1985. Для построения графических схем алгоритмов мы рекомендуем бесплатное программное обеспечение yEd Graph Editor, которое соответствует всем заявленным требованиям. Позитивный опыт использования этой программы на практических занятиях по медицинской информатике в 2018/2019 и 2019/2020 учебных годах подтверждает правильность сделанного выбора.

ЛІТЕРАТУРА / ЛИТЕРАТУРА

1. Сорока О.Г. Формирование элементов логической и алгоритмической грамотности у младших школьников [Текст] : дис. ... канд. пед. наук / О.Г. Сорока. М., 2006. 224 с
2. Луцко НЯ, Кавальчук ОН, Алейникова ОИ. Информатика. Электронный технический документ в ТП WORD. Учебно-методическое пособие Электронный учебный материал Минск 2016 - 65 с.
3. Методические указания к самостоятельной работе студентов для подготовки к тестированию, лабораторным работам и экзамену «Вычислительная техника и программирование» /Составители: И.Т. Карпалюк, А.А. Мирошниченко - Харьков: ХНАГХ, 2008.- 112 с.
4. Практические работы в текстовом редакторе Word: Методические указания к лабораторным и практическим занятиям / сост.: Т. Н. Маценко – Ульяновск: УлГТУ, 2004. – 32 с.
5. Microsoft Office Visio. Говорова С.В. Инженерная и компьютерная графика: Учебное пособие (лабораторный практикум). - Ставрополь: СКФУ, 2016. - 77 с.
6. Мегель ЮЄ, Данілко ІВ, Коваленко СМ, Чалий ІВ. Використання при підготовці майбутніх менеджерів програмного продукту Microsoft® Visio. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2014(149):39-46.
7. Столер ВА. Опыт использования прикладных программ и мультимедийных технологий в курсе инженерной и компьютерной графики. // Инновационные технологии в инженерной графике: проблемы и перспективы: сборник трудов Междунар. научно-практ. конференции 2017 Apr (Vol. 21, pp. 215-219).

8. Сидоренко ВМ, Сидоренко ВН. Інженерна та комп'ютерна графіка: Навч. посіб. — К.: КНЕУ, 2007. — 336 с
9. Якимов И.М., Абзалова Л.Р., Кирпичников А.П., Мокшин В.В. Краткий обзор графических редакторов структурных моделей сложных систем // Вестник Казанского технологического университета. 2014. №17.
10. Кудринская ОВ. Современное программное обеспечение создания информационной графики. //Теория и практика современных гуманитарных и естественных наук - сб. научных статей ежегодной межрегиональной научно-практической конференции. Камчатский гос. ун-т им. Витуса Беринга 2016 (pp. 167-176).
11. Кузьмин Д.Н., Бортновский С.В., Космынина И.Н. Применение технологии динамического компьютерного тестирования в управлении качеством обучения учащихся программированию // Проблемы современного образования. 2019. №3.
12. Thong WJ, Aamedeen MA. A survey of UML tools. Proceedings of the International Conference on Data Engineering 2015 (DaEng-2015) 2019 (pp. 61-70). Springer, Singapore
13. Паронджанов В. Д. Почему врачи убивают и калечат пациентов, или зачем врачу блок-схемы алгоритмов? Иллюстрированные алгоритмы диагностики и лечения – перспективный путь развития медицины. Клиническое мышление высокой точности и безопасность пациентов. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 340 с.
14. Дубинский А.Г., Хорольский О.А. Графическая визуализация медицинских алгоритмов диагностики и лечения //Системний аналіз та інформаційні технології: матеріали 15-ї Міжнародної науково-технічної конференції SAIT 2013, Київ, мая 2013 р.
15. Монастырская ВС, Фролов ВВ. Визуальный язык дракон и его применение. Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2016;2(12).
16. yEd Graph Editor. <http://www.yworks.com/yed>

REFERENCES

1. Soroka O.G. Formation of the elements of logical and algorithmic literacy in primary school students. Ph.D. thesis /M., 2006. 224 p. <http://elib.bspu.by/handle/doc/12871>
2. Lutsko N., Kavalčuk O, Aliejnukova O. Computer science. Electronic technical document in WORD. Minsk 2016 <https://rep.bntu.by/handle/data/26459>

3. Guidelines for independent work of students to prepare for testing, laboratory work and the exam "Computer Engineering and Programming" / I.T. Karpaliuk, A.A. Miroshnichenko - Kharkov: NUUE, 2008.- 112 p.
4. Practical work in a text editor Word: Methodological instructions for laboratory and practical classes / T.N. Matsenko - Ulyanovsk: UlSTU, 2004. - 32 p.
5. Govorova S.V Microsoft Office Visio. Engineering and computer graphics: Textbook (laboratory workshop). - Stavropol: NCFU, 2016 .-- 77 p.
6. Megel Y, Danilko I, Kovalenko S, Chaly I. Use Microsoft Visio software when preparing future managers. Bulletin of the Kharkiv National Technical University of Agriculture named after Peter Vasylenko. 2014 (149): 39–46.
7. Stoler V.A. Experience in using applications and multimedia technologies in the course of engineering and computer graphics. // Innovative technologies in engineering graphics: problems and prospects: conf. proceedings 2017 Apr (Vol. 21, pp. 215-219).
8. Sydorenko V. Engineering & Computer Graphics: Educ. manual - K .: KNEU, 2007. - 336 p
9. Yakimov M., Abzalova L., Kirpichnikov A., Mokshin V. Short review of graphics editors of structural models of complex systems // Herald of Kazan Technological University. 2014. №17.
10. Kudrinskaya O.V Modern software for creating information graphics. // Theory and practice of modern humanities and sciences. conf. proc. 2016 Kamchatka State University named after Vitus Bering (pp. 167-176).
11. Kuzmin D., Bortnovsky S., Kosmynina I. Using the technology of dynamic computer testing in managing the quality of students' programming training // Problems of modern education № 3-2019
12. Thong WJ, Aamedeen MA. A survey of UML tools. Proceedings of the International Conference on Data Engineering 2015 (DaEng-2015) 2019 (pp. 61-70). Springer, Singapore
13. Parondzhanov V.D. Why do doctors kill and cripple patients, or why does the doctor need flowcharts? Illustrated diagnostic and treatment algorithms are a promising way for the development of medicine. High precision clinical thinking and patient safety. - M.: DMK Press, 2017. https://drakon.su/_media/biblioteka/2_udobnyj_jazyk_dlja_vrachej.pdf
14. Dubinsky A., Khorolsky O. (2013). Graphic visualization of medical diagnostic and treatment algorithms // System analysis and information technology: proc. of the 15th conf. SAIT 2013, Kyiv, May 2013 p.

15. Monastyrnaya V., Frolov V., Visual language dragon and its application //Actual problems of aviation and astronautics. 2016;2(12).
16. yEd Graph Editor. <http://www.yworks.com/yed>

Received 24.03.2020.

Accepted 01.04.2020.

Вибір програмного забезпечення для практикуму зі складання алгоритмів

Студенти-медики мають розуміти концепцію алгоритмів. Нам потрібне програмне забезпечення для візуального відображення медичних алгоритмів діагностики та лікування. Ми використовуємо спрощену версію старого стандарту ISO 5807: 1985. За заданими вимогами ми вибрали програму «yEd Graph Editor», з таких причин: простота в освоєнні та використанні, є всі блоки діаграм, можна зберігати і експортувати результати, поширюється як freeware. Ми використовуємо це програмне забезпечення два минулих навчальних років, і можемо рекомендувати використовувати його, коли час для практичних занять обмежений.

The software choice for a practice about algorithms flowcharts making

Medical students must understand the concept of algorithm. There are three main ways for algorithm writing and representation. The main and most convenient is the well-known flowcharts. Therefore, we need special software for creating flowcharts of medical algorithms of diagnosis and treatments.

The most common recommendations are about using Microsoft solutions: "insert figures" button/command in Microsoft Word, or Microsoft Visio for professional cases. Also there are large number software utilities for building UML diagrams.

Our goal is selecting the standard for flowcharts and finding good software. There are 4 alternative flowchart rules: standard ISO 5807:1985, Dragon-schemas, and two versions of Unified Modeling Language (ISO/IEC standards). The merits of the new solutions are actual only for large and complex algorithms and it takes more time for learn and use. Unfortunately, we have only two practical classes by course syllabus. So we select simplified version of old standard ISO 5807: 1985.

The requirements must be defined before making choice about software. There are several basic requirements. Application launch on the workstations instead of server or cloud. By this way we will not dependent of quality of internet or LAN services. Compatibility with most popular versions of Windows. Availability as freeware and we need rights for installing multiple copies. Regular updating software versions. Functionality and usability, the "intuitive interface."

By this set of requirements, we select "yEd Graph Editor" software, because it is easy to learn and use, have all of diagram shapes, can save and export results, and it is freeware.

Students understand how to make the base actions in this environment in a few minutes - after the first demonstration. Now there is enough time for drawing a complex algorithm flowchart during the lesson. And student have time for making corrections and update flowchart after teacher checking.

We used this software over the last two years and we can recommend to use "yEd Graph Editor" in the case of limited time for practical classes. Key words: algorithm, computer science, flowcharts, software.

Жихарева Яна Сергеевна - преподаватель кафедры медико-биологической физики и информатики ГУ "Днепропетровская медицинская академия МЗ Украины".

Сидак Василий Михайлович - преподаватель кафедры медико-биологической физики и информатики ГУ "Днепропетровская медицинская академия МЗ Украины".

Киселева Татьяна Алексеевна - к.ист.н., преподаватель кафедры медико-биологической физики и информатики ГУ "Днепропетровская медицинская академия МЗ Украины".

Дубинский Алексей Георгиевич - к.т.н., доцент, доцент кафедры медико-биологической физики и информатики ГУ "Днепропетровская медицинская академия МЗ Украины".

Жихарева Яна Сергіївна - викладач кафедри медико-біологічної фізики і інформатики ДЗ "Дніпропетровська медична академія МОЗ України".

Сідак Василь Михайлович - викладач кафедри медико-біологічної фізики і інформатики ДЗ "Дніпропетровська медична академія МОЗ України".

Кисільова Тетяна Олексіївна – к.іст.н., викладач кафедри медико-біологічної фізики і інформатики ДЗ "Дніпропетровська медична академія МОЗ України".

Дубінський Олексій Георгійович – к.т.н., доцент, доцент кафедри медико-біологічної фізики і інформатики ДЗ "Дніпропетровська медична академія МОЗ України".

Zhykharieva Yana - teacher of the Department of Biomedical Physics and Informatics, State Institution "Dnepropetrovsk Medical Academy of the Ministry of Health of Ukraine".

Sidak Vasyly - lecturer, Department of Biomedical Physics and Informatics, State Institution "Dnepropetrovsk Medical Academy of the Ministry of Health of Ukraine".

Kysilova Tetiana – Ph.D., lecturer, Department of Medico-Biological Physics and Computer Science, State Institution "Dnepropetrovsk Medical Academy of the Ministry of Health of Ukraine".

Dubinskyi Oleksii – Ph.D., associate professor, associate professor of the Department of Medico-Biological Physics and Informatics, State Institution "Dnepropetrovsk Medical Academy of the Ministry of Health of Ukraine".

