

A.I. Guda, A.I. Mikhalyov

MULTI-MODEL METHODS AND PARAMETERS ESTIMATION APPROACHES ON NON-LINEAR DYNAMIC SYSTEM IDENTIFICATION

Abstract. In this article 3 non-linear system identification methods are investigated. Advantages and drawbacks are studied. Test system identification process simulation with proposed methods are conducted.

Keywords: non-linear dynamic system identification, multi-model identification methods, simulation.

Introduction

Identification of the complex non-linear dynamic systems, in particular, systems with chaotic dynamic is a challenging task. Numerous methods can be applied in this area, but, obviously, there is no “silver bullet” due to unlimited set of non-linear systems. One of the most famous adaptive-searching identification methods [1,3], in case of adequate criterion is provided, can be successfully used for this purpose. But, as shown in [2], this methods have some drawbacks. First of all, this methods spend too much time to locate criterion extremum. Other essential drawback – measurement near one point decreases probability of identification in case of multi-extremum criterion shape. Usage of five fixed model approach, as shown in [2], can significantly increase identification speed. Backside result of this method – loss of accuracy, especially far for fixed model points.

So, the actual problem is to create methods, which combine positive features of adaptive-searching and fixed multi-model approaches.

Task definition

To receive identification simulation results, which is independent of particular dynamic system properties, the model of identification error (or the identification criterion) is required. One of the reasons of accuracy loss assumed to be criterion non-symmetrical form. So, the model must have a uniformly controlled part, which describes such phenomena. In this paper one of the simple representation will be used:

$$q_{mi}(p_o, p_{mi}) = a_q(p_o - p_{mi}) + a_{qm}|p_o - p_{mi}|, \quad (1)$$

where p – parameter, q – criterion, a_q – sensitivity coefficient, a_{qm} – non-linearity coefficient. Index “ o ” belongs to object under identification, and index “ mi ” – to model number i .

Function of quality F represented by this way:

$$F(q_{mi}) = \exp\left(-\frac{q_{mi}^2}{q_\gamma^2}\right), \quad (2)$$

where q_γ – sensitivity scale. This definition differs from usual, where numerator have part like $(q_o - q_{mi})^2$, but allows us to uniformly control asymmetrical properties. Usage of definitions (1) and (2) hides from consideration real system dynamic, object and model outputs $x_o(t)$, $x_{mi}(t)$, and describes all properties to 2 coefficients: a_{q1} and a_{qm} . This simplification give chance to determine common properties of identification system itself. We assume, that dynamic properties on identification system is much “slower”, then non-linear system under consideration.

In paper [2], 5 models with fixed parameters was used, and final parameter value was defined in form, close to fuzzy logic “centre of gravity” approach:

$$p_{ge} = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} F_{mi} p_{mi}}{\sum_{i=0}^{n-1} F_{mi}}, \quad (3)$$

where n – number of models, and index “ ge ” denotes “global extremum”. All definitions is converted to used in this paper, not to disturb attention by different definitions.

One clearly visible drawbacks was non-uniform usage of models at bounds, namely number 0 and number $(n-1)$. As a countermeasure of we add 2 fake fixed “out of band” models, designated by indexes “ ll ” and “ rr ”, and with a fixed criterion values: $q_{ll} = q_{rr} = 0$. As initial parameter values of real models distributed uniformly on working range, parameter values of fake models defined as: $p_{ll} = p_{m0} - (p_{m1} - p_{m0})$ and $p_{rr} = p_{m(n-1)} + (p_{m1} - p_{m0})$.

Calculation of p_{ge} is quite simple, but in case of multi-extremum criterion shape, or large q_γ value, the influence of the models, which is

far from real extremum, may be significant. Define value of p_{le} to drop such influence. Let i_m – index of model with maximum F . Then

$$p_{le} = \frac{F_{i_m-1}p_{i_m-1} + F_{i_m}p_{i_m} + F_{i_m+1}p_{i_m+1}}{F_{i_m-1} + F_{i_m} + F_{i_m+1}}. \quad (4)$$

If $i_m - 1$ or $i_m + 1$ is out of bounds, substitute corresponding values of one of fake models.

Another way to determine extremum point in the range of 3 adjutant models is to approximate $F(p)$ by parabola. Let index “c” designated “current” value of i , and “l” means (c–1), “r” – (c+1). To simplify calculations, move the coordinate origin, so $\tilde{p}_c = (p_c - p_c) = 0$, $\tilde{p}_l = (p_l - p_c)$, $\tilde{p}_r = (p_r - p_c)$, $\tilde{F}_c = F(p_c) - F(p_c) = 0$, $\tilde{F}_l = F(p_l) - F(p_c)$, $\tilde{F}_r = F(p_r) - F(p_c)$. Thus:

$$\begin{cases} a_2\tilde{p}_l^2 + a_1\tilde{p}_l = \tilde{F}_l \\ a_2\tilde{p}_r^2 + a_1\tilde{p}_r = \tilde{F}_r \end{cases}, \quad (5)$$

$$a_1 = \frac{\tilde{F}_r\tilde{p}_l^2 - \tilde{F}_l\tilde{p}_r^2}{\tilde{p}_l^2\tilde{p}_r + \tilde{p}_l\tilde{p}_r^2},$$

$$a_2 = -\frac{\tilde{F}_r\tilde{p}_l - \tilde{F}_l\tilde{p}_r}{\tilde{p}_l^2\tilde{p}_r + \tilde{p}_l\tilde{p}_r^2},$$

$$\tilde{p}_e = -\frac{a_1}{2a_2}, \quad p_e = p_c - \frac{a_1}{2a_2}. \quad (6)$$

To prevent displacement of p_e out of band, defined by current 3 models, limit p_e to $(p_l; p_r)$. For practical reason, limitation may be stronger.

The value of p_e where $c = i_m$ define as p_{ee} . While simulation of identification process, we will determine p_{ge} , p_{le} and p_{ee} , along with corresponding identification errors:

$$e_{ge} = p_o - p_{ge}, \quad e_{le} = p_o - p_{le}, \quad e_{ee} = p_o - p_{ee}. \quad (7)$$

The quality of identification will be estimate as standard deviation of identification errors on all simulation time T .

Identification process simulation

The identification process simulation was conducted by developed simulation program “qontrol”. As mentioned before, instead of real object identification, was used criterion approximation, given by (1). To

check ability to identify non-steady systems, object parameter p_o was given by such equation:

$$p_o(t) = U_{in} \sin(\omega_{in} t) + C_0, \quad (8)$$

where coefficients was set to values, which allows to test different modes: $U_{in} = 40$; $\omega_{in} = 1.1$; $C_0 = 45$. Working parameter range was given as $(0,100)$. Initial values of models parameter: $p_{ll} = -10$; $p_{m0,0} = 10$;

$$p_{m1,0} = 30; \quad p_{m2,0} = 50; \quad p_{m3,0} = 70; \quad p_{m4,0} = 90; \quad p_{rr} = 110.$$

The values of other parameters: $a_q = 5$; $a_{qm} = 0.5$ (small) or $a_{qm} = 2.0$ (large asymmetry). The value of q_γ was changed in range $[2;140]$, standard deviations of identification errors was measured, and plots are provided for better value of q_γ .

In fig. 1 represented simulation results for identification system with $n=5$ and $q_\gamma = 60$. The identification error analyses shows, that in this environment there is no visible difference between p_{eg} and p_{el} . As strange as it seen, the values of p_{ee} shows the worst results. And obviously, error is minimal near one of model parameters, and essentially increased if $p_o \notin [p_{m0,0}; p_{m4,0}]$.

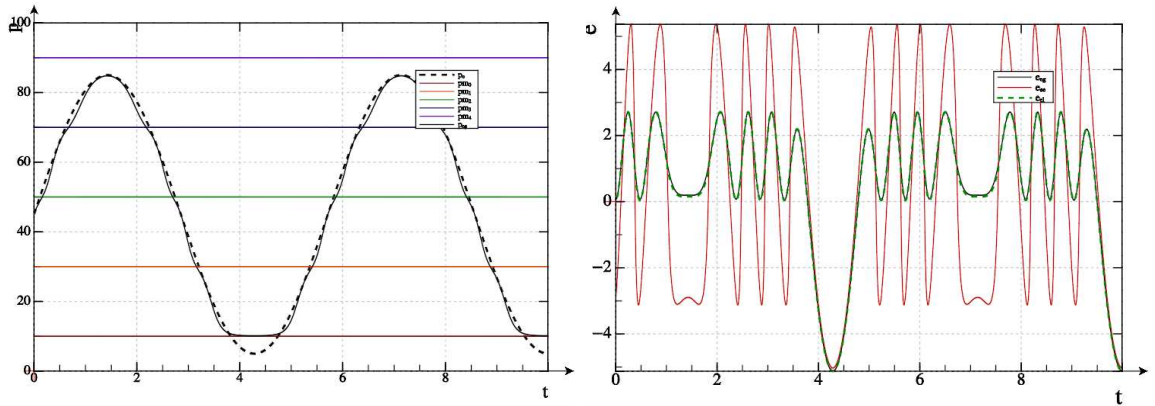


Figure 1 – Identification with fixed 5 models and 2 fake models

In fig. 2 represented dependencies of $\bar{e}_{eg}$, $\bar{e}_{el}$ and $\bar{e}_{ee}$ from q_γ at different values of a_{qm} .

This results shows, that for every method of p estimation, an optimal q_γ value exists, large values of a_{qm} leads to large errors, and optimal q_γ value for $\bar{e}_{ee}$ is essentially large, then for $\bar{e}_{eg}$, $\bar{e}_{el}$.

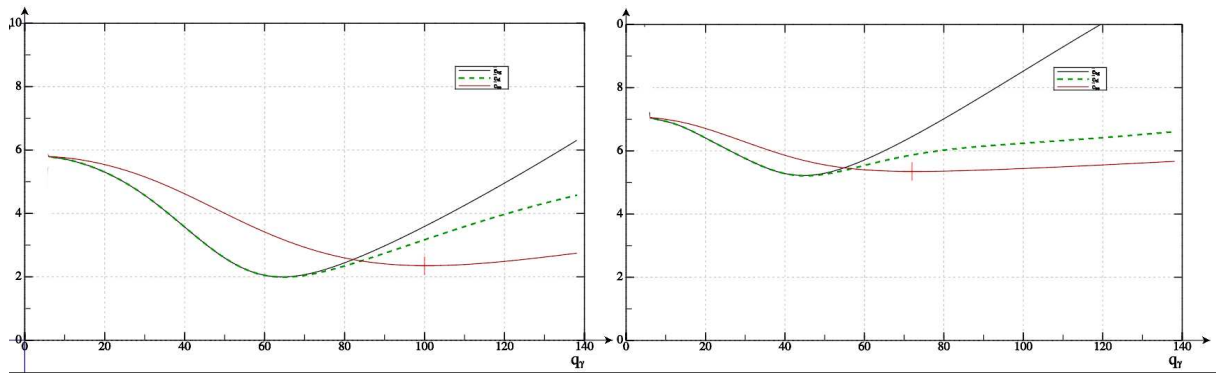


Figure 2 – Error dependencies from q_γ while identification with fixed 5 models and 2 fake models, $a_{qm} = 0.5$ (left), and $a_{qm} = 2.0$ (right plot)

Moving bang-limited models identification system

To achieve better results, let's allow model to change own parameter. The new parameter value p_e is given by (6). I.e. every model (except fake) takes in account not only own parameter and quality function, but the same of nearest neighbours. But if we allow for all models to move freely, all models will fall in one small area, and not react to next parameter movement. To prevent this, we assign a non-intersected band for every model, which limits parameter. The simulation results are shown in fig. 3 and 4.

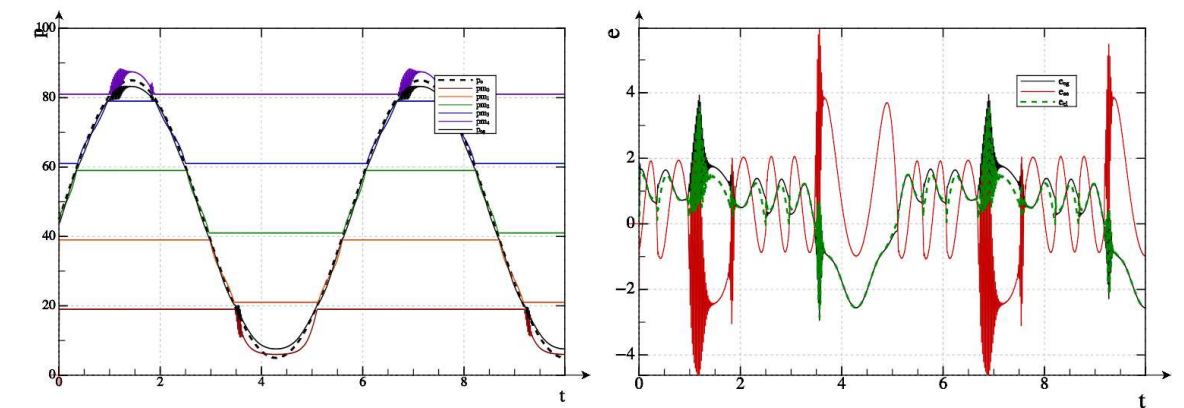


Figure 3 – Identification with 5 band-bounded models and 2 fake models

The result shows, that, in general, this method leads to less errors with the same conditions. Moreover, due to moving parameters there are no “dead zones” near working range boundaries. One model follows the object parameter in own band, and provides better identification results.