В.Ю. Селівьорстов, Т.В. Селівьорстова

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ КОМПЛЕКСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ГАЗОДИНАМІЧНОГО ВПЛИВУ НА РОЗПЛАВ В ЛИВАРНІЙ ФОРМІ

Анотація. Представлений аналіз науково-технічної інформації щодо використання процесів позапічної обробки для підвищення якості литого металу. Показана перспективність застосування вказаних впливів для обробки розплаву безпосередньо в ливарній формі (виливної). Визначена можливість реалізації процесу комплексного внутрішньоформенного газодинамічного впливу на розплав крупних виливків та злитків, який складається з послідовних операцій продувки інертними газами через сифонну ливникову систему, вакуумування та наступного газодинамічного тиску в процесі затвердіння за допомогою відповідних пристроїв. Визначені конкретні варіанти їх конструкції та технологічні особливості роботи. Показано, що відмінною рисою технології є те, що протягом усього процесу від початку твердіння на рідкий метал здійснюється вплив за рахунок створення регульованого газового тиску в герметизованій системі виливок-пристрої для введення газу. Запропоновані пристрої, що є конструктивно простими та можуть бути з легкістю вбудованими у вже діючий технологічний процес без необхідності значних капітальних витрат. Зазначена необхідність подальших досліджень для розробки загальної методики визначення режимів тривалості продувки та раціональних режимів внутрішньоформенного вакуумування розплаву.

Ключові слова: комплексна технологія, форма, виливниця, розплав, вплив, виливок, злиток, інертний газ, продувка, вакуумування, газодинамічний тиск, герметизація, пристрій, розрахунок.

Вступ. Відомо, що машинобудування незмінно займає одне з провідних місць в структурі товарного виробництва усіх промислово розвинутих країн світу. Зокрема, у 2017 році в Україні частка реалізованої продукції машинобудування в загальному промисловому обсязі складала 10,9 % [1]. При цьому важливість ролі металургійного та ливарного виробництв, як основних заготівельних баз для машинобудування, зберігається на високому рівні та, разом з цим, підвищуються вимоги до якості злитків та виливків. Неоднорідність розмірів, форми

та розподілу кристалів в об'ємі литої заготовки, шпаристість, хімічна неоднорідність є основними проблемами при отриманні якісного виливка або злитка, і повною мірою це стосується крупних литих заготовок, зважаючи на комплекс специфічних теплофізичних умов формування структури та геометричних характеристик, що зумовлені, в свою чергу, технологічними особливостями виробництва [2]. Зокрема, економічний аналіз виробництва сталевих злитків показує, що частка злитків масою більше 10-15 т складає приблизно 7-10% загальної кількості, однак витрати на їхнє виробництво, в свою чергу, складають біля третини усіх виробничих витрат внаслідок високої трудомісткості та унікальності оснащення [2]. Особливістю таких технологічних схем є, насамперед, обов'язкова наявність додаткового досить складного обладнання, що тягне за собою необхідність реалізації раціональної об'ємно – планувальної схеми побудови усіх технологічних агрегатів. При цьому, тенденції до розширення номенклатури, нестабільність та дроблення заказів на вже діючих ливарних виробництвах, що не мають додаткового спеціалізованого обладнання, великі капітальні витрати на глобальне технічне переозброєння, зумовлюють необхідність пошуку нових технологічних шляхів отримання якісної продукції. Тому все більшу увагу науковців та професіоналів-практиків привертають питання, що пов'язані з удосконаленням існуючих та розробкою нових процесів, які забезпечують підвищення якості литого металу, зниження собівартості отримання виробів, підвищення ступеню екологічності виробництва в цілому. Одним із таких визнаних шляхів підвищення якості литих заготовок є використання зовнішніх фізичних впливів на рідкий метал, та метал, що кристалізується безпосередньо в ливарній формі [2, 3].

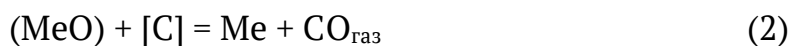
Аналіз стану питання. Усталена практика виробництва якісних злитків передбачає використання одного або одночасно декількох технологічних прийомів: обробки розплаву вакуумом, продувку інертним газом, введення порошкоподібних матеріалів або дроту, перемішування розплаву зі спеціально приготовленим шлаком або лігатурою. Всі ці операції здійснюються в ковші після завершення процесу плавки за допомогою відповідного обладнання, до якого відносяться установки ківш-піч

та вакууматори різних конструкцій [2 - 6]. Біля 60 % всієї сталі за даними [2] піддається вакуумуванню для зниження вмісту водню менше 1,5-2ppm і 30 % - для підвищення ступеню чистоти за неметалевими включеннями.

Технологія вакуумної обробки заснована на термодинамічній можливості зміщення рівноваги хімічних реакцій в бік виділення газоподібних продуктів в результаті зниження атмосферного тиску і, насамперед, це відноситься до розчинених в розплаві сталі водню, азоту та кисню [2, 6]. В результаті хімічної реакції (1) кисень виділяється із розплаву у вигляді оксидів вуглецю, чим забезпечує разом з розкисленням також і зниження вмісту вуглецю.



В тих випадках, коли кисень в металі знаходиться в складі оксидних неметалевих включень, зниження тиску над розплавом призводить до часткового або повного руйнування деяких сполук в результаті взаємодії з вуглецем (2). Наприклад, MnO та Cr_2O_3 відновлюються майже повністю, а для навіть часткового відновлення Al_2O_3 або TiO_2 необхідний дуже глибокий вакуум [7].



При зниженні тиску над розплавом рівновага реакції $2[H] \leftrightarrow H_{2\text{газ}}$ зміщується вправо. Водень в рідкій сталі має велику рухомість, коефіцієнт його дифузії достатньо великий ($D_H = 1,2 - 1,5 \cdot 10^{-3}$ см/с) і в результаті вакуумування він виводиться з розплаву значною мірою на відміну від азоту, в якого відповідний коефіцієнт є на порядок меншим ($D_N = 1 - 4 \cdot 10^{-4}$ см/с). Тому для видалення азоту необхідний більш глибокий вакуум та збільшення часу витримки [2, 7].

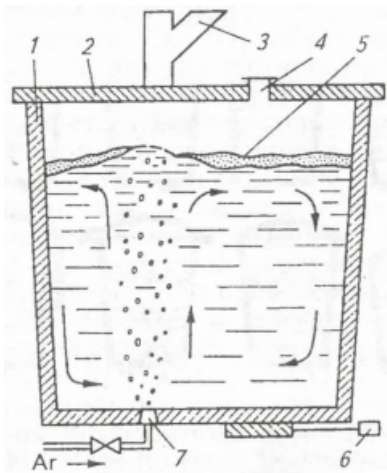
Процес очищення металу від водню та азоту під вакуумом прискорюється процесом виділення пухирців оксиду вуглецю (CO), що протікає одночасно. Ці пухирці перемішують метал та є маленькими «вакуумними камерами», тому що всередині них парціальний тиск водню та азоту дорівнює нулю [7]. При обробці сталі під низьким вакуумом (1мбар) вміст водню знижується з 6,0 – 8,0 до 1,5 – 2, 0 ppm, азоту з 80 – 100

до 70, а при тривалому вакуумуванні до 40 ppm. Вміст кисню після вакуумної обробки знижується до рівня 25 -30 ppm і менше [2, 6].

Таким чином, при обробці металу вакуумом зменшується кількість розчиненого кисню, водню, азоту і вміст оксидних неметалевих включень, а виділення великої кількості газових пухирців сприяє перемішуванню та певній гомогенізації розплаву, проте ефективна глибина такої обробки в разі відсутності інтенсивного примусового перемішування розплаву по висоті литої заготовки (злитка) відносно невелика (до 0,5 – 0,7 м). Тому для забезпечення достатньої площі поверхні розділу фаз, що взаємодіють, вакуумну обробку розкисленої сталі поєднують з продувкою розплаву інертним газом. Таке поєднання дозволяє досягнути збільшення потужності перемішування у 4 -5 разів [2, 5, 6]. Операція продувки великих мас металу інертними газами в ковші більш проста та дешевша, ніж обробка вакуумом, тому в багатьох випадках вона може замінювати вакуумування [8].

Особливостями процесу продувки з точки зору впливу на певні характеристики стану та процеси у розплаві є: зменшення вмісту газів в металі, інтенсивне перемішування розплаву, поліпшення умов протікання реакцій окислення вуглецю, зниження температури металу. Витрати інертного газу (переважно аргону) складають, зазвичай, 0,1 – 3 м³/т сталі: продувка з витратою газу до 0,5 м³/т достатня для усереднення хімічного складу та температури металу, з інтенсивністю до 1 м³/т – впливає на видалення з металу неметалевих включень, а для ефективної дегазації необхідні витрати інертного газу на рівні 2 – 3 м³/т. В залежності від маси рідкої сталі в ковші, зниження температури розплаву при таких витратах аргону складає 2,5 – 4,5 °C/хв (без продувки розплав в ковші охолоджується зі швидкістю 0,5 – 1 °C/хв) [5, 6, 8]. Тепло при продувці додатково витрачається на нагрів інертного газу та випромінювання поверхнями металу і шлаку, що активно перемішуються, при цьому більша частина теплових втрат пов'язана зі збільшенням саме теплового випромінювання, тому використання кришки для ковша забезпечує зменшення втрат тепла та ступеня окиснення металу [5, 6, 8]. На цьому принципі, зокрема, базується технологія CAB – процесу (Capped – накривати, Argon – аргон,

Bubbling – продувка), що розроблена в Японії (рис. 1) [8]. Як видно з рисунку, технологією передбачена не тільки наявність синтетичного шлаку на поверхні металу, але й створення певної захисної атмосфери в закритому кришкою об'ємі ковша при здійсненні процесу продувки.



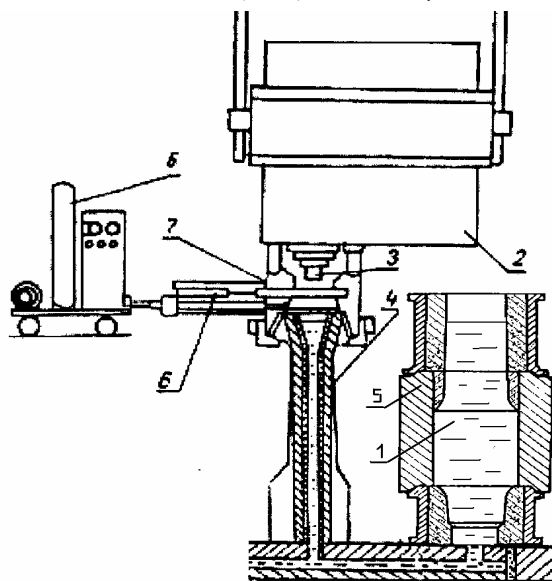
1 – ківш з металом, 2 – кришка ковша, 3 – пристрій для завантаження феросплавів, 4 – отвір для відбору проб, 5 – синтетичний шлак, 6 – шибєрний затвор, 7 – шпариста пробка для введення аргону

Рисунок 1 – Схема САВ –процесу [8]

На теперішній час у виробничій практиці знайшли своє застосування багато варіантів пристроїв та обладнання для здійснення технологічної операції продувки розплаву в ковші: крізь шибєрний затвор, газопроникливу вставку, крізь фурму, що занурюється у розплав та ін. Окрім того, вони використовуються при реалізації комбінованих технологій, наприклад, в установках ківш-піч та вакууматорах. Однак, значною вадю, що знижує кінцеву ефективність усіх ковшових процесів позапічної обробки, є об'єктивна технологічна необхідність подальшого переливання розплаву в ливарну форму (виливницю) або проміжний ківш, і чим більший об'єм металу треба розливати, тим більший цей негативний вплив. Наприклад, за даними [3] майже 70 % неметалевих включень, що виявляються в сталі, виникають внаслідок вторинного окислення металу в процесі його переливання із основного ковша в проміжний. Результати досліджень В.А. Єфімова показали, що ступінь поглинання кисню визначається турбулентністю струменю сталі, що заливається, та площею до-

тику її поверхні з навколишнім середовищем. Витікання струменів із основного ковша здійснюється під тиском стовпа металу 3 – 5 м при великих значеннях числа Рейнольдса. Бічна поверхня дотику струменю повітря за час розливки 300 тоннних ковшів складає 300 – 400м² [3]. Дослідження показали, що за час розливки сталі кількість кисню, поглиненого струменем, складає 0,5 – 2,3 кг/т сталі [3]. Основним засобом захисту струменю металу при переливі із основного ковша в проміжний є використання спеціальних вогнетривких труб та створення в них позитивного тиску аргону.