The error shapes show one drawback for this method: near the bands boundaries there are fast switching oscillations. This is due to the

fact, that identification process is dynamical too, and we should not neglect its dynamic.

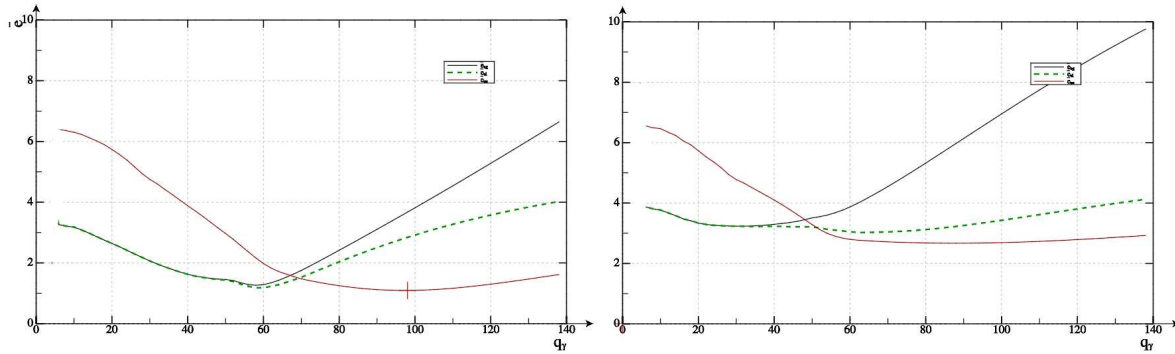


Figure 4 – Error dependencies from q_γ while identification with 5 bounded models and 2 fake models, $a_{qm} = 0.5$ (left), and $a_{qm} = 2.0$ (right plot)

Method with forces and viscous

To achieve better results, we can treat every real model as physical body under influence of different forces. We consider given forces:

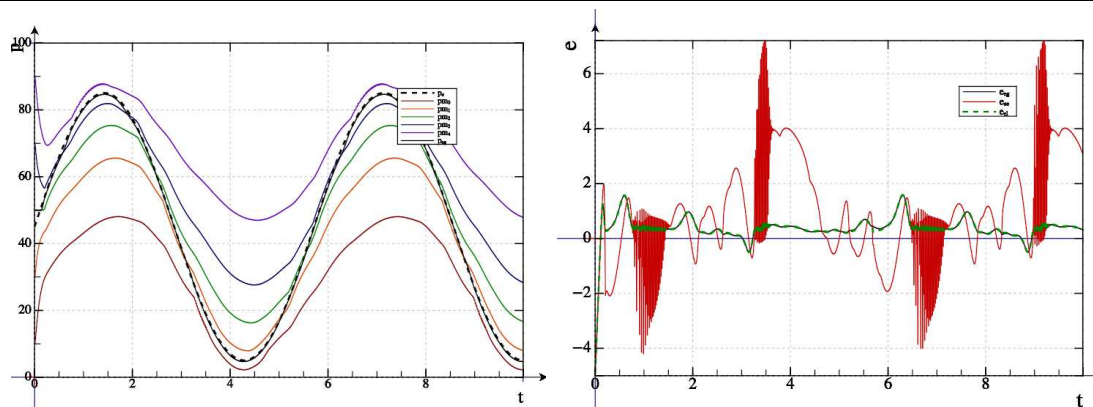
1. $f_c = -k_c (p_c - p_{c,0})$ – return force to model starting point;
2. $f_n = k_n (p_r - 2p_c + p_l)$ – force due to displacement from neighbour model;
3. $f_e = -k_e (p_c - p_e)$ – force caused by displacement from locally estimated extremum point (6).

Total force $f_t = f_c + f_n + f_e$ may lead to model movement by different ways. In this paper the viscous approach is used:

$$\frac{dp}{dt} = v_f f_t(p) \quad (9)$$

The simulation results are shown in fig. 5 and 6. Used parameters: $k_c = 1$, $k_n = 1$, $k_e = 5$, $v_f = 2$.

The simulation results shows, then this method shows best results among approaches under consideration. At least 2 models follows the object parameter, that gives good accuracy. Other models moved to extremum too, but continues to watch working range.



Р.В. Кирия, Ю.В. Бабенко

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ ПОДЗЕМНОГО КОНВЕЙЕРНОГО ТРАНСПОРТА УГОЛЬНЫХ ШАХТ

Аннотация. Система управления конвейерным транспортом представлена как двухуровневая иерархическая система, на первом уровне которой оператор задает определенные параметры для нижнего уровня управления. Глобальным критерием эффективности этой системы является комплексная величина, характеризующая энергоэффективность транспортирования горной массы, а локальными критериями являются минимальные значения средних объемов груза в аккумулирующих бункерах системы подземного конвейерного транспорта. Разработан алгоритм адаптивного управления аккумулирующими бункерами и системой подземного конвейерного транспорта.

Ключевые слова: системы подземного конвейерного транспорта, адаптивное управление, иерархическая система, критерий эффективности, аккумулирующие бункеры, алгоритм управления.

Основной задачей управления конвейерным транспортом угольных шахт является обеспечение ее максимальной пропускной способности при минимальных энергозатратах на транспортирование горной массы.

Система подземного конвейерного транспорта угольных шахт имеет сложную разветвленную структуру, состоящую из конвейеров и бункеров, связанных между собой с помощью питателей и перегрузочных узлов.

Отказы конвейеров приводят к простоям лав и, как следствие, к снижению производительности системы конвейерного транспорта.

Для повышения пропускной способности системы подземного конвейерного транспорта на угольных шахтах широкое применение получили аккумулирующие бункера (временное резервирование) [1, 2].

Аккумулирующие бункеры позволяют за счет накопления некоторого количества груза в бункере во время простоя конвейеров увеличить пропускную способность системы подземного конвейерного транспорта.

Однако, эффективность функционирования системы подземного конвейерного транспорта угольных шахт с бункерами невысокая. Это связано с частыми простоями конвейерных линий из-за переполнения бункеров, а также с потерями электроэнергии из-за недогрузки конвейеров.

Одним из методов повышения эффективности работы системы подземного конвейерного транспорта угольных шахт является управление аккумулярующими бункерами с помощью контроллеров и регулирования скорости ленты конвейеров с помощью частотно-управляемых электродвигателей.

При этом в аккумулярующих бункерах с помощью управления скоростью питателей поддерживается заданное количество груза в бункере, в частности, включение питателей при достижении заданных максимальных объемов груза в бункерах V_{2i} и отключение питателей при достижении минимальных объемов груза в бункерах V_{1i} (рис. 1). В этом случае поступающие в бункеры грузопотоки не выключаются и их величины должны быть меньше производительностей питателей. Этот режим работы бункеров позволяет не отключать надбункерные конвейерные линии из-за переполнения бункеров, что существенно снижает простои конвейеров из-за их недогрузки [3, 4].

На рис. 1 V_1 и V_2 – объемы минимального и максимального уровней груза в аккумулярующем бункере; $V_{\max}$ – максимальный объем бункера; Q_s – производительность поступающего в бункер грузопотока; Q_n – производительность питателя; h – высота щели выпускного отверстия бункера.

Однако локальное управление каждым аккумулярующим бункером еще недостаточно для существенного повышения эффективности работы системы подземного конвейерного транспорта угольных шахт. Для этого необходимо согласовать управление каждым бункером с управлением всей системой конвейерного транспорта. При этом должна обеспечиваться максимальная эффективность работы системы конвейерного транспорта. Т.е. эта система управления должна обес-

печивать максимальную пропускную способность и минимальные затраты на транспортирование горной массы.

Поэтому создание алгоритма управления системой подземного конвейерного транспорта угольных шахт является актуальной задачей.

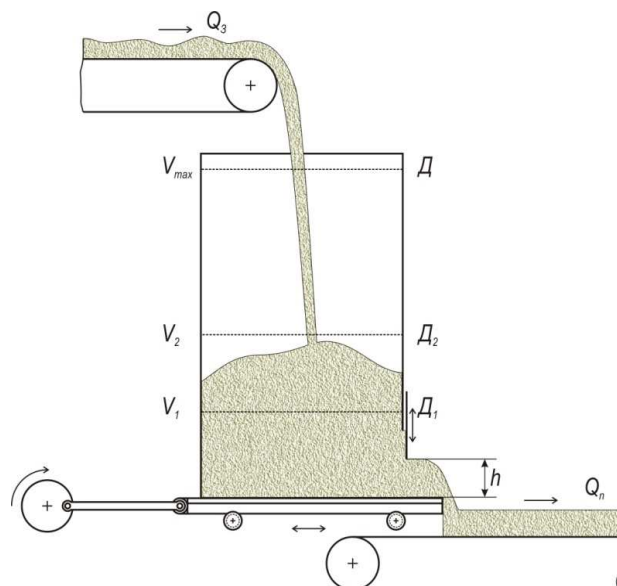


Рисунок 1 - Управление аккумулялирующим бункером в режиме поддержания заданного уровня груза в нем

Управление системой подземного конвейерного транспорта угольных шахт можно представить как двухуровневую иерархическую систему. На верхнем уровне этой системы оператор, исходя из текущей информации о поступающих из забоев грузопотоках угля m_{Qi} , состоянии конвейеров и технологического оборудования системы подземного конвейерного транспорта, определяет скорости конвейеров v_{li} и производительностей питателей Q_{ni} . Затем передает эту информацию, т.е. значения v_{li} и Q_{ni} , на нижний уровень системы управления бункерами – на контроллеры, которые определяют максимальные объемы груза в бункерах V_{2i} (рис. 2).

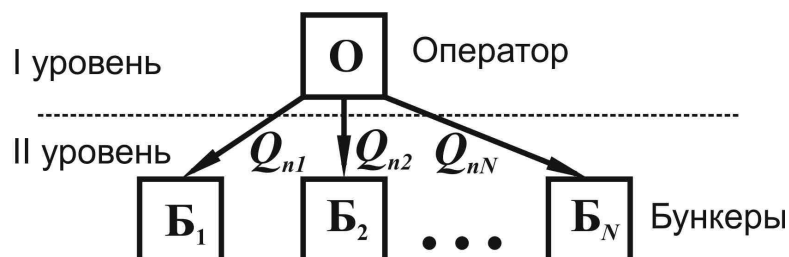


Рисунок 2 - Структурная схема управления системы конвейерного транспорта с бункерами

Входными переменными системы управления подземным конвейерным транспортом являются средние значения грузопотоков, поступающих из лав m_{Qi} .

А выходными переменными этой системы управления является среднее значение пропускной способности m_c и среднее значение энергоемкости транспортирования w_c системы подземного конвейерного транспорта угольных шахт [5].

Глобальной функцией цели, т.е. критерием эффективности этой двухуровневой системы управления является комплексная величина [6]

$$K = c_1 m_c - 60 c_2 w_c (\text{грн./мин}), \quad (1)$$

где c_1 – стоимость единицы массы угля, грн./т; c_2 – стоимость единицы электроэнергии, грн./кВт.

Законом управления системой подземного конвейерного транспорта является зависимость m_c и w_c от входных фазовых и управляемых параметров, а также от параметров конвейеров, объемов аккумулирующих бункеров и скоростей питателей [5]:

$$m_c = f_m(m_{Qi}, \lambda_i, \mu_i, Q_{ni}, V_i, V_{1i}, V_{2i}); \quad (2)$$

$$w_c = f_w(m_{Qi}, \lambda_i, \mu_i, Q_{ni}, V_i, V_{1i}, V_{2i}, N_i), \quad (3)$$

где λ_i, μ_i – параметры потока отказов и восстановления конвейеров, мин⁻¹; V_i – объемы аккумулирующих бункеров, м³; N_i – мощности, потребляемые приводами конвейеров, кВт.

Вид этих функций зависит от структуры системы подземного конвейерного транспорта, режима работы аккумулирующих бункеров, в частности, режима поддержания заданного уровня груза в бункере, параметров поступающих из лав грузопотоков m_{Qi} , надежности конвейеров – параметров потока отказов и восстановления λ_i, μ_i , производительностей питателей Q_{ni} , объемов бункеров V_i , а также максимального и минимального объемов груза в аккумулирующих бункерах V_{1i} и V_{2i} соответственно. Для их определения необходимо разработать алгоритм вычисления средней пропускной способности m_c и средней энергоемкости транспортирования w_c системы конвейерного транспорта в случае управления аккумулирующими бункерами в режиме поддержания заданного объема груза в них.

Управляемыми параметрами системы подземного конвейерного транспорта угольных шахт являются производительности питателей Q_{ni} и максимальные объемы грузов в бункерах V_{2i} в случае управления бункерами в режиме поддержания заданного объема груза в них.

Структурный анализ систем подземного конвейерного транспорта угольных шахт показали, что они имеют самоподобную древовидную структуру [7].

В работе [5] был получен алгоритм вычисления m_c и w_c для систем подземного конвейерного транспорта с самоподобной древовидной структурой (рис. 3) в режиме поддержания заданного уровня в бункере.

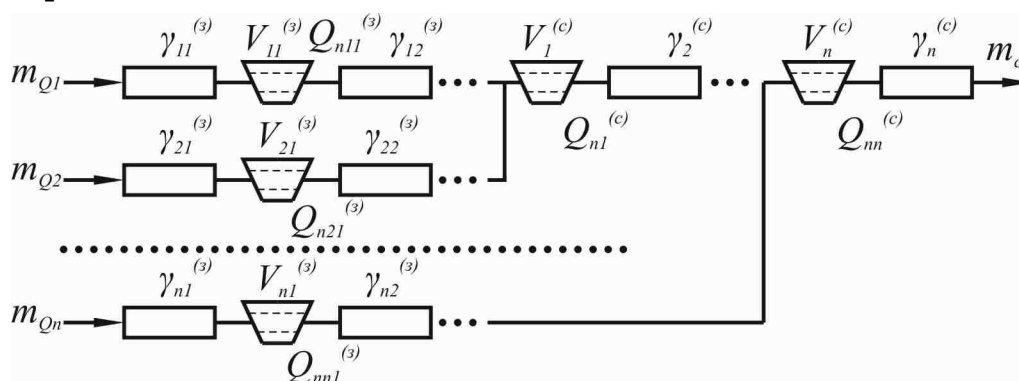


Рисунок 3 - Расчетная схема самоподобной древовидной структуры соединения бункеров

На рис. 3 $\gamma_i^{(c)}, \gamma_{ij}^{(3)}$ – коэффициенты аварийности стволового и забойных путей конвейерных линий системы конвейерного транспорта; $V_i^{(c)}, V_{ij}^{(3)}$ – объемы аккумулирующих бункеров стволового и забойных путей, m^3 ; $Q_{ni}^{(c)}, Q_{nij}^{(3)}$ – производительности питателей бункеров стволового и забойных путей, т/мин.

Этот алгоритм представляет собой рекуррентное соотношение.

Средняя пропускная способность в случае системы конвейерного транспорта, показанного на рис. 3, определяется по формуле

$$m_c = m_{c_n}, \quad (4)$$

где

$$m_{c_i} = \left(1 - \frac{\gamma_{i+1}^{(c)}}{1 + \gamma_{i+1}^{(c)}} e^{-\frac{\rho \Delta V_i^{(c)}}{m_i^{(s)}} \mu_i} \right) m_i^{(s)}, \quad (5)$$

$$\gamma_{\partial_i}^{(c)} = \frac{\sum_{k=1}^i m_{Q_k}}{m_i^{(s)}} - 1; \quad m_i^{(s)} = m_{c_{i-1}} + \frac{m_{Q_i}}{1 + \gamma_{\partial_i}^{(3)}}; \quad m_{c0} = 0; \quad \Delta V_i^{(c)} = V_i^{(c)} - V_{2i}^{(c)};$$

($\mu_i = \mu_c$; $i = 1, n$; $m_i^{(s)} < Q_{n_i}$).

Здесь $\gamma_i^{(c)}$ – коэффициенты аварийности конвейеров стволового пути, определяемые по формулам: $\gamma_i^{(c)} = \lambda_i^{(c)} / \mu_i^{(c)}$, где $\lambda_i^{(c)}, \mu_i^{(c)}$ – параметры потоков отказов и восстановлений конвейерных линий стволового пути, мин⁻¹; $\gamma_{\partial_i}^{(c)}$ – эквивалентные коэффициенты аварийности стволовых путей с бункерами; $\gamma_{\partial_i}^{(s)}$ – эквивалентные коэффициенты аварийности забойных путей с бункерами; $m_i^{(s)}$ – средние значения грузопотоков, поступающих в аккумулярующие бункеры стволового пути, т/мин; ρ – объемная масса транспортируемого груза, т/м³.

Эффективные коэффициенты аварийности забойных путей с бункерами определяются по формулам:

$$\gamma_{\partial_i}^{(s)} = \frac{m_{Q_i}}{m_{c_i}^{(s)}} - 1, \quad (\gamma_{\partial_1}^{(c)} = \gamma_{\partial_1}^{(s)}, i = 1, n), \quad (6)$$

где $m_{c_i}^{(s)}$ – средняя пропускная способность i -го забойного пути системы конвейерного транспорта с последовательным соединением бункеров забойных путей [5].

Средняя энергоёмкость транспортирования в этом случае определяется по формулам

$$w_c = w_n^{(s)}, \quad (7)$$

где

$$w_i^{(s)} = \frac{w_{i-1}^{(s)}}{1 + \gamma_{\partial_{i-1}}^{(c)}} + w_{i+1}^{(c)} + w_{i+1}^{(s)}, \quad (i=1, n), \quad (8)$$

$$\gamma_{\partial_{i-1}}^{(c)} = \frac{m_i^{(s)}}{m_{c_i}} - 1; \quad m_i^{(s)} = m_{c_{i-1}} + \frac{m_{Q_i}}{1 + \gamma_{\partial_i}^{(s)}}; \quad \gamma_{\partial_i}^{(s)} = \frac{m_{Q_i}}{m_{c_i}} - 1 \quad (w_0^{(s)} = w_1^{(s)};$$

$$w_i^{(c)} = N_i^{(c)}).$$

Здесь $w_i^{(s)}$ – мощность электроэнергии, потребляемой системой конвейерного транспорта на транспортирование горной массы на участке до $i+1$ бункера стволовой линии; $w_i^{(c)}$ – мощность электроэнергии, потребляемая i -м конвейером стволовой линии на транспортирование горной массы; $w_i^{(s)}$ – мощность электроэнергии, потребляемая i -ой забойной линией на транспортирование горной массы; $\gamma_{\partial_i}^{(s)}$ – эквивалентный коэффициент аварийности i -ой забойной конвейерной

линии; $N_i^{(c)}$ – мощность привода i -го конвейера стволовой конвейерной линии, идущая на транспортирование горной массы, кВт; m_{Q_i} – средняя производительность i -го забоя, т/мин.

Кроме того, $w_i^{(s)}$ для каждой забойной конвейерной линии определяется согласно рекуррентным соотношениям, полученным для последовательного соединения конвейеров и бункера [5].

В случае последовательного соединения бункеров и конвейеров в формулах (4)–(8) необходимо положить $m_{Q1} = m_Q$; $\gamma_{s_1}^{(s)} = \gamma_1^{(c)}$; $w_1^{(s)} = w_1^{(c)}$; $m_{Q_i} = 0$; $m_{c_{i-1}}^{(s)} = m_{c_{i-1}}$; $\gamma_{s_i}^{(s)} = 0$; $w_i^{(s)} = 0$ ($i = 2, \dots, n$).

Управляемыми параметрами системы подземного конвейерного транспорта угольных шахт является производительности питателей Q_{ni} , которые задаются оператором на верхнем уровне управления и максимальные объемы груза в бункерах V_{2i} , которые вычисляются контроллерами в подсистемах управления аккумулярующими бункерами в случае управления ими в режиме поддержания заданного объема груза в них.

Поэтому для управления аккумулярующими бункерами системы подземного конвейерного транспорта угольных шахт необходимо знать зависимости V_{2i} от производительности питателей Q_{ni} .

В работе [4] была решена задача определения оптимального среднего значения объема груза в аккумулярующем бункере, работающем в режиме поддержания заданного уровня груза в бункере.

При этом оптимальные средние значения объемов груза в аккумулярующих бункерах V_{imin} равны полусумме максимальных и минимальных заданных значений объемов груза в бункере, т.е.

$$V_{imin} = \frac{V_{1i} + V_{2i}}{2} + \frac{\lambda_i}{(\lambda_i + \mu_i)\mu_i} \cdot \frac{m_i^{(s)}}{2\rho}, \quad (9)$$

где V_{1i} , V_{2i} – минимальные и максимальные значения объемов груза в аккумулярующих бункерах.

Следовательно, локальные функции цели подсистемы управления бункерами является среднее значение груза в аккумулярующем бункере. Поэтому средние значения груза в аккумулярующих бункерах V_{ci} должны стремиться к средним минимальным значениям объемов груза в бункерах V_{imin} , т.е.

$$V_{ci} \rightarrow V_{imin}. \quad (10)$$

С другой стороны, согласно работе [4], средние значения объемов груза в аккумулирующих бункерах, работающих в режиме поддержания заданного объема груза в бункерах, определяются по формуле

$$V_{ci} = \frac{V_{1i}t_{zi} + V'_{2i}t_{pi}}{t_{zi} + t_{pi}} + \frac{m_i^{(s)}t_{zi}^2 - (Q_{ni} - m_i^{(s)})t_{pi}^2}{2\rho(t_{zi} + t_{pi})}, \quad (11)$$

где $V'_{2i} = V_{2i} + \frac{\lambda_{i+1}}{\lambda_{i+1} + \mu_{i+1}} \frac{Q_{ni}}{\gamma} t_{pi}$; λ_i, μ_i – параметры потоков отказов и восстановлений надбункерных конвейерных линий, мин^{-1} ; λ_{i+1}, μ_{i+1} – параметры потоков отказов и восстановлений подбункерных конвейерных линий, мин^{-1} .

Здесь t_{zi} , t_{pi} – средние времена загрузки и разгрузки в бункерах, определяемые по формулам

$$t_{zi} = \frac{\rho(V_{2i} - V_{1i})}{m_i^{(s)}} + \frac{\lambda_i}{(\lambda_i + \mu_i)\mu_i}, \quad (12)$$

$$t_{pi} = \frac{\rho(V_{2i} - V_{1i})}{(\bar{Q}_{ni} - m_i^{(s)})} + \frac{\lambda_i}{(\lambda_i + \mu_i)\mu_i} \cdot \frac{Q_{ni}m_i^{(s)}}{(\bar{Q}_{ni} - m_i^{(s)})(Q_{ni} - m_i^{(s)})}, \quad (13)$$

где $\bar{Q}_{ni} = \frac{\mu_{i+1}}{\lambda_{i+1} + \mu_{i+1}} Q_{ni}$.

Приравнявая средние значения объема груза в бункерах V_{ci} к минимальным значениям объемов V_{cimin} , получим уравнение относительно неизвестных максимальных значений заданных объемов груза в бункерах V_{2i} , при котором средний объем груза в бункерах принимают минимальные значения. В результате, согласно (11), получим уравнение относительно V_{2i} :

$$\frac{V_{1i}t_{zi} + V'_{2i}t_{pi}}{t_{zi} + t_{pi}} + \frac{m_i^{(s)}t_{zi}^2 - (Q_{ni} - m_i^{(s)})t_{pi}^2}{2\rho(t_{zi} + t_{pi})} = \frac{V_{1i} + V_{2i}}{2} + \frac{\lambda_i}{(\lambda_i + \mu_i)\mu_i} \cdot \frac{m_i^{(s)}}{2\rho}. \quad (14)$$

В полученном уравнении (14), согласно (12) и (13), t_{zi} и t_{pi} являются функциями от V_{2i} . Кроме того, $m_i^{(s)}$ определяется по сложным рекуррентным соотношениям (см. (5), [5]).

Поэтому определение V_{2i} из уравнения (14) представляет собой сложную математическую задачу.

Для упрощения задачи определения заданного максимального объема груза в аккумулирующих бункерах можно с помощью весов

определить величины грузопотоков, поступающих в аккумулирующие бункера $m_i^{(s)}$. Однако это требует больших материальных затрат.

Поэтому, для урегулирования груза в бункере с помощью контроллера применяется алгоритм адаптивного управления [3].

В этом случае для определения $m_i^{(s)}$ сначала с помощью датчиков времени определяются текущие времена загрузки T_{zi} и разгрузки T_{pi} в аккумулирующих бункерах системы конвейерного транспорта в период остановки и работы питателя, соответственно.

Подставив в равенство (12) вместо t_{zi} значение T_{zi} , из полученного выражения определим средние значения поступающих в аккумулирующие бункеры грузопотоков по формуле:

$$m_i^{(s)} = \frac{\rho(V_{2i} - V_{1i})}{T_{zi} - \frac{\lambda_i}{(\lambda_i + \mu_i)\mu_i}}. \quad (15)$$

Значение выражения, стоящего в знаменателе правой части равенства (15), можно выразить через m_{Qi} и $m_i^{(s)}$ по формуле [5]:

$$\frac{\lambda_i}{(\lambda_i + \mu_i)\mu_i} = \frac{1}{\mu_c} \left(1 - \frac{m_i^{(s)}}{\sum_1^i m_{Qi}} \right), \quad (16)$$

где $\mu_c = \mu_i$.