При розливанні злитків і крупних виливків проблема захисту струменя металу та застосування зовнішніх фізичних впливів на розплав, в тому числі в процесі затвердіння безпосередньо у формі, є не менш актуальною, тому у виробничій практиці з'являються відповідні технологічні процеси та обладнання. Одна з таких технологій розроблена в Японії [9]. На рисунку 2 представлена схема установки для розливки крупних виливків та злитків, що має ущільнювальний пристрій 7, що герметизує систему ківш – виливок та забезпечує в процесі заливки ливарної форми (виливної) та після її завершення можливість створення понадатмосферного тиску аргону. При цьому, після завершення заливки рідкий метал витісняється із стояка у виливок з можливістю здійснення в подальшому продувки аргонном вісьової зони виливка та вдування різних порошкоподібних реагентів. До недоліків даного способу можна віднести наявність легко уразливих системи з'єднання стояка і ковша та ущільнюючого пристрою за наявності бризок та охолодей металу під час заливки. Окрім того, конструкція установки достатньо складна та громіздка, відповідно, використання її у вже діючому технологічному процесі потребує значних капітальних витрат.



1-розплав; 2-стопорный ківш; 3-заливний стакан; 4-стояк;
5-ливарна форма; 6-гідравлічний привод; 7- ущільнювальний пристрій;
8-балон з газом

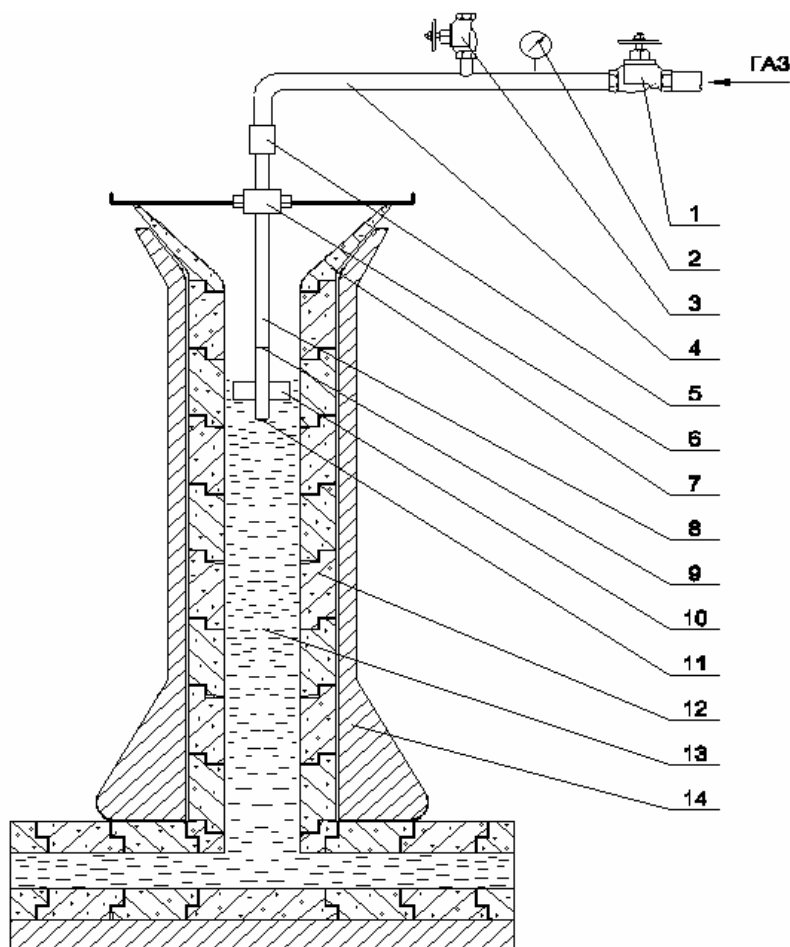
Рисунок 2 – Установка для розливки сталі

Наведені вище дані свідчать про актуальність питань, що пов'язані з розробкою ефективних методів використання продувки інертними газами та вакуумування для підвищення якості кінцевої литої заготовки, зокрема, нових комбінованих технологій, що поєднують ці впливи та реалізуються за допомогою відповідних технологій обробки розплаву безпосередньо в ливарній формі (виливниці). Зокрема, перспективним представляється використання для цього існуючих технологічних схем та пристроїв для газодинамічного впливу на розплав, що передбачають використання герметизації системи виливок (злиток) – пристрій для введення (відводу) газу за рахунок залитого в форму (виливницю) металу [10].

Метою роботи є обґрунтування технологічної можливості та розробка принципів схем здійснення комбінованих технологій, що включають процеси продувки інертними газами, вакуумування та наступний вплив газовим тиском на розплав в процесі затвердіння виливка в ливарній формі (виливниці).

Основний матеріал. На відміну від вищеописаної технології (див. рис. 2), спеціалістами кафедри ливарного виробництва НМетАУ запропоновані конструкції пристроїв, що вводяться безпосередньо в ливникову систему після завершення заливки та герметизують її від навколишнього середовища, після чого розплав витісняється із ливникової системи у виливок (злиток) під дією газового тиску [11, 12]. Наступним етапом може бути здійснення продувки вісьової зони залитого в форму виливка (злитка). Схема одного з варіантів конструкції такого пристрою представлена на рис. 3. Ефективність його роботи залежить від забезпечення герметичності системи стояк – пристрій для введення газу. При цьому проміжок часу від завершення заливки до початку подачі стисненого газу, включаючи процес герметизації, повинен бути меншим ніж час затвердіння металу у найбільш вузькому перетині ливникової системи, яким є перетин живильників. Для лиття злитків, зазвичай, використовують сифонний вогнетривкий припас з діаметром ≥ 50 мм в місці підводу металу від стояка до виливниці, діаметр стояка ≥ 100 мм. При цьому тривалість затвердіння живильника діаметром 50 мм складає більше 70 с в залежності від тривалості заливки, відповідно від маси розплаву, що проходить через ливникову систему (ЛС). Цього часу цілком вистачає для введення пристрою, його герметизації та початку подачі газу в ЛС. Наприклад, експериментальні дослідження технології витиснення розплаву із стояка діаметром 100 мм та висотою 2,7 м в злитки масою 7,2 т в умовах ККЦ ПАТ «Дніпровський металургійний завод» (завод ім. Г.І. Петровського) показали, що товщина затверділого шару металу на стінках вогнетривких проводок після витиснення розплаву з ЛС складала від 1,5 – 2,0 мм у верхній частині стояка до 3,5 – 5,0 мм в нижній його частині. Таким чином, використання пристрою дозволяє також зекономити на металі, що переходить в злиток із сифонної ЛС, маса якого з врахуванням товщини затверділого шару на стінках вогнетривких проводок для вищезазначеної ЛС становить біля 200 кг. В процесі продувки можливе введення в струмінь газу та, відповідно, у виливок (злиток) порошкоподібних реагентів (лігатур, розкислювачів, модифікаторів тощо). Треба відзначити, що даний пристрій конструктивно простий, а технологічний

процес його використання може бути легко вбудованим в діючий технологічний процес. Окрім того, пристрій може працювати навіть у разі потрапляння в стояк наприкінці заливки шлаку із ковша.



- 1 – вентиль подачі газу; 2 – манометр; 3 – випускний вентиль;
4 – основна частина; 5 – з'є муфта; 6 – опорна струбцина; 7 – заливальна
лійка; 8 – змінна частина; 9 – кільцева насічка; 10 – холодильник;
11 – торцова вставка-пробка; 12 – вогнетривка проводка;
13 – розплав; 14 – корпус центрової

Рисунок 3 – Пристрій з регульованою подачею газу

Комбінована технологія продувки, вакуумування та впливу газовим тиском на розплав в процесі затвердіння в ливарній формі заснована на тому, що протягом усього процесу від початку твердіння на рідкий метал здійснюється вплив за рахунок створення регульованого газового тиску в герметизованій системі виливок-пристрої для введення газу. Реалізовуваний процес передбачає як необхідну умову здійснення наяв-

130

ність на поверхні ЛС та робочої порожнини ливарної форми шару затверділого металу до моменту подачі газу в систему виливок-пристрої для подачі газу. Товщина цього шару, що збільшується в часі, повинна забезпечувати за своїми міцністними характеристиками герметичність системи виливок-пристрої для введення газу, що знаходиться під тиском, аж до повного затвердіння виливка. Загальна схема реалізації комбінованої технології представлена на рисунку 4.

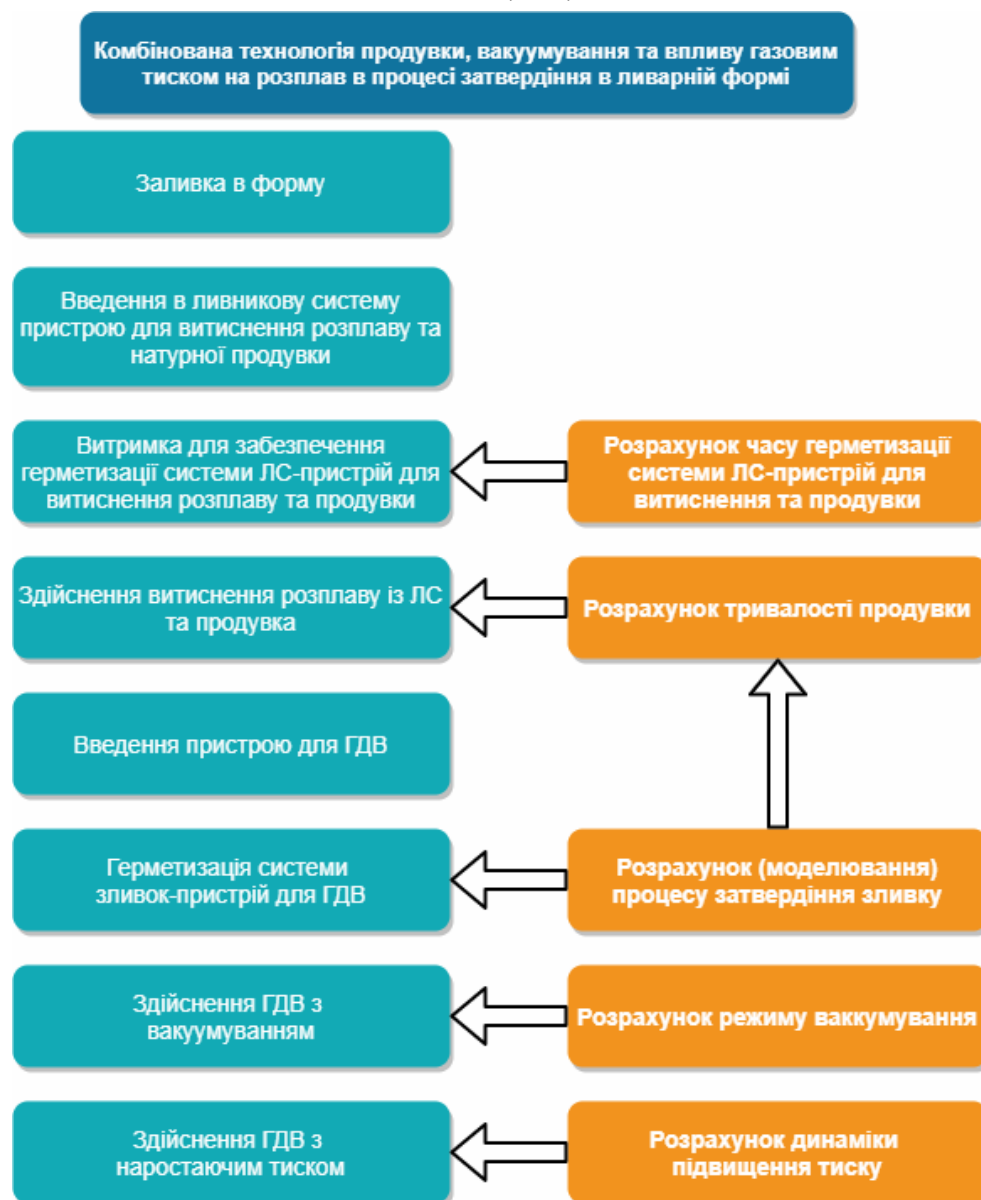


Рисунок 4 – Комбінована технологія продувки, вакуумування та впливу газовим тиском на розплав в процесі затвердіння в ливарній формі

Технологія може застосовуватися для злитків та виливків, що використовують для заливки сифонну ЛС, і включає дві основні складові.