Подставляя (16) в (15), получим

$$m_i^{(s)} = \frac{\rho(V_{2i} - V_{1i})}{T_{zi} - \left(1 - m_i^{(s)} / \sum_1^i m_{Qi} \right) \frac{1}{\mu_c}}. \quad (17)$$

Определим из последнего равенства $m_i^{(s)}$, в результате получим:

$$m_i^{(s)} = \frac{\sqrt{(\mu_c T_{zi} - 1)^2 m_{\varepsilon i}^2 + 2\rho(V_{2i} - V_{1i})\mu_c m_{\varepsilon i}} - (\mu_c T_{zi} - 1)m_{\varepsilon i}}{2}, \quad (18)$$

где $m_{\varepsilon i} = \sum_1^i m_{Qi}$ ($m_{\varepsilon i} = m_Q$ – при последовательном соединении бункеров).

Для определения средних значений грузопотоков $\bar{Q}_{ni}$, разгружаемых из аккумулирующих бункеров, подставим в равенство (13) с

учетом (16) вместо t_{pi} значение T_{pi} . В результате после преобразования получим

$$\bar{Q}_{ni} = m_i^{(s)} + \frac{\rho(V_{2i} - V_{1i}) + \frac{1}{\mu_c} \left(1 - \frac{m_i^{(s)}}{m_{\varepsilon i}}\right) \cdot \frac{Q_{ni} m_i^{(s)}}{(Q_{ni} - m_i^{(s)})}}{T_{pi}} \quad (19)$$

Следовательно, зная время загрузки T_{zi} и разгрузки T_{pi} аккумулярующих бункеров, средние значения поступающих из лав грузопотоков m_{Qi} , а также заданные значения минимальных V_{1i} и максимальных V_{2i} объемов груза в аккумулярующих бункерах системы конвейерного транспорта угольных шахт, можно определить по формулам (18) и (19) средние значения поступающих в бункера грузопотоков $m_i^{(s)}$ и средние значения разгружаемых из бункеров грузопотоков $\bar{Q}_{ni}$.

Для определения максимальных объемов груза в аккумулярующих бункерах V_{2i} , работающих в режиме поддержания заданного объема груза в них, при которых средние объемы груза в бункерах V_{ci} принимают минимальные значения, подставим в равенство (14) вместо t_{zi} и t_{pi} значения T_{zi} и T_{pi} соответственно. В результате получим уравнение относительно неизвестных максимальных объемов груза в бункерах V_{2i} :

$$\begin{aligned} \frac{V_{1i} T_{zi} + V_{2i} T_{pi}}{T_{zi} + T_{pi}} + \frac{m_i^{(s)} T_{zi}^2 - (Q_{ni} - m_i^{(s)}) T_{pi}^2}{2\rho(T_{zi} + T_{pi})} + \frac{(Q_{ni} - \bar{Q}_{ni})}{\rho} \frac{T_{zi}^2}{T_{zi} + T_{pi}} = \\ = \frac{V_{1i} + V_{2i}}{2} + \left(1 - \frac{m_i^{(s)}}{m_{\varepsilon i}}\right) \cdot \frac{1}{\mu_c} \cdot \frac{m_i^{(s)}}{2\rho}. \end{aligned} \quad (20)$$

В полученном уравнении (20) значения $m_i^{(s)}$ и $\bar{Q}_{ni}$ определяются по формулам (18) и (19).

Наиболее простым и эффективным методом решения уравнения (20) является метод дихотомии (деления пополам) или метод зондирования. При этом неизвестный параметр V_{2i} изменяется в пределах $V_{1i} \leq V_{2i} \leq V_i$.

Следовательно, при заданных значениях грузопотоков, поступающих из лав, m_{Qi} , производительностей питателей Q_{ni} , объемов аккумуляющих бункеров V_i и минимальных значениях объемов гру-

зов в них V_{1i} , а также текущих значениях времени загрузки T_{zi} и разгрузки T_{pi} аккумулярующих бункеров системы конвейерного транспорта угольных шахт из уравнения (20) можно найти значения максимальных объемов груза V_{2i}^* , при которых средние объемы груза в бункерах V_{ci} принимают минимальные значения, равные

$$V_{ci} \rightarrow V_{i\min} = \frac{V_{1i} + V_{2i}^*}{2} + \left(1 - \frac{m_i^{(s)}}{m_{\varepsilon i}}\right) \cdot \frac{1}{\mu_c} \cdot \frac{m_i^{(s)}}{2\rho}. \quad (21)$$

Отсюда алгоритм адаптивного управления системы подземного конвейерного транспорта угольных шахт можно представить в следующем виде.

1. Генерирование альтернатив.

Для этого по заданным средним значениям величин грузопотоков, поступающих их лав, m_{Qi} и структуре системы подземного конвейерного транспорта определяются несколько альтернативных вариантов скоростей конвейеров v_{li} и производительностей питателей Q_{ni} . При этом должны выполняться условия (ограничения)

$$\sum_1^i m_{Qi} < Q_{ni} \leq Q_{mi}, \quad (i = 1, \dots, n), \quad (22)$$

где Q_{mi} – максимальные производительности подбункерных конвейерных линий системы конвейерного транспорта, т/мин.

Кроме того, для аккумулярующих бункеров, работающих в режиме поддержания заданного объема груза в них, должны выполняться ограничения:

$$\begin{aligned} m_i^{(s)} &< Q_{ni}; \\ V_{1i} &< V_{2i} < V_i, \quad (i = 1, \dots, n). \end{aligned} \quad (23)$$

2. Оценка средних значений грузопотоков, загружаемых в бункера и выгружаемых из них.

Для этого с помощью датчиков времени в периодах загрузки и разгрузки аккумулярующих бункеров определяются значения времен загрузки T_{zi} и времен разгрузки T_{pi} бункеров. По этим значениям T_{zi} и T_{pi} согласно формул (18) и (19) определяются оценки средних значений грузопотоков $m_i^{(s)}$, поступающих в бункера, и средних значений грузопотоков $\bar{Q}_{ni}$, разгружаемых из бункеров.

3. Определение максимальных заданных объемов груза в аккумулялирующих бункерах.

Для этого по полученным значениям оценок $m_i^{(s)}$ и $\bar{Q}_{ni}$ из уравнения (20) определяются максимальные значения объемов груза в аккумулялирующих бункерах V_{2i}^* , при которых средние объемы груза в бункерах V_{ci} , работающих в режиме поддержания заданного уровня груза в них, принимают минимальные значения.

4. Определение критериев эффективности и функции цели.

Для этого по вычисленным значениям V_{2i}^* согласно рекуррентным формулам (4)–(8) определяются пропускная способность m_c и энергоёмкость w_c всей системы конвейерного транспорта.

По полученным значениям m_c и w_c согласно формуле (1) определяется функция цели K .

5. Повторяя этот процесс для различных альтернатив, т.е. определяя функции цели K_s для различных вариантов производительностей питателей $Q_{ni}^{(s)}$, выбирают из полученных функций цели K_s минимальное значение $K_{\min}$, т.е.

$$K_{\min} = \min_{1 \leq s \leq N} \{K_s\},$$

где N – число альтернатив.

Значения производительностей питателей Q_{ni} и максимальных объемов груза в аккумулялирующих бункерах V_{2i} , соответствующие этому минимальному критерию эффективности $K = K_{\min}$, являются оптимальными.

В случае изменения структурной схемы подземного конвейерного транспорта, связанного с продвижением лав или изменением их количества, а также с изменением величин средних грузопотоков, поступающих из лав m_{Qi} , оптимальные значения Q_{ni} и V_{2i} , при которых критерий эффективности K принимает минимальное значение, определяются заново по выше приведенному алгоритму.

Расчеты показали, что энергетическая эффективность транспортирования горной массы, т.е. критерий эффективности K системы подземного конвейерного транспорта угольных шахт при оптимальных значениях Q_{ni} и V_{2i} , полученных на основе разработанного алгоритма, увеличивается до 30 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черкесов Г. Н. Надежность технических систем с временной избыточностью / Г. Н. Черкесов. – М.: Советское радио, 1974. – 296 с.
2. Системы подземного транспорта на угольных шахтах / В. А. Пономаренко, Е. Л. Креймер, Г. А. Дунаев [и др.]. – М.: Недра, 1975. – 309 с.
3. Кирия Р. В. Управление бункерами, работающими в системах конвейерного транспорта угольных шахт / Р. В. Кирия, В. Ю. Максютенко, Д. Д. Брагинец // Збірник наукових праць НГУ. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2012. – № 37. – С. 230–236.
4. Кирия Р. В. Математическая модель функционирования аккумулирующего бункера в режиме поддержания в нем объема груза в заданных пределах / Р. В. Кирия, Т. Ф. Мищенко, Ю. В. Бабенко // Наукові вісті «Сучасні проблеми металургії». – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2012. – № 15. – С. 85–96.
5. Кирия Р. В. Определение критерия эффективности системы подземного конвейерного транспорта угольных шахт в режиме поддержания заданного уровня груза в аккумулирующих бункерах / Р. В. Кирия, Т. Ф. Мищенко, Ю. В. Бабенко // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 1'(90). – Дніпропетровськ, 2014. – С. 135–141.
6. Моисеев Н. Н. Математические задачи системного анализа / Н. Н. Моисеев. – М.: Наука, 1981. – 488 с.
7. Кирия Р. В. Математические модели функционирования систем конвейерного транспорта угольных шахт / Р. В. Кирия, Т. Ф. Мищенко, Ю. В. Бабенко // Системні технології: Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Дніпропетровськ, 2014. – Випуск 1. – С. 146–158.

ОПТИМИЗАЦИЯ ТОПОЛОГИИ СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ И ИХ УСТОЙЧИВОСТЬ

Аннотация. В статье рассмотрена задача полуопределенной оптимизации топологии стержневых конструкций и проблема общей устойчивости, которая, строго говоря,

с точки зрения математического программирования является невыпуклой задачей, и поэтому рассматривается в отдельном контексте.

Ключевые слова: топология, оптимизация, устойчивость, матрица жесткости.

Введение

Рациональная конструктивная схема, лежащая в основе стержневой системы, определяет, с одной стороны, соответствие техническим и эксплуатационным требованиям, а с другой – экономическую целесообразность и эффективность проекта. Согласно [1], до 73% стоимости конструкции составляют затраты на материалы, поэтому оптимальный расход последних является одним из важнейших пунктов при проектировании. Основу же оптимального проектирования стержневых систем составляет обширное семейство математических методов оптимизации – как аналитических, так и численных.

Так, в [2] авторы решают задачи оптимизации стержневых систем, пластин и оболочек, используя генетические алгоритмы. При этом учитываются такие свойства, как геометрическая неизменяемость системы, жесткость, прочность. В [3] оптимизация стержневой конструкции рассматривается как задача линейного программирования, а в [4, 5] – как задача выпуклого программирования. Все эти публикации объединяет то, что проблема общей устойчивости системы либо не рассматривается вообще, либо рассматривается в недостаточной мере. В [6] ограничение по устойчивости анализируется более подробно, при этом учитывается тот факт, что оценка устойчивости выходит за рамки выпуклой оптимизации, так как сами по себе алгоритмы проверки устойчивости приводят к функциям, которые не яв-

ляются выпуклыми, что нарушает общий подход к решению задачи и поиску оптимального в глобальном смысле решения. В свете сказанного представляется важным рассмотреть проблему выпуклой оптимизации топологии и определения устойчивости стержневой системы как две составляющие одной задачи.

Проблема устойчивости стержневой системы

На практике для стержней большой гибкости решение означенной проблемы состоит, как правило, в использовании формулы Эйлера:

$$\sigma_{crit} = \frac{\pi^2 EJ}{(\mu L)^2 A} = \frac{\pi^2 E}{s^2}, \quad (1)$$

где E – модуль Юнга, J – момент инерции сечения, L – длина стержня, A – площадь сечения, μ – коэффициент приведения длины, s – гибкость.

Для стержней со средней гибкостью (участок II на рис. 1) применяют формулу Ясинского:

$$\sigma_{crit} = a - bs, \quad (2)$$

где коэффициенты a и b подбираются из таблиц в зависимости от типа материала и сечения. Стержни малой гибкости (участок III на рис. 1) проверяют не на устойчивость, а на прочность, как при простом сжатии.

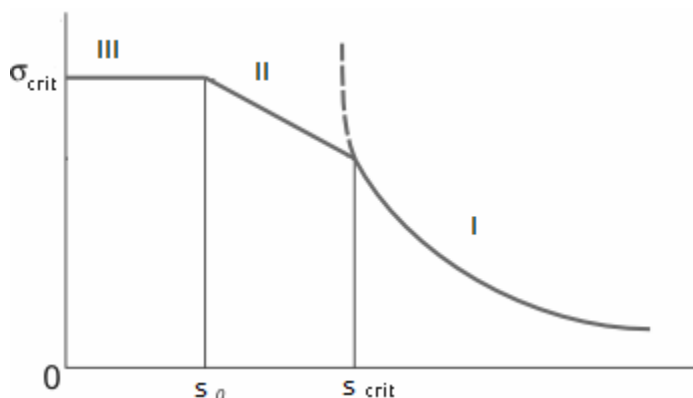


Рисунок 1 - Границы применимости формулы Эйлера (участок I)

Основная проблема при таком подходе состоит в поиске подходящего значения μ для каждого стержня в отдельности. Согласно [7], оно может колебаться в довольно значительных пределах, поэтому более рациональным представляется подход, основанный на применении метода конечных элементов.