Реалізація першої складової пропонованого загального технологічного процесу пов'язана з використанням сифонної ЛС для витиснення рідкого металу у виливок (злиток) після заливки розплаву в форму та наступної продувки інертним газом вісьової зони виливка за допомогою пристрою, що представлений на рис. 3. При цьому, інертний газ (зазвичай аргон), що необхідний для витиснення розплаву з ЛС та наступної продувки вісьової зони виливка (злитка) після герметизації системи за допомогою дискового сталевого холодильника 10, подається від зовнішнього джерела через пневмопровід 4 та змінний трубчастий елемент 8.

Після занурення пристрою в рідкий метал 13 вентиль 3, що пов'язує систему з атмосферою, залишається відкритим до тих пір, поки не здійсниться затвердіння розплаву в зазорі між холодильником 10 та внутрішньою поверхнею вогнетривкої проводки 12 стояку, що викликано необхідністю відводу із системи надлишків газу, що розширюється при нагріві та здатний порушити процес герметизації. Після завершення процесу герметизації вентиль 3 перекривають, після чого подається газ, що спочатку витісняє розплав з ЛС, а потім потрапляє у ливарну форму (виливницю).

Розрахункова тривалість продувки залежить від конкретних параметрів виливка та форми (температури, фізичних та теплофізичних властивостей сплаву, маси, геометричних особливостей та ін.). Дане питання є дуже важливим та потребує проведення подальших досліджень для розробки загальної методики визначення режимів реалізації цієї складової комплексної технології.

Реалізація другої складової процесу пов'язана з використанням технології газодинамічного впливу на розплав (ГДВ), що знаходиться в робочій порожнині ливарної форми (виливниці) за допомогою відповідних пристроїв різних конструкцій [13 - 16]. В цілому, ці пристрої представляють собою металеві холодильники корпусного типу, що забезпечують функції герметизації виливка (злитка) від навколишнього середовища та подачу стисненого газу від зовнішнього джерела або відвід газу

вакуумною системою. Один з варіантів конструкції такого пристрою для здійснення ГДВ (рис 5, а, б) складається з металевого корпусу 1, вставки з вогнетривкого матеріалу 2, що розташована в цьому корпусі, газопроводу, поєднаного з системою зовнішнього забезпечення газом високого тиску або вакуумною системою (на рисунку не показано). Металевий корпус обладнаний осьовим газопостачальним патрубком 3 з наскрізними отворами 4, що розташовані безпосередньо під внутрішньою поверхнею верхньої стінки металевого корпусу, а кінцівка та отвори газопостачального патрубку перекриті газопроникливою пробкою 5.

За одним з варіантів реалізації технологічного процесу після завершення продувки на поверхню рідкого металу в надливну частину ливарної форми (виливниці) крізь шар теплоізоляційної засипки опускають пристрій, при чому, бічна поверхня металевого корпусу, що опиняється зануреною у розплав, герметизує злиток або виливок (рис 5, в).

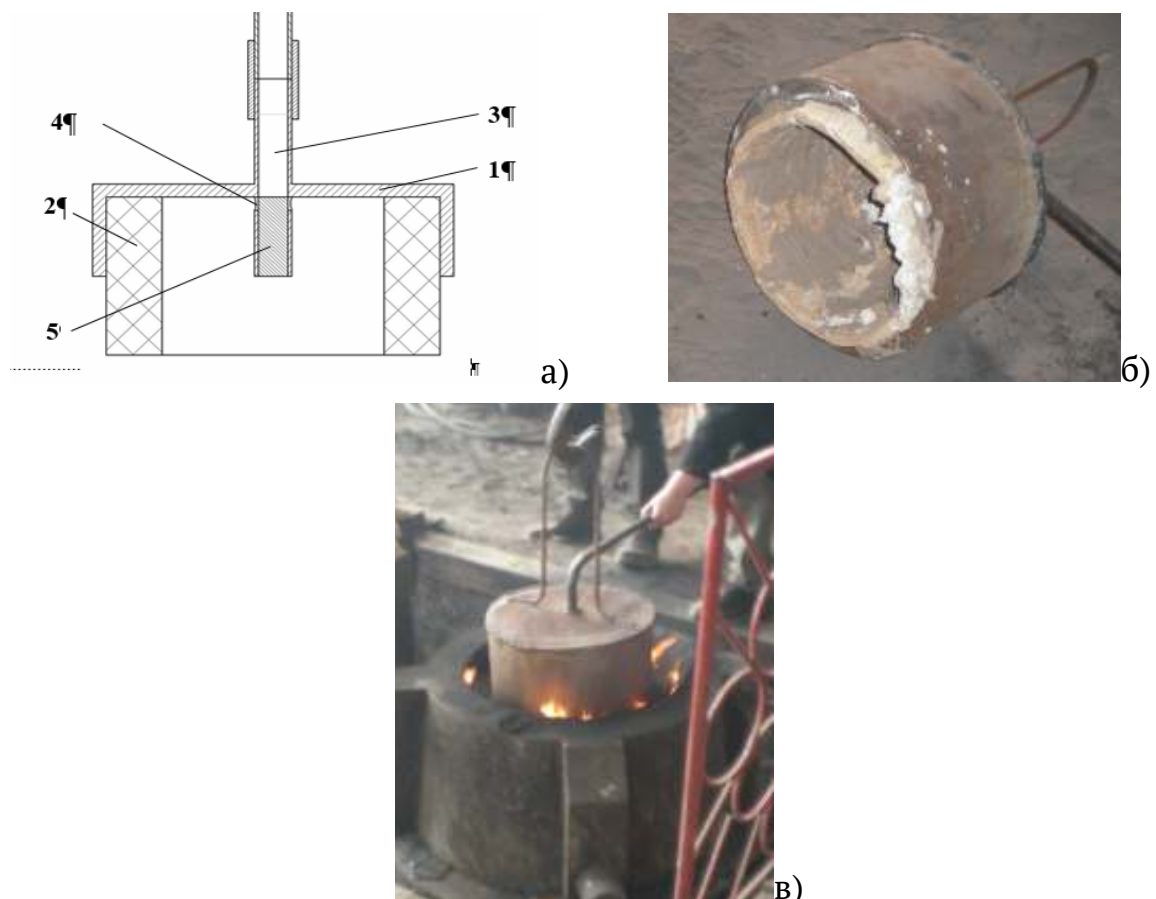


Рисунок 5 – Схема конструкції (а) та загальний вигляд (б) пристрою для реалізації ГДВ, а також фрагмент занурення його в надливну частину злитка (в)

Впродовж розрахункового часу процес герметизації системи виливок (злиток) – пристрій для ГДВ протікає при атмосферному тиску, що виключає можливість прориву газом шару металу між стінками корпусу та ливарної форми. Це дозволяє згодом здійснити процес ГДВ на рідкий метал та метал, що твердіє. Варіантами реалізації такого впливу можуть бути здійснені послідовно вакуумування та газодинамічний тиск, або щось одне, відповідно до конкретних завдань щодо якості литого металу та технологічних можливостей в умовах діючого виробництва.

Розрахунки технологічних режимів здійснення процесів вакуумування та газодинамічного тиску треба проводити в кожному випадку окремо, враховуючи всі необхідні параметри виробництва конкретного виливка або злитка. Треба відзначити, що питання, пов'язані з методологією визначення раціональних режимів внутрішньоформенного вакуумування розплаву в герметизованій системі виливок – пристрій для ГДВ потребують проведення подальших досліджень для отримання відповідних науково обгрунтованих результатів з метою їх використання в якості вихідних даних для створення ефективних розрахункових схем, алгоритмів та відповідного програмного забезпечення.

Основні засади розрахунку режимів здійснення газодинамічного тиску базуються на відповідності створюваного в системі виливок – пристрій для ГДВ газового тиску кінетиці зростання затверділого шару металу виливка в процесі затвердіння [17 – 19]. При цьому, максимальний рівень тиску газу в певний момент часу може бути близьким значенню тимчасового опору металу в затверділому шарі (σ_B) з урахуванням напружень розтягування, спричинених гідростатичним тиском всередині виливка або злитка. Для виконання умови збереження стабільних геометричних характеристик виливка в розрахунках використовується опір деформації матеріалу виливка (σ), що розраховується з мінімальними значеннями швидкісного та ступеневого коефіцієнтів (3):

$$\sigma = \sigma_{\text{о.д.}} k_t k_\epsilon k_u \text{ при } k_\epsilon k_u \rightarrow \min, \quad (3)$$

де $\sigma_{\text{о.д.}}$ – базисне значення опору деформації, кг/мм²; k_t – температурний коефіцієнт; k_ϵ – ступеневий коефіцієнт; k_u – швидкісний коефіцієнт.

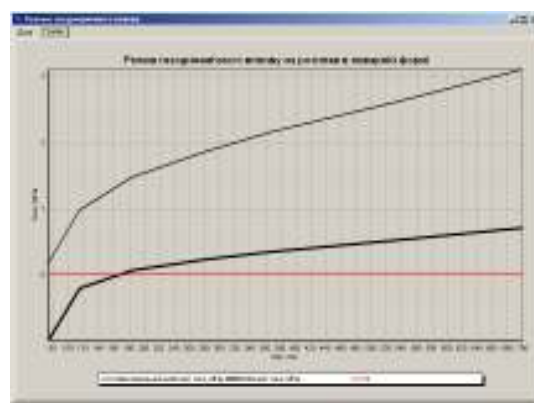
Загальна методика розрахунку технологічних параметрів включає етапи попередньої обробки і отримання вихідних даних, безпосереднього виконання розрахункового алгоритму і подальшого аналізу результатів. На початковому етапі визначається кінетика твердіння виливка і зміна температури його поверхні. Для цього будують температурне поле виливка на основі результатів моделювання або термографічних досліджень. До вихідних даних також відносяться залежності від температури тимчасового опору та опору деформації, щільності металу виливка, його геометричні характеристики.

Далі обчислюють динаміку наростання робочого тиску. В процесі твердіння виливка змінюється середня температура затверділого шару, відповідно і величини межі міцності та опору деформації металу, що дозволяє розраховувати динаміку зміни робочого тиску. Величина і динаміка зміни робочого тиску являє собою різницю між значеннями опору деформації та величиною розтягуючих напружень.

Для автоматизованого виконання розрахунків режимів газодинамічного тиску розроблена комп'ютерна програма «GDICalc» (Gas-Dynamic Influence Calculation) [20,21], що має зручний інтерфейс і забезпечує отримання результатів як в табличному, та і в графічному вигляді (рис. 6)

№ п/п	τ , сек	σ_{Γ} , МПа	σ_B , МПа	σ , МПа	P_{\max} , МПа	P , МПа
1	74	1,03	1,12	0,00667	0,0949	–
2	115	0,25	1,14	0,0133	0,892	0,237
3	184	0,107	1,49	0,14	1,39	0,033
4	282	0,067	1,84	0,267	1,78	0,2
5	366	0,0520	2,12	0,367	2,07	0,315
6	533	0,038	2,56	0,527	2,52	0,489
7	700	0,025	3,04	0,7	3,02	0,675

а



б

Рисунок 6 – Приклад результатів обчислення в програмі GDICalc: режими газодинамічного тиску для виливка із сталі 35Л в табличному вигляді (а) та інтерфейс програми, діалогове вікно «Режим газодинамічного впливу», закладка «Графіки»

Наявні засоби розрахунку режимів газодинамічного тиску дозволяють визначити необхідні параметри здійснення цієї частини комбінованої технології з врахуванням індивідуальних особливостей конкретного виливка або злитка без проведення додаткових натурних експериментальних, в тому числі термографічних, досліджень та значно скоротити витрати часу на етапі підготовки виробництва.

Висновки.

1. Проведений аналіз результатів теоретичних, експериментальних робіт, існуючих технологічних розробок по використанню процесів продувки, вакуумування та використання газового тиску для підвищення якості литого металу крупних виливків або злитків, показав перспективність застосування вказаних впливів для обробки розплаву безпосередньо в ливарній формі (виливниці). Такий підхід до здійснення процесів позапічної обробки розплаву дає змогу, в тому числі, отримати переваги традиційно використовуваних технологій ковшової обробки без застосування спеціалізованого обладнання у випадку його відсутності або економічної недоцільності капітальних витрат для його встановлення.

2. Визначена можливість реалізації процесу комплексного внутрішньоформенного газодинамічного впливу на розплав крупних виливків та злитків, який складається з послідовних операцій продувки інертними газами через сифонну ливникову систему, вакуумування та наступного газодинамічного тиску в процесі затвердіння за допомогою відповідних пристроїв. Особливістю технології є те, що протягом усього процесу від початку твердіння на рідкий метал здійснюється вплив за рахунок створення регульованого газового тиску в герметизованій системі виливок-пристрої для введення газу. Необхідна умова - наявність на поверхні ливникової системи та робочої порожнини ливарної форми шару затверділого металу до моменту подачі газу в систему виливок-пристрої для подачі газу. Товщина цього шару, що збільшується в часі, повинна забезпечувати за своїми міцністними характеристиками герметичність системи виливок-пристрої для введення газу, що знаходиться під тиском, аж до повного затвердіння виливка (злитка).

3. В результаті проведення контекстного аналізу роботи пристроїв для витиснення розплаву із сифонної ливникової системи крупних виливків та злитків і здійснення внутрішньоформенної продувки, а також процесів вакуумування та газодинамічного тиску під час затвердіння металу в формі (виливниці), визначені конкретні варіанти їх конструкції та відповідні технологічні особливості роботи. Для витиснення розплаву із сифонної ливникової системи може використовуватися пристрій, що представляє собою провідник газу від зовнішнього джерела стисненого газу з металевим герметизуючим холодильником, що розпочинає «працювати» впродовж 1 – 2 хвилин після завершення заливки. Внутрішньоформенне вакуумування та реалізацію газодинамічного тиску впродовж затвердіння вилівка (злитка) забезпечує пристрій, що вводиться в надливну частину вилівка (злитка) після завершення операції продувки розплаву інертним газом та являє собою холодильник корпусного типу зі вставкою із вогнетривкого матеріалу. Відмінною рисою запропонованих пристроїв є, в тому числі, простота конструкції та легкість вбудовування процесів їх роботи у вже діючий технологічний процес без необхідності значних капітальних витрат.

4. Встановлена необхідність подальших досліджень для розробки загальної методики визначення режимів здійснення певних складових комплексної технології, зокрема, реалізації розрахункової тривалості продувки, що залежить від конкретних параметрів вилівка та форми (температури, фізичних та теплофізичних властивостей сплаву, маси, геометричних особливостей та ін.). Також потребують проведення подальших досліджень для отримання відповідних науково обґрунтованих результатів з метою їх використання в якості вихідних даних для створення ефективних розрахункових схем, алгоритмів та відповідного програмного забезпечення питання, що пов'язані з методологією визначення раціональних режимів внутрішньоформенного вакуумування розплаву в герметизованій системі виливок – пристрій для газодинамічного впливу.

ЛІТЕРАТУРА / LITERATURE

1. Державська А. В. Сучасний стан галузі машинобудування та тенденції її розвитку / А.В. Державська, П.В. Круш // Науковий вісник Ужгородського національного університету, Серія: Міжнародні економічні відносини та світове господарство. - Випуск 21, частина 1. - 2018. - С. 69 – 73.
2. Смирнов А.Н. Крупный слиток / А.Н. Смирнов, С.Л. Макуров, В.М. Сафонов, А.Ю. Цупрун ; Донецкий национальный техн. ун-т. - Донецк: изд-во «Вебер» (Донецкое отделение), 2009. - 278 с.
3. Ефимов В.А. Современные технологии разливки и кристаллизации сплавов / В.А. Ефимов, А.С. Эльдарханов. - М.: Машиностроение, 1998. - 359 с.
4. Смирнов А.Н. Metallургические мини-заводы / А.Н. Смирнов, В.М. Сафонов, Л.В. Дорохова, А.Ю. Цупрун. - Донецк: Норд-Пресс, 2005. - 449 с.
5. Жульев С.И. Производство и проблемы качества кузнечного слитка / С.И. Жульев, И.А. Зюбан: Монография / Волг. ГТУ. - Волгоград, 2003. - 168 с.
6. Дюдкин Д.А. Производство стали на агрегате ковш- печь /Д.А. Дюдкин, С.Ю. Бать, С.Е. Гринберг, С.Н. Маринцев. - Донецк: Юго-Восток, ЛТД, 2003. - 300 с.
7. Коломоец Д. Обработка металла вакуумом [Електронний ресурс] / Дмитрий Коломоец // Metallurgist.pro. - 2020. - Режим доступа до ресурсу: <https://metallurgist.pro/obrabotka-metalla-vakuumom/>.
8. Коломоец Д. Продувка металла инертными газами [Електронний ресурс] / Дмитрий Коломоец // Metallurgist.pro. - 2020. - Режим доступа до ресурсу: <https://metallurgist.pro/produvka-metalla-inertnymi-gazami/>.
9. Заявка № 59-215248. Япония. МКИ В22Д 7/00, В22Д 18/04. Способ разливки стали / Син Ниппон сэйтэцу К.К. (Япония); Заявл. 25. 05. 83; Опубл. 05.12.84. / / Технология и оборудование литейного производства. - 1986.- № 1, 1Г191П. - С. 36.
10. Селиверстов В.Ю. Технология газодинамического воздействия на расплав в литейной форме – один из перспективных способов повышения качества металла отливок // Сучасні проблеми металургії. Наукові праці. 2007. – Том 10. – С. 25 – 35.
11. Хрычиков В.Е., Селиверстов В.Ю., Щеглова Т.С., Меняйло С.В. Уменьшение объема усадочных дефектов в нижних шейках чугуновых прокат-

ных валков // Теория и практика металлургии. Днепропетровск, 2001, №5, с.77-80.

12. Селиверстов В.Ю. Технология вытеснения расплава из стояка в отливку // Теория и практика металлургии. – 1999. - № 4. – С. 12–13.

13. Пат. 28858 Україна, МПК (2006) B22D 18/00. Спосіб отримання виливків / Селівьорстов В.Ю., Хричиков В.Є., Доценко Ю.В. – № 200708968; заявл.03.08.2007; опубл. 25.12.2007, Бюл.№21.

14. Пат. 28859 Україна, МПК (2006) B22D 18/00. Пристрій для отримання виливків / Селівьорстов В.Ю., Хричиков В.Є., Доценко Ю.В. – № 200708969; заявл.03.08.2007; опубл. 25.12.2007, Бюл.№21.

15. Пат. 37838 Україна, МПК (2006) B22D 18/00. Спосіб отримання виливків / Селівьорстов В.Ю., Хричиков В.Є., Доценко Ю.В. – № 200808859; заявл.07.07.2008; опубл. 10.12.2008, Бюл.№23.

16. Пат. 37837 Україна, МПК (2006) B22D 18/00. Пристрій для отримання виливків / Селівьорстов В.Ю., Хричиков В.Є., Доценко Ю.В. – № 200808858; заявл. 07.07.2008; опубл. 10.12.2008, Бюл.№23.

17. «Методика розрахунку режиму газодинамічного впливу на розплав в ливарній формі»; свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір /Селівьорстов В.Ю. – № 34833; дата реєстрації 06.09.2010.

18. Селиверстов В.Ю. Методика расчета параметров газодинамического воздействия на затвердевающий металл в литейной форме / В.Ю. Селиверстов, Т.В. Михайловская //Системні технології: Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 3 (68). – С. 186 – 192.

19. Селиверстов В.Ю. Особенности расчета режима газодинамического воздействия на расплав при кристаллизации отливок из сталей 35Л, Х18Ф1 и алюминиевого сплава АК5М в металлической форме /В.Ю. Селиверстов //Теория и практика металлургии. – 2010. – № 1 – 2. – С. 64 – 67.

20. Селівьорстов В.Ю. Автоматизоване визначення режиму газодинамічного впливу на розплав в ливарній формі /В.Ю. Селівьорстов, Т.В. Михайловська //Системні технології: Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Дніпропетровськ, 2010.–Вип. 4 (69).–С. 73 – 78.

21.Комп'ютерна програма «GDICalc»; свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір /Селівьорстов В.Ю., Михайловська Т.В. – № 34834; дата реєстрації 06.09.2010.

REFERENCES

1. Derzhavska A. V. Suchasnyi stan haluzi mashynobuduvannia ta tendentsii yii rozvytku / A.V. Derzhavska, P.V. Krush // Naukovyi visnyk Uzhhorodskoho natsionalnoho universytetu, Serii: Mizhnarodni ekonomichni vidnosyny ta svitove hospodarstvo. - Vypusk 21, chastyna 1. - 2018. - S. 69 – 73.
2. Smirnov A.N. Large ingot / A.N. Smirnov, S.L. Makurov, V.M. Safonov, A.Yu. Tsuprun; Donetsk national tech. un-t - Donetsk: publishing house "Weber" (Donetsk branch), 2009. - 278 p.
3. Efimov V.A. Modern technologies of casting and crystallization of alloys / V.A. Efimov, A.S. Eldarkhanov. - M.: Mechanical Engineering, 1998. -- 359 p.
4. Smirnov A.N. Metallurgical mini-plants / A.N. Smirnov, V.M. Safonov, L.V. Dorokhova, A.Yu. Tsuprun. - Donetsk: Nord-Press, 2005. -- 449 p.
5. Zhuliev S.I. Production and quality problems of a forging ingot / S.I. Zhuliev, I.A. Zyuban: Monograph / Volga. GTU. - Volgograd, 2003. -- 168 p.
6. Dyudkin D.A. Steel production at the ladle-furnace assembly / D.A. Dyudkin, S.Yu. Bat, S.E. Greenberg, S.N. Marintsev. - Donetsk: Southeast, LTD, 2003. - 300 p.
7. Kolomoets D. Processing of metal by vacuum [Electronic resource] / Dmitry Kolomoets // Metallurgist.pro. - 2020. - Access mode to the resource: <https://metallurgist.pro/obrabotka-metalla-vakuumom/>.
8. Kolomoets D. Purge metal with inert gases [Electronic resource] / Dmitry Kolomoets // Metallurgist.pro. - 2020. - Access mode to the resource: <https://metallurgist.pro/produvka-metalla-inertnymi-gazami/>.
9. Application No. 59-215248. Japan. MKI V22D 7/00, V22D 18/04. Steel casting method / Shin Nippon seitsetsu K.K. (Japan); Claim 25. 05. 83; Publ. 05.12.84./ Technology and equipment of foundry.-1986.- No. 1,1G191P.- S. 36.
10. Seliverstov V.Yu. The technology of gas-dynamic impact on the melt in the mold is one of the promising ways to improve the quality of metal castings // Modern problems of metallurgy. Initial works. 2007. - Volume 10.-P. 25 - 35.
11. Khrychikov V.E., Seliverstov V.Yu., Scheglova TS, Menyaylo SV Reducing the volume of shrinkage defects in the lower necks of cast-iron rolling rolls // Theory and Practice of Metallurgy. Dnepropetrovsk, 2001, No. 5, pp. 77-80.
12. Seliverstov V.Yu. Technology for displacing the melt from the riser into the casting // Theory and Practice of Metallurgy. - 1999. - No. 4. - S. 12–13.