Если каждый трехмерный стержень, который присутствует в конструкции, подчиняется классической теории Эйлера-Бернулли, то для него можно записать матрицу жесткости:

$$k = \begin{pmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{L^2} & 0 & \frac{-12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{L^2} \\ \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & \frac{-6EI_y}{L^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-12EI_y}{L^3} & 0 & \frac{-6EI_y}{L^2} & 0 \\ \frac{GI_x}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-GI_x}{L} & 0 & 0 \\ \frac{4EI_y}{L} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{2EI_y}{L} & 0 \\ \frac{4EI_z}{L} & 0 & \frac{-6EI_z}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_z}{L} \\ \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{-6EI_z}{L^2} \\ \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 \\ \frac{GI_x}{L} & 0 & 0 \\ \frac{4EI_y}{L} & 0 \\ \frac{4EI_z}{L} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

Sym.

где G - модуль сдвига, I_x - полярный момент, I_y , I_z - моменты инерции сечения.

Матрица жесткости, которая учитывает нелинейные эффекты, возникающие при воздействии силы f на стержень, называется геометрической и имеет такой вид:

$$k_g = f \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{6}{5L} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{10} & 0 & \frac{-6}{5L} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{10} \\ \frac{6}{5L} & 0 & \frac{-1}{10} & 0 & 0 & 0 & \frac{-6}{5L} & 0 & 0 & \frac{-1}{10} & 0 \\ \frac{I_y + I_z}{AL} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{I_y + I_z}{AL} & 0 & 0 \\ \frac{2L}{15} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{10} & 0 & 0 & \frac{-L}{30} & 0 \\ \frac{2L}{15} & 0 & \frac{-1}{10} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-L}{30} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{6}{5L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{10} \\ \frac{6}{5L} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{10} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{I_y + I_z}{AL} & 0 & 0 \\ \frac{2L}{15} & 0 \\ \frac{2L}{15} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Sym.

Касательная матрица жесткости стержня является суммой (3) и (4):

$$k_i = k + k_g. \quad (5)$$

Стоит отметить, что матрица (5) задана в локальных координатах стержня, поэтому понадобится их приведение к общей - глобальной - координатной сетке. Данная процедура осуществляется с помощью трансформационной матрицы [8]:

$$T = \begin{pmatrix} t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & t \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где t - матрица направляющих косинусов размером 3×3 . Она имеет следующий вид:

$$t = \begin{pmatrix} C_{Xx} & C_{Yx} & C_{Zx} \\ C_{Xy} & C_{Yy} & C_{Zy} \\ C_{Xz} & C_{Yz} & C_{Zz} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где нотация C_{Ab} представляет собой косинус угла между глобальной осью A и локальной осью b в трехмерном пространстве. С помощью (6) матрицу (5) можно трансформировать так:

$$K_i = T^T k_i T. \quad (8)$$

Таким образом для каждого стержня конструкции строится своя касательная матрица жесткости K_i . Из совокупности этих матриц с помощью специальной процедуры ("сборки") формируется касательная матрица жесткости конструкции K , которая, собственно, и используется для определения общей устойчивости. Для этого выполним LDL^T декомпозицию:

$$K = LDL^T, \quad (9)$$

где L - нижнетреугольная матрица, D - диагональная матрица. Тогда согласно [9] возможны такие ситуации:

1. $\forall i : D_{ii} > 0 \Rightarrow$ система находится в стабильном равновесии.
2. $\exists i : D_{ii} = 0 \Rightarrow$ система находится в безразличном равновесии.
3. $\exists i : D_{ii} < 0 \Rightarrow$ система находится в нестабильном равновесии.

С другой стороны, если $\det K = \prod D_{ii} < 0$, то система не находится в равновесном состоянии, т.е. неустойчива. Отсюда следует,

что, система будет устойчива при выполнении условия $D_{ii} > 0 \forall i$ (и, соответственно, $\det K > 0$).

Полуопределенная оптимизация топологии стержневой системы

Проблему оптимизации топологии стержневой конструкции можно записать в виде задачи полуопределенной оптимизации [4,6]:

$$\begin{aligned} & \text{minimize}_{W,v} W \\ & \text{s.t.} \sum_{i=1}^m v_i \leq V \\ & v_i \geq 0 \forall i = 1 \dots m \\ & \begin{pmatrix} W & F^T \\ F & \sum_{i=1}^m \frac{E_i v_i}{L_i^2} a_i a_i^T \end{pmatrix} \geq 0 \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь W представляет собой верхнюю оценку величины энергии упругой деформации стержневой системы; v_i - объемы стержней, количество которых равно m ; F - внешние силы, приложенные к n узлам конструкции; E - модули Юнга; L - длины стержней; a_i - i -й столбец матрицы уравнений системы A . Таким образом, оптимизационная задача сводится к поиску минимальной величины W при заданных ограничениях. Особую роль здесь играет переменная V - верхняя граница суммы объемов стержней, от которой, собственно, и зависит выполнение условий прочности и устойчивости. Если положить $V=1$, то решение представленной в таком виде задачи (10) позволяет определить топологию системы и получить соотношение между объемами стержней $v_1:v_2:\dots:v_m$. Тогда, итерационно увеличивая V , можно найти минимальный объем материала (и каждого стержня соответственно), при котором выполняются условия общей устойчивости и прочности. На рис. 2 представлена схема решения этой общей оптимизационной задачи.

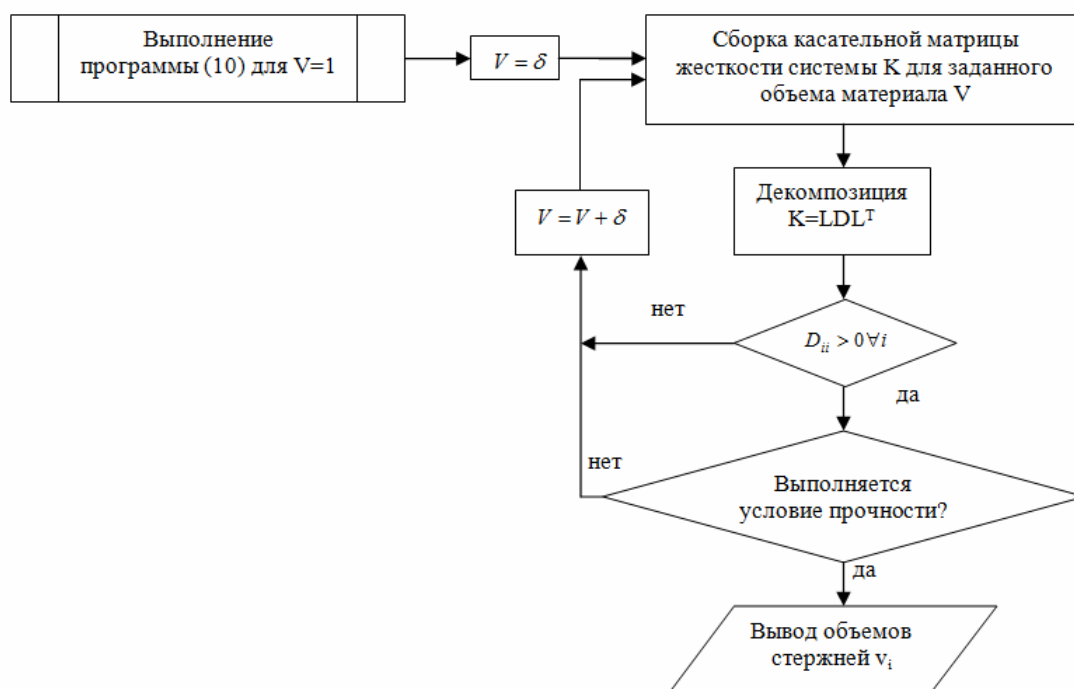


Рисунок 2 - Блок-схема решения общей оптимизационной задачи

Оптимальный дизайн фермы с учетом общей устойчивости

Рассмотрим конструкцию, полный граф которой изображен на рис.3. Узел 1 имеет шарнирно-неподвижную опору, узел 9 - шарнирно-подвижную. К узлам 4 и 8 приложены силы $|F|=10^5 \text{ Н}$.

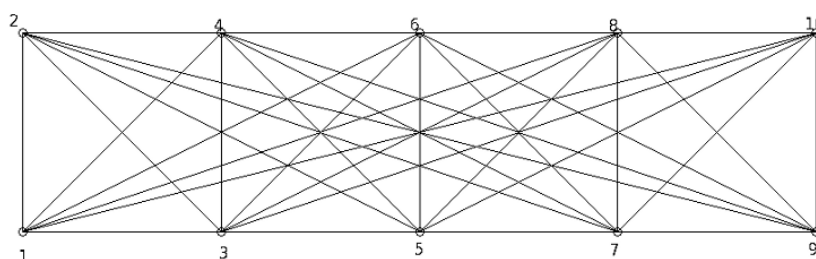


Рисунок 3 - Полный граф фермы

Таблица 1

Координаты вершин графа

Вершина	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ось X	0	0	3	3	6	6	9	9	12	12
Ось Y	0	3	0	3	0	3	0	3	0	3

В таблице 1 приведены координаты вершин. При расчете модуль Юнга был принят равным $2 \cdot 10^{11}$ Па, модуль сдвига $7.81 \cdot 10^{10}$ Па, расчетное сопротивление материала $2.1 \cdot 10^8$ Па, коэффициент условий работы 0.9. При этом использовалась сечение "труба" с соот-

ношением внутреннего и внешнего диаметров $d/D=0.95$. При решении полуопределенной оптимизационной задачи в среде Matlab R2010b с использованием пакета CVX была получена топология, изображенная на рис. 4. Диаметры труб приведены в таблице 2.

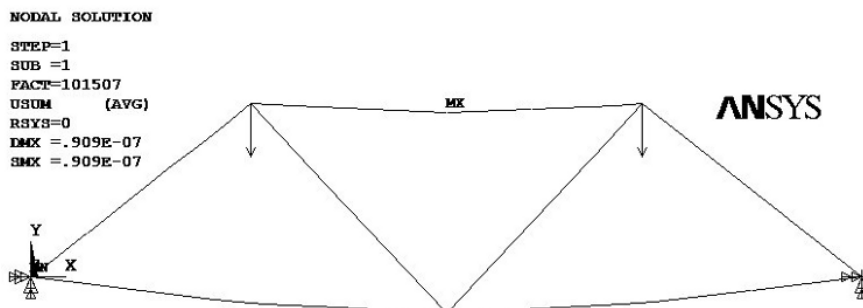


Рисунок 3 - Топология фермы

Таблица 2

Диаметры труб

Стержень	1-3	1-4	3-5	4-5	4-6	5-7	5-8	6-8	7-9	8-9
D, мм	123	146	123	98	116	123	98	116	123	146

Проверка полученной модели в программном комплексе ANSYS показала, что конструкция потеряет устойчивость, если в узлах 4 и 8 будут приложены силы больше чем 101507 Н; расчет же выполнялся, исходя из нагрузки в узлах в 100000Н. Таким образом, результаты решения оптимизационной задачи в Matlab хорошо согласуются с результатами проверки модели в ПК ANSYS.

Заключение

В статье рассмотрен вопрос поиска оптимальной топологии стержневой конструкции с использованием полуопределенной оптимизации. При этом преследовалась цель получить именно такое решение, которое бы отвечало условиям прочности и устойчивости. Для определения устойчивости вычислялась касательная матрица жесткости системы на основе полученного решения оптимизационной задачи с последующей LDL^T декомпозицией. Верификация результатов проводилась с использованием комплекса ANSYS.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беленя Е. И., Гениев А. Н., Балдин В. А. Металлические конструкции. – М.: Стройиздат, 1985.
2. Серпик И. Н., Алексейцев А. В., Лелетко А. А. Генетические алгоритмы оптимизации металлических строительных конструкций. – Брянск: Изд-во БГИТА, 2010.
3. Takada T. Multiobjective optimization of truss topology by linear/sequential linear programming method. Journal of Mechanical Engineering and Automation. – 2012. - Vol. 2. – P. 585-593.
4. Ben-Tal A., Nemirovski A. Robust truss topology design via semidefinite programming. SIAM Journal on optimization. – 1997. - Vol. 7, no. 4. - P. 991-1016.
5. Yonekura K., Kanno Y. Global optimization of robust truss topology via mixed integer semidefinite programming. Optimization and Engineering. – 2010. – Vol. 11, no. 3. – P. 355-379.
6. Ben-Tal A., Jarre F., Kocvara M., Nemirovsky A., Zowe J. Optimal design of trusses under a nonconvex buckling constraint. Optimization and Engineering. – 2000. – Vol. 1, no. 2. – P. 189-213.
7. Arbabi F. Structural Analysis and Behavior. - New York: McGraw-Hill, 1991.
8. Kattan P. Matlab Guide to Finite Elements. Springer, 2008.
9. Wriggers P. Nonlinear Finite Element Methods. Springer, 2008.

А.А. Омельчук, А.В. Рудакова

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА СПУСКА СУДНА НА ВОДУ С ПОМОЩЬЮ СЛИПА

Аннотация. В статье рассматривается анализ процессов спуска и подъема судов, осуществляемых с помощью сложной многоприводной системы типа слип. Аналитические зависимости для пространственного изменения параметров процесса спуска/подъема судна предлагается получать на основе использования функций принадлежности.

Ключевые слова: слип, аналитическая модель, спуск судна на воду, функции принадлежности, распределенные параметры.

Постановка проблемы. Из-за ряда объективных обстоятельств, многие отечественные судостроительные предприятия нуждаются в обновлении или ремонте подъемно-спусковых сооружений, в частотности – слипов. Внедрение современной компьютеризированной системы управления открывает возможность снизить аварийность и повысить надежность процесса спуска/подъема судна на воду с помощью слипа без проведения капитального ремонта и дорогостоящего переоснащения спускового сооружения.

Анализ публикаций по теме исследования. В многомашинных объектах, когда электроприводы связаны через общий распределенный объект управления (в системе спуска/подъема судов группа тележек с приводными двигателями и удерживающими тросами объединена общей нагрузкой – корпусом судна), возникают сложные задачи управления согласованным движением с целью обеспечения синхронного движения тележек и равномерной нагрузки на их приводы [1, 2].

В течение спуска или подъема судна с помощью слипа судно устанавливается на специальные, так называемые косяковые тележки, которые передвигаются по рельсовым путям, расположенным на наклонной плоскости под углом 6° – 10° . Каждая судовозная тележка приводится в движение отдельным электроприводом с помощью

стального троса. Тележки имеют возможность независимо друг от друга двигаться по рельсам вниз (вверх), при этом основной задачей при спуске/подъеме судна является согласованное движение судовозных тележек с заданной скоростью. В процессе спуска судна судовозная тележка движется по рельсам по наклонной плоскости в двухфазной среде. Процесс спуска судна можно условно разбить на несколько этапов (рис. 1): движение тележки с ускорением до необходимой постоянной режимной скорости спуска, $l \in [0, l_1]$; движения тележки с постоянной скоростью до входа в воду, $l \in [l_1, l_2]$; переход тележки с надводной части слипа на подводную часть, $l \in [l_2, l_3]$; полное погружение тележки под воду, $l \in [l_3, l_4]$; движение тележки с постоянной скоростью в воде до всплытия судна, $l \in [l_4, l_5]$; всплытие судна и торможение тележки до полной остановки, $l \in [l_5, l_6]$.

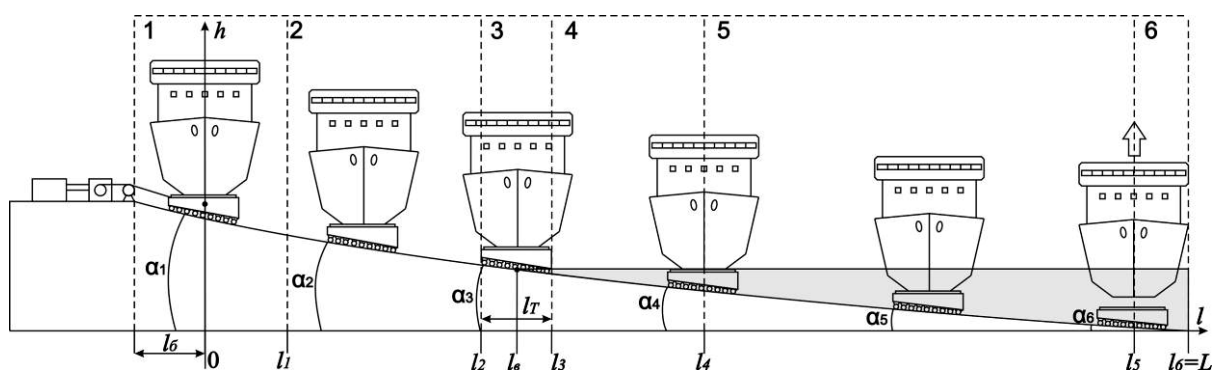


Рисунок 1 - Этапы спуска судна на воду с помощью слипа

Нештатные ситуации, возникающие при движении, связаны с нестабильностью нагрузки на электропривод. Во время движения в процессе спуска или подъема судна на сложный объект «судно-тележки» оказывают влияние группы случайных факторов [3]. Контроль параметров движения спусковой тележки (натяжения троса) должен осуществляться на протяжении всего пути $l \in [0, L]$. Основные силы, воздействующие на тележку на протяжении спуска, показаны на рис. 2.

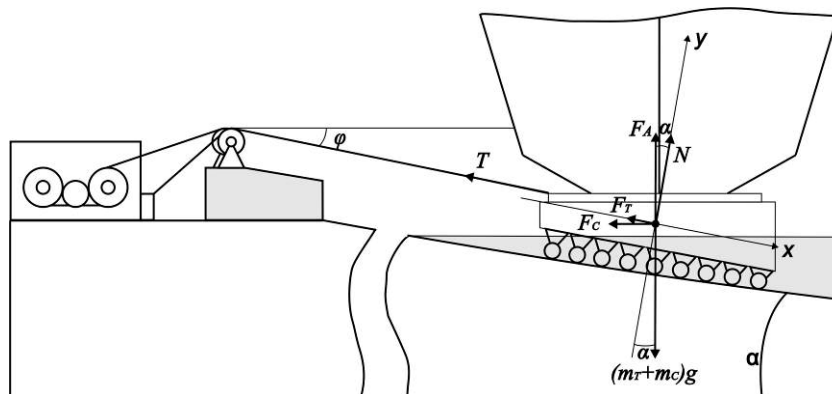


Рисунок 2 - Силы, воздействующие на тележку при спуске судна на воду

Исходя из соотношений, составленных на основе второго закона Ньютона, натяжение троса T можно выразить в виде [4]

$$T = \frac{((m_T + m_C)g - F_A) \cdot (\sin(\alpha) - \mu \cdot \cos(\alpha)) - F_C(\mu \cdot \sin(\alpha) + \cos(\alpha))}{\mu \cdot \sin(\phi - \alpha) - \cos(\phi - \alpha)}, (1)$$

где m_T – масса тележки; m_C – масса тележки; α – угол наклона слипа; T – натяжение троса; ϕ – угол наклона троса; F_T – сила трения; F_C – сила сопротивления воды; F_A – сила Архимеда; a – ускорение тележки; μ – коэффициент трения между колесами тележки и рельсами; N – сила реакции опоры.

Силы, действующие на тележку при движении в воде (сила Архимеда F_A и сила сопротивления со стороны воды F_C), определяются как

$$F_C = k_c \cdot S \frac{\rho v^2}{2}, \quad F_A = \rho g V_n, (2)$$

где k_c – коэффициент сопротивления судна и тележки (для центральных секций судна можно принять $k_c=1$); $S = S_C + S_T$ – характерная площадь поверхности судна и тележки; v – скорость движения тележки; ρ – плотность воды; $V_n = V_C + V_T$ – объем судна и тележки, погруженный в воду. Исследования показали [3], что наиболее существенными факторами, влияющими на величину натяжения троса, а, следовательно, и на нагрузку привода судовозной тележки, являются коэффициент трения и массогабаритные характеристики судна.

Таким образом, выражение для натяжения троса (1) можно представить в упрощенной форме как:

$$T(l) = ((m_T + m_C)g - F_A(l)) \cdot (\sin \alpha - \mu(l) \cdot \cos \alpha). \quad (3)$$

Постановка задачи. Целью исследований является получение аналитических зависимостей для параметров, которые характеризуют процесс спуска и подъема судна с помощью слипа. Данные параметры изменяются в процессе работы слипа и могут быть использованы для формирования динамической модели перемещения судна по наклонным путям слипа.

Основная часть. Для формирования динамической модели спуска судна необходимо описывать силы натяжения тросов в зависимости от положения (в любой точке пути $l \in [0, L]$) в виде непрерывной функции $T(l)$.

На изменение силы натяжения троса в системе «электропривод-тележка» на всем протяжении пути существенно влияют: коэффициент трения μ , характерная площадь поверхности судна и тележки S , объем судна и тележки, погруженный в воду V .

1. Коэффициент трения.

Коэффициент трения при движении по суше или в воде имеет постоянные значения. Однако, при заходе тележки в воду (зона 3, см. рис.1) он плавно изменяется (рис. 3,а).

2. Характерная площадь.

Характерная площадь S влияет на силу сопротивления воды, и становится тем больше, чем глубже судно погружается в воду, а значит, зависит от протяженности слипа l и точки всплытия судна l_5 . На рис. 3,б показана зависимость S от l .

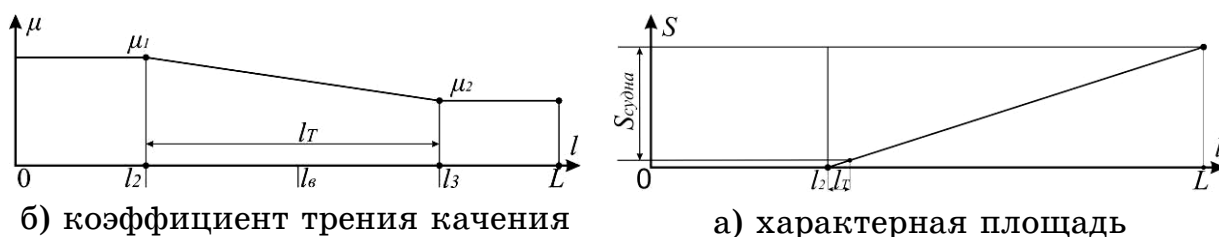


Рисунок 3 - Параметры погружения судовозной тележки в воду

3. Объем судна и тележки в воде.

На рис. 4,а показана секция судна и тележка при погружении под воду и зависимость общего погруженного объема V от l , где 1 – надводная часть судна, а 2 и 3 – это погруженная в воду часть судна и тележки соответственно. Зависимости V_T и V_C показаны на рис. 4,б.

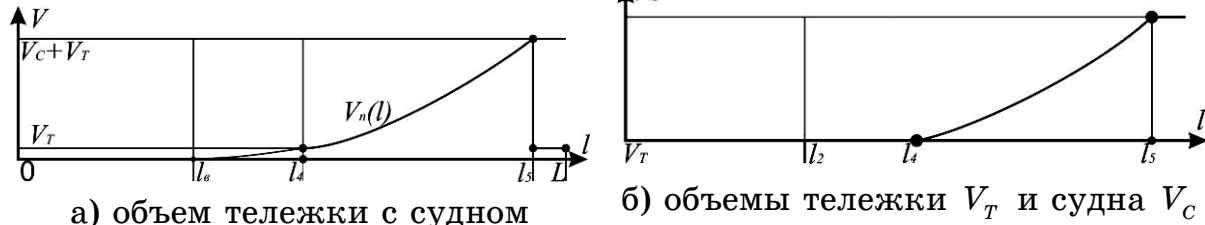


Рисунок 4 - Изменение подводного объема тел, погружаемых в воду

Изменение характеристик, которые влияют на величины сил действующих в системе «электропривод-тележка» на протяжении всего пути с некоторыми допущениями можно представить в виде:

- для коэффициента трения

$$\mu(l) = \begin{cases} \mu_1, & l \in [0, l_2], \\ \mu_1 - (\mu_1 - \mu_2) \frac{(l - l_2)}{(l_3 - l_2)}, & l \in [l_2, l_3], \\ \mu_2, & l \in [l_3, L], \end{cases} \quad (4)$$

где μ_1 и μ_2 – коэффициенты трения в надводной и подводной части;

- для характерной площади и погруженного объема тележки

$$S_T(l) = \begin{cases} 0, & l \in [0, l_2], \\ S_{Tm} \frac{(l - l_2)}{(l_4 - l_2)}, & l \in [l_2, l_4], \\ S_{Tm}, & l \in [l_4, L], \end{cases} \quad \text{и} \quad V_T(l) = \begin{cases} 0, & l \in [0, l_2], \\ V_{Tm} \frac{(l - l_2)}{(l_4 - l_2)}, & l \in [l_2, l_4], \\ V_{Tm}, & l \in [l_4, L], \end{cases} \quad (5)$$

где S_{T_m} и V_{T_m} – максимальные значения характерной площади и объема тележки;

- для характерной площади и погруженного объема судна

$$S_C(l) = \begin{cases} 0, & l \in [0, l_4], \\ S_{Cm} \frac{(l - l_4)}{(l_5 - l_4)}, & l \in [l_4, l_5], \\ S_{Cm}, & l \in [l_5, L], \end{cases} \quad \text{и} \quad V_C(l) = \begin{cases} 0, & l \in [0, l_4], \\ V_{Cm} \frac{(l - l_4)}{(l_5 - l_4)}, & l \in [l_4, l_5], \\ V_{Cm}, & l \in [l_5, L], \end{cases} \quad (6)$$

где S_{Cm} и V_{Cm} – максимальные значения характерной площади и объема погруженной в воду части судна (до всплытия).