13. Pat. 28858 Ukraine, MPK (2006) V22D 18/00. Sposib otrymannia vylyvkiv / Selivorstov V.Iu., Khrychikov V.Ie., Dotsenko Yu.V. – № 200708968; zaiavl.03.08.2007; opubl. 25.12.2007, Biul.№21.
14. Pat. 28859 Ukraine, MPK (2006) V22D 18/00. Prystrii dlia otrymannia vylyvkiv / Selivorstov V.Iu., Khrychikov V.Ie., Dotsenko Yu.V. – № 200708969; zaiavl.03.08.2007; opubl. 25.12.2007, Biul.№21.
15. Pat. 37838 Ukraine, MPK (2006) V22D 18/00. Sposib otrymannia vylyvkiv / Selivorstov V.Iu., Khrychikov V.Ie., Dotsenko Yu.V. – № 200808859; zaiavl.07.07.2008; opubl. 10.12.2008, Biul.№23.
16. Pat. 37837 Ukraine, MPK (2006) V22D 18/00. Prystrii dlia otrymannia vylyvkiv / Selivorstov V.Iu., Khrychikov V.Ie., Dotsenko Yu.V. – № 200808858; zaiavl. 07.07.2008; opubl. 10.12.2008, Biul.№23.
17. «Metodyka rozrakhunku rezhymu hazodynamichnoho vplyvu na rozplav v lyvarnii formi»; svidotstvo pro reiestratsiiu avtorskoho prava na tvir /Selivorstov V.Iu. – № 34833; data reiestratsii 06.09.2010.
18. Seliverstov V.Yu. Method for calculating the parameters of gas-dynamic effects on the hardened metal in the mold / V.Yu. Seliverstov, T.V. Mikhailovskaya // System Technologies. - Dnepropetrovsk, 2010. - Issue. 3 (68). - S. 186 - 192.
19. Seliverstov V.Yu. Features of the calculation of the regime of gas-dynamic influence on the melt during crystallization of castings from steel 35L, Kh18F1 and aluminum alloy AK5M in metal form / V.Yu. Seliverstov // Theory and Practice of Metallurgy. - 2010. - No. 1 - 2. - S. 64 - 67.
20. Selivorstov V.Iu. Avtomatyzovane vyznachennia rezhymu hazodynamichnoho vplyvu na rozplav v lyvarnii formi /V.Iu. Selivorstov, T.V. Mykhailovska //Systemni tekhnolohii: Rehionalnyi mizhvuzivskyi zbirnyk naukovykh prats. – Dnipropetrovsk, 2010. – Vyp. 4 (69). – S. 73 – 78.
21. Kompiuterna prohrama «GDICalc»; svidotstvo pro reiestratsiiu avtorskoho prava na tvir /Selivorstov V.Iu., Mykhailovska T.V. – № 34834; data reiestratsii 06.09.2010.

Received 23.03.2020.

Accepted 03.04.2020.

***Перспективы использования комплексных технологий газодинамического
воздействия на расплав в литейной форме***

Представленный анализ научно-технической информации по использованию процессов внепечной обработки для повышения качества литого металла. Показана перспективность применения указанных воздействий для обработки расплава непосредственно в литейной форме (изложницы). Определена возможность реализации процесса комплексного внутришнурового газодинамического воздействия на расплав крупных отли-

вок и слитков, который состоит из последовательных операций продувки инертными газами через сифонную литниковую систему, вакуумирования и последующего газодинамического давления в процессе затвердевания с помощью соответствующих устройств. Определены конкретные варианты их конструкции и технологические особенности работы. Показано, что отличительной чертой технологии является то, что в течение всего процесса от начала твердения на жидкий металл оказывается воздействие за счет создания регулируемой газовой давления в герметизированной системе отливка-устройства для ввода газа. Предложенные устройства, является конструктивно простыми и могут быть с легкостью встроенными в уже действующий технологический процесс без необходимости значительных капитальных затрат. Отмечена необходимость дальнейших исследований для разработки общей методики определения режимов продолжительности продувки и рациональных режимов внутришньоформенного вакуумирования расплава.

***Prospects for the use of integrated technologies
of gas-dynamic impact on the melt in the mold***

Trends in expanding the range of steel ingots, instability and crushing of orders at existing foundries that do not have additional specialized equipment, high capital costs for global technical re-equipment, necessitate the search for new technological ways to obtain quality products. Therefore, more and more attention of scientists and practitioners is attracting questions related to improving existing and developing new processes to improve the quality of cast metal, reduce the cost of producing products, and increase the degree of environmental friendliness of production in general. One of such recognized ways to improve the quality of cast billets is the use of external physical effects on the liquid metal, and the metal that crystallizes directly in the mold.

The paper presents an analysis of scientific and technical information on the use of out-of-furnace processing processes and the use of gas pressure to improve the quality of cast metal of large castings or ingots. The prospects of using these effects for processing the melt directly in the mold is shown. The possibility of implementing a process of complex in-situ gas-dynamic impact on the melt of large castings and ingots, which consists of sequential inert gas blowing through a siphon sprue system, evacuation and subsequent gas-dynamic pressure in the solidification process using the appropriate devices. Specific options for their design and technological features of the work are determined.

A distinctive feature of the technology is that during the entire process from the onset of solidification, the metal is affected by the creation of an adjustable gas pressure in a sealed casting-gas injection system. The proposed device is structurally simple and can be easily integrated into an existing process without the need for significant capital costs.

The need for further research to develop a common methodology for determining the duration of the purge, and rational modes of intra-molten melt evacuation of the sealed casting system - a device for gas-dynamic effects.

Селиверстов Вадим Юрьевич - д.т.н., професор, кафедра литейного производства, Национальная металлургическая академия Украины.

Селиверстова Татьяна Витальевна - к.т.н., доцент, доцент кафедры информационных технологий и систем, Национальная металлургическая академия Украины.

Селівьорстов Вадим Юрійович - д.т.н., професор, кафедра ливарного виробництва, Національна металургійна академія України.

Селівьорстова Тетяна Віталіївна - к.т.н., доцент, доцент кафедри інформаційних технологій та систем, Національна металургійна академія України.

Selivyorstov Vadim - doctor of engineering's sciences, professor, Department of casting production, The National Metallurgical Academy of Ukraine.

Selivyorstova Tatjana - candidate of technical science, assistant professor, Department of information technology and systems, The National Metallurgical Academy of Ukraine.

ЗМІСТ

Дяченко Г.Г., Азюковський О.О. Регулятор безперервної оптимізації енергоефективності в векторно-керованих асинхронних приводах	3
Колосов І.В., Поливода О.В., Рудакова Г.В. Ідентифікація напруженого стану людини-оператора	15
Ревенко С.В., Тоуфак Е.Р., Лебеденко Ю.О. Оптимальне керування багатоприводною системою каркасної установки паралельної конструкції	23
Соловійова І.А., Николаєнко Ю.М. Прогнозування точності труб при безоправочному волочінні	30
Хомченко А.Н., Литвиненко О.І., Астіоненко І.О. Нестандартна модель трикут- ного скінченного елемента T7	37
Васильєв Л.М., Васильєв Д.Л., Малич Н.Г., Назаров А.Е. Моделирование процесса разрушения цилиндрических образцов горных пород	47
Дмитрієва І.С., Грищенко Д.М. Огляд проблеми переванта- ження вулично-дорожньої мережі та моделювання робо- ти деяких її ділянок	59

CONTENTS

Diachenko G.G., Aziukovskyi O.O. A continuous energy-efficiency optimization controller for field-orientation induction motor drives	3
Kolosov I.V., Polyvoda O.V., Rudakova H.V. Identification of the human operator stress conditions	15
Revenko S.V., Tchoufack E.R., Lebedenko Yu.A. Optimal control of the multi-drive system framework installation of parallel construction	23
Solovyova I., Nykolayenko Yu. Predicting the accuracy of pipes at sinking	30
Khomchenko A.N., Litvinenko, O.I., Astionenko I.O. Non-Standard Model of Trian- gular Finite Element T7	37
Vasilyev L.M., Vasilyev D.L., Malich M.G., Nazarov A.E. Simulation of the process of destruction of cylindrical rock samples	47
Dmytriieva I.S., Hryshchenko D.M. Overview of the problem of overloading the street transport network and modeling the op- eration of some of its sections	59

Станчиц А.Г., Селівьорстова Т.В., Станчиц Г.Ю.		Stanchyts A.G., Seliverstova T.V., Stanchyts G.Yu.	
Фрактальні дослідження річки Дніпро	65	Fractal studies of the Dnieper River	65
Булана Т., Молодець Б.		Molodets B., Bulanaya T.	
Аналіз існуючих варіантів класифікації хворих на серце- во-судинними захворювання- ми за допомогою нейронними мережами	71	Analysis of existing options for the classification of patients with cardiovascular disease using neural networks	71
Вовк С.М.		Vovk S.M.	
Застосування функціонала квазіпротяжності в задачах апроксимації спотворених даних	79	Using of functional of the quasi-extent in the problems of approximation of distorted data	79
Каштан В.Ю., Гнатушенко В.В.		Kashtan V., Hnatushenko V.	
Видалення тіней на цифрових космічних знімках на основі вейвлет-перетворення	88	Shadow removal on digital satellite images using wavelet transforms	88
Красников К.С.		Krasnikov K.S.	
Математическое моделирова- ние вакуумной дегазации стали в ковше с аргонной продувкой	102	Mathematical modelling vacuum degassing of steel in argon-stirred ladle	102
Жихарева Я.С., Сидак В.М., Киселева Т.А., Дубинский А.Г.		Zhikhareva Ya.S., Sidak V.M., Kysilova T.O., Dubinsky A.G.	
Выбор программного обеспе- чения для практикума по составлению алгоритмов	111	The software choice for a prac- tice about algorithms flowcharts making	111
Селівьорстов В.Ю., Селівьорстова Т.В.		Selivyorstov V., Selivyorstova T.	
Перспективи використання комплексних технологій газодинамічного впливу на розплав в ливарній формі	122	Prospects for the use of inte- grated technologies of gas- dynamic impact on the melt in the mold	122

РЕФЕРАТИ

УДК 681.518

Дяченко Г.Г., Азюковський О.О. **Регулятор безперервної оптимізації енергоефективності в векторно-керованих асинхронних приводах** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5 (130). - Дніпро, 2020. - С. 3 - 14.