На основе предложенного подхода, используя функции принадлежности, можно получить аналитические зависимости для непрерывного описания параметров (4–6) в виде функции от пространственной координаты l . Для формирования аналитических зависимостей $\mu(l)$, $S_T(l)$, $V_T(l)$, $S_C(l)$ и $V_C(l)$ от пройденного пути можно использовать z- и s-подобные сигмоидные функции принадлежности [5], которые приводят к выражениям вида:

– для коэффициента трения

$$\mu(l) = \mu_2 + (\mu_1 - \mu_2) \frac{1}{1 + e^{\delta_{23}(l-l_{23})}}, \quad (7)$$

где $l_{23} = (l_2 + l_3) / 2$ – середина отрезка $[l_2, l_3]$; δ_{23} – коэффициент крутизны для переходного участка $\Delta_{23} = (l_3 - l_2) / 2$;

– для характерной площади и погруженного объема тележки

$$S_T(l) = S_{Tm} \frac{1}{1 + e^{-\delta_{24}(l-l_{24})}} \text{ и } V_T(l) = V_{Tm} \frac{1}{1 + e^{-\delta_{24}(l-l_{24})}}, \quad (8)$$

где $l_{24} = (l_2 + l_4) / 2$ – середина отрезка $[l_2, l_4]$; δ_{24} – коэффициент крутизны для переходного участка $\Delta_{24} = (l_4 - l_2) / 2$;

– для характерной площади и погруженного объема судна

$$S_C(l) = S_{Cm} \frac{1}{1 + e^{-\delta_{45}(l-l_{45})}} \text{ и } V_C(l) = V_{Cm} \frac{1}{1 + e^{-\delta_{45}(l-l_{45})}}, \quad (9)$$

где $l_{45} = (l_4 + l_5) / 2$ – середина отрезка $[l_4, l_5]$; δ_{45} – коэффициент крутизны, для переходного участка $\Delta_{45} = (l_5 - l_4) / 2$;

Моделирование пространственно изменяющихся параметров осуществлялось при следующих исходных данных: $l_1 = 0 \text{ м}$, $l_2 = 17.5 \text{ м}$, $l_3 = 23 \text{ м}$, $l_4 = 43 \text{ м}$, $l_5 = 58 \text{ м}$, $l_6 = 70 \text{ м}$, $S_{Tm} = 0.33 \text{ м}^2$, $V_{Tm} = 3 \text{ м}^3$, $S_{Cm} = 13.8 \text{ м}^2$, $V_{Cm} = 238.6 \text{ м}^3$, $\varepsilon = 0.05$. Полученные аналитические зависимости для пространственно изменяющихся параметров по выражениям (7)–(9) (сплошная линия) приведено на рис.5–рис.7. Штрихпунктирной линией изображены исходные зависимости, построенные согласно выражениям (4)–(6).

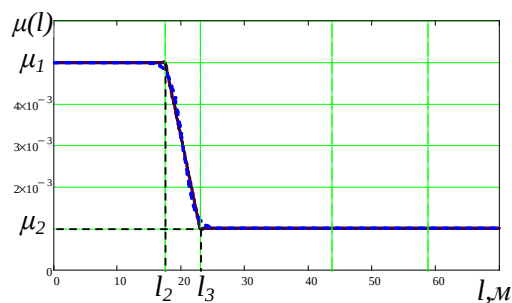
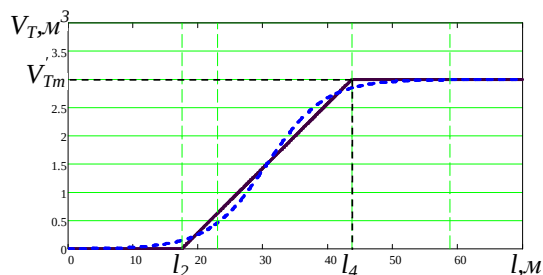
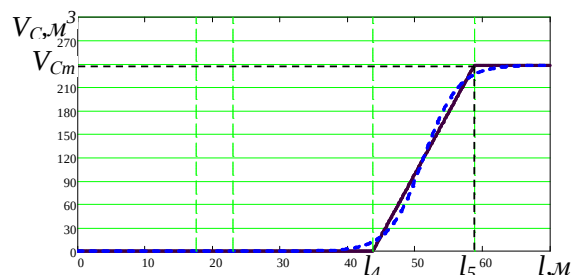


Рисунок 5 - Коэффициент трения

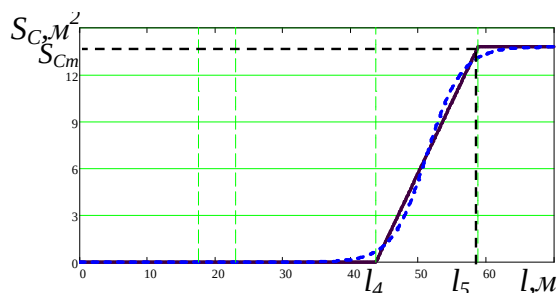


а) тележки

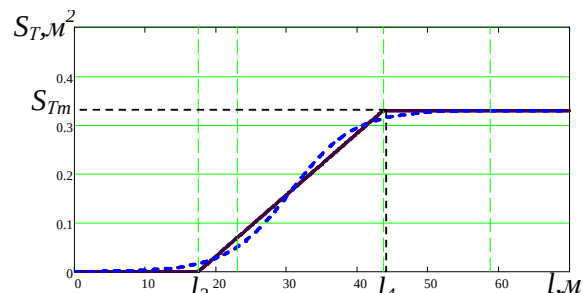


б) судна

Рисунок 6 - Погруженные объемы



а) тележки



б) судна

Рисунок 7 - Характерные площади

Результаты моделирования натяжения троса, в зависимости от местоположения судна при движении в процессе спуска и подъема, при различных возможных значениях коэффициента трения (в зависимости от состояния рельс) и веса судна показаны на рис. 8 - рис. 10.

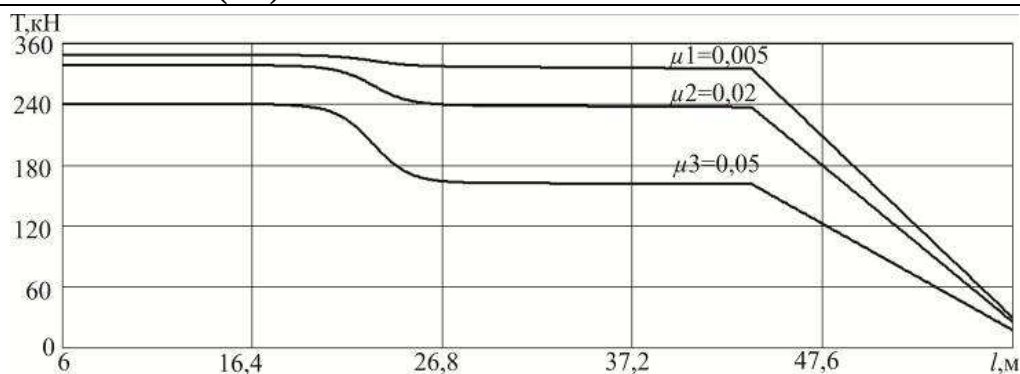


Рисунок 8 - Влияние коэффициента трения на натяжение троса

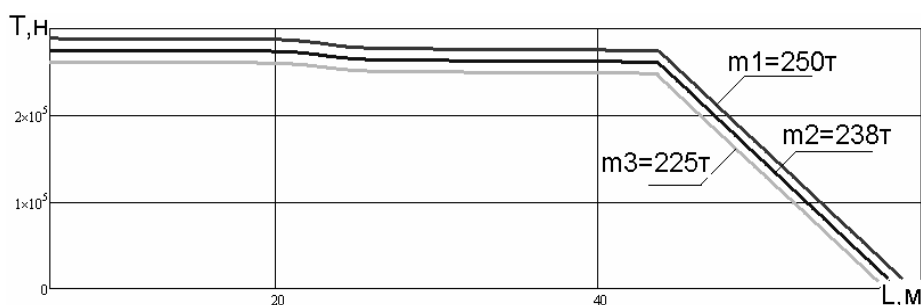


Рисунок 9 - Влияние распределения веса судна на натяжение троса

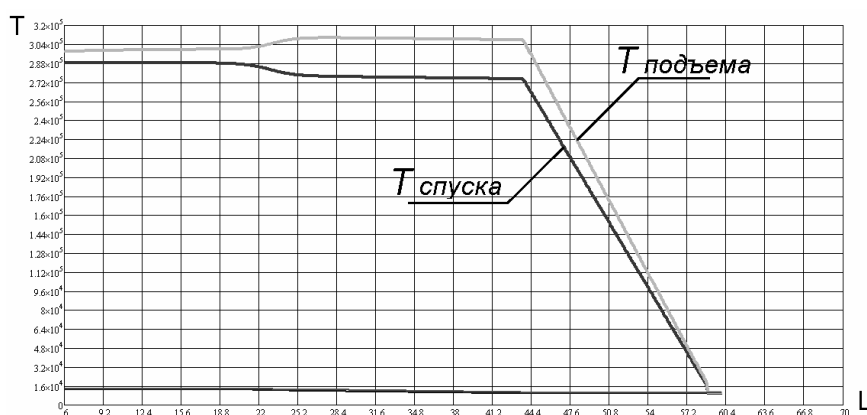


Рисунок 10 - Влияние режима работы слипа на натяжение троса

По представленным графикам можно судить о характере изменения нагрузки на отдельные приводы слипа. На протяжении всего пути фиксируются диапазоны изменения нагрузки по отношению к максимальной нагрузке в зависимости от трения – 45%, от массы секции судна – 10%, от режима работы (спуска или подъема) – 10%. Участки резкого изменения характеристик соответствуют отрезкам

пути, на которых чаще всего наблюдаются нештатные режимы работы слипа.

Выводы. Полученные аналитические зависимости основных параметров, существенно влияют на процесс спуска/подъема связанного объекта «судно-тележки», позволяющие моделировать изменение нагрузки на все электроприводы слипа в любой точке движения.

Наличие аналитического описания пространственно изменяющихся параметров позволяет построить динамическую модель, описывающую движение тележек с установленным на них судном на протяжении всего пути.

Создание такой модели необходимо для разработки методов согласованного управления электроприводами поперечного слипа, с помощью которых можно обеспечить соответствующую надежность функционирования сложной электромеханической системы в течение всего процесса спуска/подъема судна.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пиляев С.И. Судоподъемные и судоспускные сооружения / С.И. Пиляев, Ф.В. Морозов. – М.: МИСИ, 1993. – 107 с.
2. Омельчук, А. А. Проблеми узгодженого управління складною електромеханічною системою / Ю. О. Лебеденко, Г. В. Рудакова // Наукові праці НУХТ.- 2013. – №49. – С.19– 23.
3. Омельчук А.А. Информационно-измерительная подсистема мониторинга параметров и процессов спуска судна на воду / А.А. Омельчук, А.В.Рудакова // Збірник наукових праць НУК. – 2013.– №4(449). – С. 11 – 16.
4. Омельчук А.А. Моделирование движения спусковых тележек слипа / А.А. Омельчук, Ю.А. Лебеденко, А.В. Рудакова // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2(47). – Херсон: ХНТУ, 2013. – С. 265 – 270.
5. Шейник С.П. Использование функций принадлежности для моделирования параметров распределенных объектов / С.П. Шейник, А.В.Рудакова // ААЕКС. – 2009. - №2. С. 20-26.

К.Ю. Островська, О.І. Михальов, Н.С. Прядко

**ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДІВ
НЕЙРОМЕРЕЖЕВОГО ПРОГНОЗУВАННЯ
В ЗАДАЧАХ МЕТАЛУРГІЙНОЇ ДИНАМІКИ**

Анотація. У роботі визначено спеціальний метод побудови та оцінки моделі прогнозування. Нейронні мережі є дуже потужним інструментом для роботи в прогнозуванні, але для освоєння цього цієї технології потрібно витратити часу вже точно не менше, ніж на освоєння технічного аналізу.

Ключові слова: прогнозування, динаміка, процес, нейромережа.

В останні кілька років ми спостерігаємо вибух інтересу до нейронних мереж, які успішно застосовуються в самих різних областях - бізнесі, медицині, техніці, геології, фізики. Нейронні мережі увійшли в практику скрізь, де потрібно вирішувати завдання прогнозування, класифікації або управління.

Нейромережеве моделювання в чистому вигляді базується лише на даних, не привертаючи ніяких апріорних міркувань.