У цій роботі розглядається адаптивний вибір постійної часу фільтра для фільтрації стаціонарного сигналу завдання потоку ротора в задачі енергоефективного керування асинхронними машинами з векторним керуванням в перехідних режимах, коли умови навантаження та швидкості змінюються з урахуванням ефекту основного насичення магнітопроводу. Показано, що при належному керуванні швидкістю зміни потоку ротора втрати енергії за повний цикл роботи при зміні крутного моменту можна значно зменшити порівняно зі звичайними випадками. Аналіз відповідного вибору постійної часу фільтра як частки постійної часу ротора базується на чисельному дослідженні та результатах моделювання для трьох різних індукційних машин з різною потужністю.

Бібл. 7.

УДК 519.71

Колосов І.В., Поливода О.В., Рудакова Г.В. **Ідентифікація напруженого стану людини-оператора** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5 (130). - Дніпро, 2020. - С. 15 - 22.

У даній статті авторами проведено дослідження біофізичних параметрів, які змінюються під час виконання операцій різного характеру та можуть вимірюватися за допомогою датчиків. Обґрунтовано можливість визначення рівня напруженості стану людини та оцінювання складності оперативної ситуації на основі аналізу даних, що фіксуються за результатами вимірів. Доведено, що використання методу найменших квадратів дозволяє отримувати оцінки параметрів моделі динамічного об'єкту, на основі якої можна адекватно ідентифікувати стан людини-оператора.

Бібл. 5, іл. 4.

УДК 621.856.8+62-503.5

Ревенко С.В., Тоуфак Е.Р. Лебеденко Ю.О. **Оптимальне керування багатоприводною системою каркасної установки паралельної конструкції** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5 (130). - Дніпро, 2020. - С. 23 - 29.

Стаття описує каркасну установку паралельної конструкції. Наведено формули механіки та руху каркасної установки. За допомогою залежностей визначені положення центру платформи, кут відхилення норми від вертикальної осі. Описано також співвідношення координат структури. Проаналізовано рівняння динаміки для многоприводних систем. За допомогою рівнянь Лагранжа отримана система

диференціальних рівнянь, що описують оптимальне по відхиленню від заданої траєкторії рух маніпулятора.

Бібл. 4, іл. 2.

УДК 621.774.35

Соловйова І.А., Николаєнко Ю.М. **Прогнозування точності труб при безоправочному волочінні** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5 (130). - Дніпро, 2020. - С. 30 - 36.

Проведено дослідження технологічних параметрів виробництва труб з різних марок сталей при безоправочному волочінні. Визначені фактори, що впливають на зміну різностінності труб за допомогою кореляційно-регресійного аналізу та побудовані регресійні моделі. Результати досліджень впроваджені в розрахунки маршрутів та технологічних карт виробництва з метою прогнозування різностінності готових труб при волочінні та за провадженням скорочення витрат металу на виробництві.

Бібл. 3, рис. 2

УДК 519.65

Хомченко А.Н., Литвиненко О.І., Астіоненко І.О. **Нестандартна модель трикутного скінченного елемента Т7** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5 (130). - Дніпро, 2020. - С. 37 - 46.

Розглянуто трикутник Т7, який має сім вузлів (три вузли у вершинах, три вузли на середині сторін і один вузол у барицентрі). Показано, що Т7, як і стандартний Т10, може виконувати подвійну роль: обчислювального шаблону і скінченного елемента, а порушення міжелементної неперервності (несумісність) на границі з трикутним Т6 або квадратним Q8 не має небажаних наслідків. Модель Т7 успішно витримує кускове тестування. При цьому «дута» мода Т7 відкриває можливості генерувати шляхом конденсації безліч альтернативних моделей Т6.

Бібл. 8, іл. 3.

УДК 622.028:620.173.24

Васильев Л.М., Васильев Д.Л., Малич Н.Г., Назаров А.Е. **Моделирование процесса разрушения цилиндрических образцов горных пород** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5 (130). - Дніпро, 2020. - С. 47 - 58.

В статье разработана математическая модель разрушения цилиндрических образцов горных пород при наличии контактного трения. Дан метод расчета предельного вертикального напряжения в вершине трещины и расчета предела прочности, в частном случае цилиндрических образцов горных пород с использованием предела сопротивления материала сдвигу, угла внутреннего трения и коэффициента контактного трения. Метод позволяет использовать эти данные для оперативного управления процессами дезинтеграции.

Библ.9, ил.2.

УДК 004.94

Дмитрієва І.С., Грищенко Д.М. **Огляд проблеми перевантаження вулично-дорожньої мережі та моделювання роботи деяких її ділянок** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5 (130). - Дніпро, 2020. - С. 59 - 64.

Розглянуто особливості складових транспортної мережі та їх зв'язок. У роботі увага приділена імітаційному моделюванню вулично-транспортної мережі, для реалізації чого використано середовище MATLAB (Simulink і SimEvents). В даній роботі було проведено імітаційне моделювання ділянок автомобільної дороги з одностороннім та двостороннім рухом, перехресть типу Т-перехрестя, Х-перехрестя.

Бібл. 2, іл. 2.

УДК 004

Станциц А.Г., Селівьорстова Т.В., Станциц Г.Ю. **Фрактальні дослідження річки Дніпро** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5 (130). - Дніпро, 2020. - С. 65 - 70.

Водні ресурси Дніпра з давніх часів використовуються для різних цілей. Особливо зросло господарське значення водних ресурсів Дніпра, коли виникла загроза дефіциту водних ресурсів і здійснені широкі заходи щодо їх комплексного використання. Розрахунок багаторічної мінливості водності річки стає важливою ланкою в плануванні розвитку виробничих сил країни. Щоб вирішити проблему водності в майбутньому, потрібно базуватися на багатовікових відомостях за минулі часи, тому розглядається фрактальність стоку річки.

Бібл. 4, табл. 2.

УДК 004.021

Булана Т., Молодець Б. **Аналіз існуючих варіантів класифікації хворих на серцево-судинними захворюваннями за допомогою нейронними мережами** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5 (130). - Дніпро, 2020. - С. 71 - 78.

Робота присвячена аналізу інформаційних технологій хронобіологічного моніторингу кардіосистем, розробці систему підтримки прийняття рішень для лікаря-дослідника на базі методів класифікації з використанням нейронних мереж таких як імовірнісна неронна мережа PNN (Probabilistic Neural Networks), багат шаровий перцептрон MLP NN (Multi-Layer Perceptron), каскадно-кореляційна мережа CasCor (Cascade Correlation). У результаті отримано наступне: найкращим класифікатором є нейромережа каскадної кореляції з 85-88% точністю класифікації. Найгіршим класифікатором стала ймовірнісна нейронна мережа, оскільки точність цього алгоритму залежить від розміру набору даних.

Бібл. 5.

УДК 004.02

Вовк С.М. **Застосування функціонала квазіпротяжності в задачах апроксимації спотворених даних** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5 (130). - Дніпро, 2020. - С. 79 - 87.

Досліджена ефективність застосування функціонала квазіпротяжності для розв'язання задач апроксимації даних, описуваних параметричною моделлю. Представлені результати теоретичного й чисельного аналізу, які демонструють особливості поведінки цього функціонала як цільової функції лінійного й нелінійного параметрів моделі даних для різних рівнів шуму в припущенні, що параметри моделі приймають одне або кілька значень. Сформульовані рекомендації з ефективного використання функціонала квазіпротяжності для розв'язання задач апроксимації даних.

Бібл. 7, іл. 2.

УДК 004.9

Каштан В.Ю., Гнатушенко В.В. **Видалення тіней на цифрових космічних знімках на основі вейвлет-перетворення** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5 (130). - Дніпро, 2020. - С. 88 - 101.

Розглянуто проблему ідентифікації та компенсації тіней на космічних знімках високого просторового розрізнення. У роботі використано знімки міської території, отримані супутником WorldView-3. Наявність тіней на знімках може привести до втрати корисної інформації і навіть помилок в роботі алгоритмів розпізнавання, виявлення, відстеження і класифікації об'єктів. Запропоновано новий алгоритм автоматичного виявлення та усунення тіней цифрових космічних знімків, що дозволяє відновити освітленість та підвищити якість цих знімків. Для цього використано перехід до кольорової метрики HSV, вейвлет-перетворення та контурну сегментацію. Порівняння кількісних показників, а також візуальні результати показали перевагу використання запропонованого алгоритму. Результати роботи можуть бути використані при подальшому розпізнаванні об'єктів та тематичній обробці космічних знімків.

Бібл. 15.

УДК 669.1:004.942:[532.54+519.63+66.069.84]

Красников К.С. **Математическое моделирование вакуумной дегазации стали в ковше с аргонной продувкой** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5 (130). - Дніпро, 2020. - С. 102 - 110.

В статье представлена математическая модель нестационарного процесса деазотации и дегидрогенизации расплава стали в вакууматоре камерного типа с аргонной продувкой. Дегазация стали при помощи вакуума — распространенная среди металлургических предприятий технология, которая дает возможность достигать необычно низкие концентрации водорода и азота в металлическом расплаве, что необходимо для повышения качества стальных изделий. Проведение вычислительных опытов на предложенной математической модели уменьшает затраты временных и финансовых ресурсов, поэтому построение модели является актуальной задачей. Программное приложение позволит оценить влияние интенсивности аргонной продувки, а также глубины расплава, на степень его

дегазации, что может быть использовано при внедрении технологических рекомендаций в производство стали.

Бібл. 10, іл. 1.

УДК 004.021+004.43

Жихарева Я.С., Сидак В.М., Киселева Т.А., Дубинский А.Г. **Выбор программного обеспечения для практикума по составлению алгоритмов** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5 (130). - Дніпро, 2020. - С. 111 - 121.

Студенты-медики должны понимать концепцию алгоритмов. Нам необходимо программное обеспечение для визуального представления медицинских алгоритмов диагностики и лечения. Мы используем упрощенную версию старого стандарта ISO 5807: 1985. По заданным требованиям мы выбрали программу «yEd Graph Editor», по таким причинам: простота в освоении и использовании, есть все блоки диаграмм, можно сохранять и экспортировать результаты, распространяется как freeware. Мы применяем это программное обеспечение два прошлых учебных года, и можем рекомендовать использовать его, когда время для практических занятий ограничено.

Бібл. 16.

УДК 66.083: 621.74.04:621.746.6:004.942

Селівьорстов В.Ю., Селівьорстова Т.В. **Перспективи використання комплексних технологій газодинамічного впливу на розплав в ливарній формі** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5 (130). - Дніпро, 2020. - С. 122 - 143.

Представлений аналіз науково-технічної інформації щодо використання процесів позапічної обробки для підвищення якості литого металу. Показана перспективність застосування вказаних впливів для обробки розплаву безпосередньо в ливарній формі (виливниці). Визначена можливість реалізації процесу комплексного внутрішньоформенного газодинамічного впливу на розплав крупних виливків та злитків, який складається з послідовних операцій продувки інертними газами через сифонну ливникову систему, вакуумування та наступного газодинамічного тиску в процесі затвердіння за допомогою відповідних пристроїв. Визначені конкретні варіанти їх конструкції та технологічні особливості роботи. Показано, що відмінною рисою технології є те, що протягом усього процесу від початку твердіння на рідкий метал здійснюється вплив за рахунок створення регульованого газового тиску в герметизованій системі виливок-пристрої для введення газу. Запропоновані пристрої, що є конструктивно простими та можуть бути з легкістю вбудованими у вже діючий технологічний процес без необхідності значних капітальних витрат. Зазначена необхідність подальших досліджень для розробки загальної методики визначення режимів тривалості продувки та раціональних режимів внутрішньоформенного вакуумування розплаву.

Бібл. 21.

UDC 681.518

Diachenko G.G., Aziukovskyi O.O. **A continuous energy-efficiency optimization controller for field-orientation induction motor drives** // System technologies. N 5(130) - Dnipro, 2020.- P.3 – 14.

Abstract. The current paper discusses the adaptive choice of a filter time constant for filtering the steady-state flux reference in the energy-efficient control problem of field-orientation induction machines in transient behavior when load and speed conditions are changing taking into account the effect of the main induction saturation. It is shown that by appropriately managing the flux linkage rate of change the energy losses per full operation cycle under torque changes can be significantly reduced compared to the conventional cases. The analysis for the appropriate choice of the filter time constant as a fraction of the rotor time constant is based on a numerical study and simulation results for three different induction machines with different rated powers.

Ref. 7.

UDC 519.71

Kolosov I.V., Polyvoda O.V., Rudakova H.V. **Identification of the human operator stress conditions** // System technologies. N 5(130) - Dnipro, 2020.- P.15 – 22.

In this article, the authors conducted a study of biophysical parameters that change during the execution of different operations and can be measured using sensors. The possibility of determining the of a human's stress conditions level and assessing the complexity of the operational situation based on the analysis of data that are recorded according to the measurement results is substantiated. It is proved that the use of the least squares method allows to obtain estimates of the parameters of a dynamic object model, based on which it is possible to adequately identify the condition of a human operator.

Bibl. 5, ill. 4.

UDC 621.856.8+62-503.5

Revenko S.V., Tchoufack E.R., Lebedenko Yu.A. **Optimal control of the multi-drive system framework installation of parallel construction** // System technologies. N 5(130) - Dnipro, 2020.- P.23 – 29.

This article describes the frame installation of parallel construction. Formulas for mechanics and movement of this device are given. By means of dependencies the positions of the center of the platform are determined, the angle of deviation of the normal from the vertical axis. Relations of the coordinates of the structure were also described. The equations of dynamics for multi-drive systems are analyzed. Using the Lagrange equations, a system of differential equations is obtained that describe the optimal movement of the manipulator in deviation from a given trajectory.

Bibl. 4, fig. 2.

UDK 621.774.35

Solovyova I., Nykolayenko Yu. **Predicting the accuracy of pipes at sinking** // System technologies. N 5(130) - Dnipro, 2020.- P.30 – 36.

Technological parameters of production of pipes from different grades at sinking. The factors that influence the variation of the pipe diversity by correlation-regression analysis are determined and regression models are constructed. The results of the researches are incorporated into the calculations of routes and technological maps of production in order to predict the difference of finished pipes during drawing and to introduce a reduction of metal costs in production.

Bibl. 3, il. 2.

UDC 519.65

Khomchenko A.N., Litvinenko, O.I., Astionenko I.O. **Non-Standard Model of Triangular Finite Element T7** // System technologies. N 5(130) - Dnipro, 2020.- P.37 – 46.

The paper considers the triangle T7, which has seven nodes (three nodes in the points, three nodes in the middle of the sides and one node in the barycenter). It is shown that T7, as well as standard T10 can fulfill a dual role: both of a computational pattern and a finite element. Violation of inter-element continuity (incompatibility) at the boundary with triangular T6 or square Q8 has no undesirable effects. T7 model successfully withstands lump testing. Upon that the "blown" mode of T7 opens the possibility to generate by condensation many alternative models of T6 with different integral characteristics.

Bibl.8, illustr. 5.

UDC 622.028: 620.173.24

Vasilyev L.M., Vasilyev D.L., Malich M.G., Nazarov A.E. **Simulation of the process of destruction of cylindrical rock samples** // System technologies. N 5(130) - Dnipro, 2020.- P.47 – 58.

The mathematical model of the destruction of cylindrical rock samples in the presence of contact friction is developed.

The method of calculation of the maximum vertical stress in the crack tip and the calculation of the tensile strength, in the particular case of cylindrical samples of rocks using the limit of resistance of the shear material, the angle of internal friction and the coefficient of contact friction. The method allows to use this data for operational management of disintegration processes.

Bible 9, Figure 2.

UDC 004.94

Dmytriieva I.S., Hryshchenko D.M. **Overview of the problem of overloading the street transport network and modeling the operation of some of its sections** // System technologies. N 5(130) - Dnipro, 2020.- P.59 – 64.

The features of the components of the transport network and their connection are considered. Attention is paid to the simulation of the street transport network, for the implementation of which the MATLAB environment (Simulink and SimEvents) was used. In this paper, we simulated sections of a motorway with one-way and two-way traffic, intersections of the type T-intersection, X-intersection.

Bible 2, ill. 2.

UDC 004

Stanchyts A.G., Seliverstova T.V., Stanchyts G.Yu. **Fractal studies of the Dnieper River** // System technologies. N 5(130) - Dnipro, 2020.- P.65 – 70.

Since ancient times, the Dnieper water resources have been used for various purposes. The economic importance of the Dnieper water resources has especially grown, when there was a threat of a shortage of water resources and the implementation of broad measures for their integrated use. The calculation of the long-term variability of river water content becomes an important link in planning the development of the country's productive forces. To solve the problem of water availability in the future, it is necessary to be based on centuries-old information from past times, therefore, the fractality of the river flow is considered.

Ref. 4, tab. 2.

UDC 004.021

Molodets B., Bulanaya T. **Analysis of existing options for the classification of patients with cardiovascular disease using neural networks** // System technologies. N 5(130) - Dnipro, 2020.- P.71 – 78.

The work is devoted to the analysis of information technologies of chronobiological monitoring of cardiac systems, development of decision support system for physician-researcher based on classification methods using neural networks such as PNN (Probabilistic Neural Networks), multilayer perceptron and CasCor (Cascade Correlation).

The training sample was 80% of the total number of patients (278 training pairs), and the test sample was 20% (65 training pairs). The presented data sample is highly representative, considering the number of patients: dataset includes 343 patients with cardiovascular complications (class 1 - 142, class 2 - 207). The age range of patients in the sample is 50-60 years old.

The result is the following: the best classifier is the neural network of cascade correlation with 85-88% classification accuracy. The worst classifier was the probabilistic neural network, since the accuracy of this algorithm depends on the size of the data set.

Ref. 5.

UDC 004.02

Vovk S.M. **Using of functional of the quasi-extent in the problems of approximation of distorted data** // System technologies. N 5(130) - Dnipro, 2020.- P.79 – 87.

The efficiency of using the quasi-extent functional for the solving of the approximation problems of data described by a parametric model is investigated. The results of theoretical and numerical analysis are presented, which demonstrate the behavior of this functional as an objective function of the linear and nonlinear parameters of data model for different noise levels under the assumption that the model parameters take one or more values. Recommendations are formulated for the effective use of the quasi-extent functional for the solving of data approximation problems.

Bibl. 7, fig. 2.

UDC 004.9

Kashtan V., Hnatushenko V. **Shadow removal on digital satellite images using wavelet transforms** // System technologies. N 5(130) - Dnipro, 2020.- P.88 – 101.

Shadow detection and removal in real scene images is always a challenging but yet intriguing problem. Shadows cause hindrance to correct feature extraction of image features like buildings ,towers etc. in urban areas it may also cause false color tone and shape distortion of objects, which degrades the quality of images. Hence, it is important to segment shadow regions and restore their information for image interpretation. Shadows are generated by a local and relative absence of light. Shadows are, first of all, a local decrease in the amount of light that reaches a surface. Secondly, they are a local change in the amount of light rejected by a surface toward the observer. Most shadow detection and segmentation methods are based on image analysis. This paper presents a novel algorithm for automatic shadow detection and removing shadows using HSV color model, contour segmentation and wavelet transform based on a threshold determined by wavelet coefficients in complex urban color remote sensing images for solving problems caused by shadows. In the proposed algorithm shadows are detected using S and V components which is invariant to shadow i.e., it conveys the spectral and color characteristics of image features, regardless of variations in scene illumination condition and means of wavelet coefficients. The multi-resolution property of the wavelet transform leads into four different bands without the loss of spatial information. Once the shadows are detected they are classified and a non shadow area around each shadow termed as buffer area is estimated using contour segmentation. Experiments show that the new algorithm can accurately detect shadows from urban high-resolution remote sensing images and can effectively restore shadows with a rate of over 85%. The proposed algorithm can be used for further object recognition and thematic processing of scanner images.

Bibl. 15.

UDC 669.1:004.942:[532.54+519.63+66.069.84]

Krasnikov K.S. **Mathematical modelling vacuum degassing of steel in argon-stirred ladle** // System technologies. N 5(130) - Dnipro, 2020.- P.102 – 110.

The article presents a mathematical model of the unsteady process of denitrogenation and dehydrogenation of a steel melt in a chamber type vacuum with argon stirring. Vacuum degassing of steel is a widespread among metallurgical plants technology that makes it possible to achieve an unusually low level of hydrogen and nitrogen in a metal melt, which is a necessary condition for improving the quality of steel products. Computational experiments based on the proposed mathematical model require lesser time and financial resources, that's why the model construction is actual task. The software application will allow scientists to assess the impact of argon-stirring intensity, as well as the depth of the melt, on degree of its degassing. That can be used when implementing technological recommendations in steel production.

Ref. 10, fig. 1.

UDC 004.021+004.43

Zhikhareva Ya.S., Sidak V.M., Kysilova T.O., Dubinsky A.G. **The software choice for a practice about algorithms flowcharts making** // System technologies. N 5(130) - Dnipro, 2020.- P.111 – 121.

Medical students must understand the concept of algorithm. So we need software for making visual representations of medical algorithms of diagnosis and treatments. We use the simplified version of old standard ISO 5807:1985. By the set of requirements, we select "yEd Graph Editor" software because it implements our requirements: easy to learn and use, have all of diagram shapes, can save and export results, and it is freeware. We used this software over the last two years and we can recommend to use "yEd Graph Editor" in the case of limited time for practical classes.

Refs. 16.

UDC 66.083: 621.74.04:621.746.6:004.942

Selivyorstov V., Selivyorstova T. **Prospects for the use of integrated technologies of gas-dynamic impact on the melt in the mold** // System technologies. N 5(130) - Dnipro, 2020.- P.122 – 143.

Trends in expanding the range of steel ingots, instability and crushing of orders at existing foundries that do not have additional specialized equipment, high capital costs for global technical re-equipment, necessitate the search for new technological ways to obtain quality products. Therefore, more and more attention of scientists and practitioners is attracting questions related to improving existing and developing new processes to improve the quality of cast metal, reduce the cost of producing products, and increase the degree of environmental friendliness of production in general. One of such recognized ways to improve the quality of cast billets is the use of external physical effects on the liquid metal, and the metal that crystallizes directly in the mold (mold).

The paper presents an analysis of scientific and technical information on the use of out-of-furnace processing processes and the use of gas pressure to improve the quality of cast metal of large castings or ingots. The prospects of using these effects for processing the melt directly in the mold (mold) is shown. The possibility of implementing a process of complex in-situ gas-dynamic impact on the melt of large castings and ingots, which consists of sequential inert gas blowing through a siphon sprue system, evacuation and subsequent gas-dynamic pressure in the solidification process using the appropriate devices. Specific options for their design and technological features of the work are determined.

A distinctive feature of the technology is that during the entire process from the onset of solidification, the metal is affected by the creation of an adjustable gas pressure in a sealed casting-gas injection system. The proposed device is structurally simple and can be easily integrated into an existing process without the need for significant capital costs.

The need for further research to develop a common methodology for determining the duration of the purge, and rational modes of intra-molten melt evacuation of the sealed casting system - a device for gas-dynamic effects.

Refs.21.