Тому для гарного прогнозу потрібно користуватися по-перше, дуже якісно підготовленими даними, а по-друге, нейропакет з великою функціональністю.

Кварцовий пісок (англ. quartz sand) – пісок, що складається більше ніж на 90% з уламків кварцу. Як правило, форма зерен добре обкатана. Матеріал добре відсортований, однорідний. Пісок кварцовий характерний для платформних районів. Утворюється як в умовах жаркого вологого клімату за рахунок перевідкладення продуктів глибокого хімічного вивітрювання материнських порід, так і безвідносно до клімату при тривалому перевідкладенні піщаного матеріалу або при формуванні осадів за рахунок розмивання древніших кварцових пісків (пісковиків).

Кварцові піски використовуються для виробництва скла (30 – 38% від усього видобутку), як формувальні піски при литті металів, а також для виготовлення бетону і штукатурок.

В Україні Державним балансом запасів враховано 28 родовищ кварцового піску. Розробляються 11 родовищ піску. Всього запасів категорії А+В+С1 в Україні бл. 232,4 млн т, С2 – 15,2 млн т. З них розробляються 65,4 млн т. Унікальним за якістю піску є Новоселківське родовище, на базі якого працює Новоселківський ГЗК.

Представлені дані акустичного моніторингу процесу подрібнення кварцового піску, експеримент 12.10.2011г.

Виміри проводилися одним датчиком (млин - в помольній камері) частота реєстрації 400кГц.

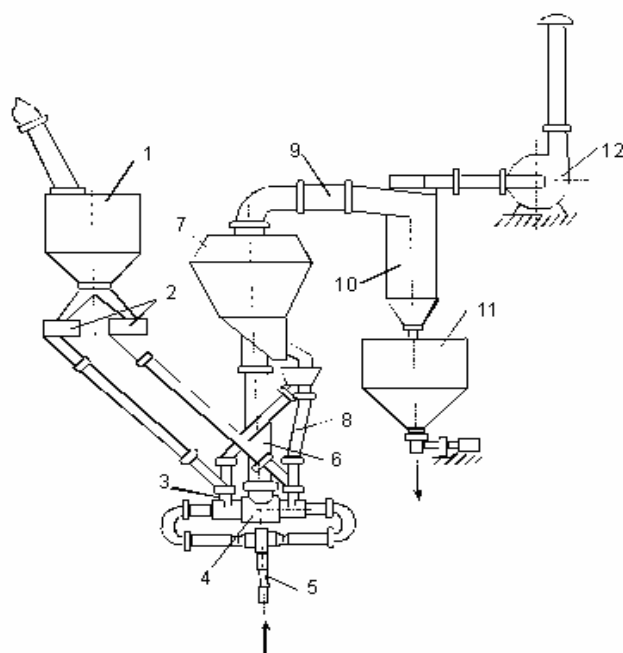


Рисунок 1 – Схема газоструменевого млина УСІ-20

Принцип роботи газоструменевий мельниці УСІ-20 представлено на рисунку 1.

Газоструменевий млин УСІ-20 призначений для вивчення газодинамічних процесів у проточних трактах апаратів, що реалізують подібний спосіб подрібнення.

Крім того, з використанням цього апарата проводився пошук нових технічних рішень, що забезпечують підвищення ефективності процесу струминного подрібнення сипучих матеріалів.

Установка УСІ-20 дозволяє проводити дослідження з подрібнення сипучих матеріалів, що відрізняються своїми фізико-механічними властивостями, і має наступні основні характеристики:

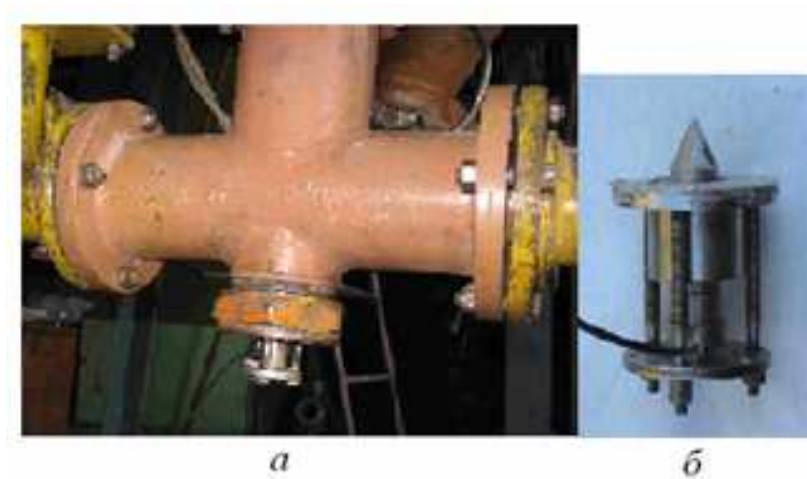
- діаметр помольної камери - 65 мм;
- довжина помольної камери - 195 мм;
- відстань між зрізами розгінних трубок у помольній камері - 65 мм;
- внутрішній діаметр розгінної трубки - 20 мм;
- товщина стінки розгінної трубки - 2,2 мм;
- довжина розгінної трубки - 155 мм;
- діаметр сопла несучого робочого тіла - 6 мм;
- тиск на вході в сопло несучого робочого тіла - 3 атм;

- температура несучого робочого тіла - 293 - 440 К.

Експериментальна установка включала всі вузли класичної схеми газоструменевого подрібнювача (рис. 2): завантажувальний бункер 1, шибєрні заслінки 2, ежекторні вузли 3, помольну камеру 4, магістралі підведення несучого робочого тіла (холодного або нагрітого повітря) 5, відвідний трубопровід 6, класифікатор 7 і трубопроводи 8 повернення сипкого матеріалу в порожнину ежектора 3 на подрібнення, трубопровід 9 для відводу з класифікатора 7 готового продукту, дисперсність частинок якого визначається оборотами класифікатора, циклон 10 і бункер 11 готового продукту, витяжний вентилятор 12.

При вимірі акустичних сигналів як основи акустоемісійного моніторингу використовувався апаратний комплекс, який включає два великих блоки: апаратура для реєстрації сигналів і комплекс апаратури і програм для аналізу одержуваної інформації.

Дослідження проводилися над акустичними сигналами (АС), які вимірювалися двома п'єзокерамічними датчиками (частота реєстрації 200 кГц), встановленими в помольній камері млина і в трубопроводі, на виході з класифікатора. Загальний вигляд камери з датчиком і елемента реєструючого комплексу (хвилевід і датчик) представлені на рисунку 2 (а, б).



а – камера з датчиком,
б – хвилевід з датчиком

Рисунок 2 – Загальний вигляд камери

Експериментальних даних було запропоновано 40.000, для дослідження була створена вибірка від початку роботи (0 с) до 100 с. Розглядалися відрізки по 0,0025 с.

Розглянемо процес розробки нечіткої моделі гібридної мережі для вирішення завдання прогнозування процесу подрібнення кварцевого піску.

Суть даного завдання полягає в тому, аби, знаючи динаміку зміни амплітуди сигналу за фіксований інтервал часу, передбачити її значення на певний момент часу в майбутньому.

Режими подрібнення позначені:

- 1) Завантаження - подача матеріалу і перші секунди подрібнення,
- 2) Робочий режим - процес подрібнення,
- 3) Розвантаження - млин майже порожній, закінчується подрібнення, необхідно подавати матеріал.

Передбачимо, що нечітка модель гібридної мережі міститиме 4 вхідних змінних. При цьому перша вхідна змінна відповідатиме амплітуді на поточний момент часу, друга – амплітуді на попередній момент часу, тобто на момент часу $(i-1)$, де через i позначений поточний момент часу. Тоді третя вхідна змінна відповідатиме амплітуді на $(i-2)$ момент часу, а четверта – амплітуді на $(i-3)$ момент часу.

Відповідні навчальні дані були зведені в окрему таблицю (для кожного режиму відповідно). Об'єм отриманої таким чином навчальної вибірки дорівнює 39996 що відповідає динаміці амплітуди від 0с до 100с (таблиця 1). При цьому дані з 99,9975с по 100с не ввійшли до складу навчальної вибірки і можуть бути використані для перевірки адекватності побудованої нечіткої моделі.

Таблиця 1

Навчальні дані для побудови моделі гібридної мережі
для завантаження

Перша вхідна змінна	Друга вхідна змінна	Третя вхідна змінна	Четверта вхідна змінна	Вихідна змінна
0,05	-0,0463	0,0463	0,035	0,0787
0,0787	0,05	-0,0463	0,0463	0,0325
0,0325	0,0787	0,05	-0,0463	0,06
...	...	...	...	...
-0,0162	0,01	0,0637	0,0075	-0,0425
-0,0425	-0,0162	0,01	0,0637	0,0637
0,0637	-0,0425	-0,0162	0,01	0,0538

Збережемо навчальну вибірку в зовнішньому файлі під ім'ям ML.dat для кожного режиму відповідно. Після цього відкриємо редактор ANFIS, в який завантажимо цей файл з навчальними даними. Зовнішній вигляд редактора ANFIS із завантаженими навчальними даними представлений на рисунку 3.

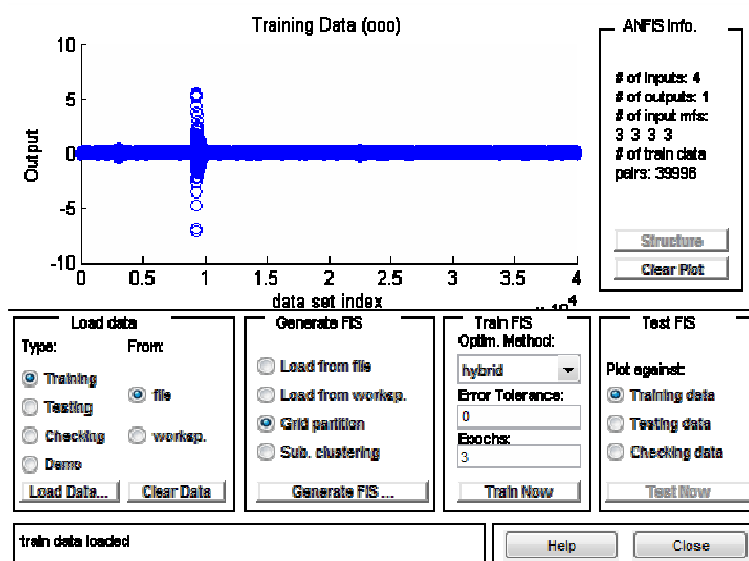


Рисунок 3 – Графічний інтерфейс редактора ANFIS після завантаження навчальних даних

Перед генерацією структури системи нечіткого висновку типу Сугено після виклику діалогового вікна властивостей задамо для кожної з вхідних змінних по 3 лінгвістичних терма, а в якості типу їх функцій належності виберемо трикутні функції. В якості типу функції належності вихідної змінної задамо лінійну функцію.

Для навчання гібридної мережі скористаємося гібридним методом навчання з рівнем помилки 0, а кількість циклів навчання задамо рівним 10. Після закінчення навчання даної гібридної мережі може бути виконаний аналіз графіка помилки навчання (рис. 4), який показує, що навчання практично закінчилося після 10 циклу і тривало 2год 17хв 24с.

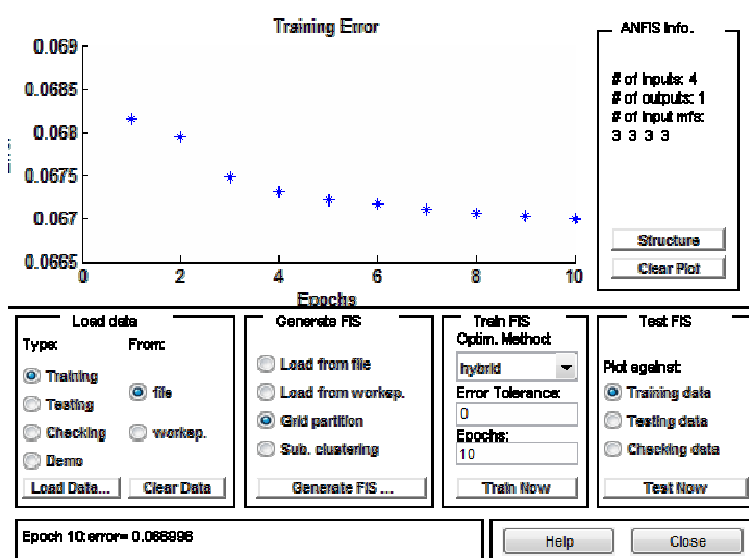


Рисунок 4 – Залежність помилки навчання від кількості циклів навчання

Після навчання гібридної мережі можна візуально оцінити структуру побудованої нечіткої моделі (рис. 5). Графічна наочність даної моделі залишає бажати кращого, оскільки загальна кількість правил в розробленій адаптивній системі нейро-нечіткого виводу дорівнює 81, які представлені в одній з поширеніших форм «ЯКЩО - ТО», що ускладнює їх візуальний контроль і оцінку.

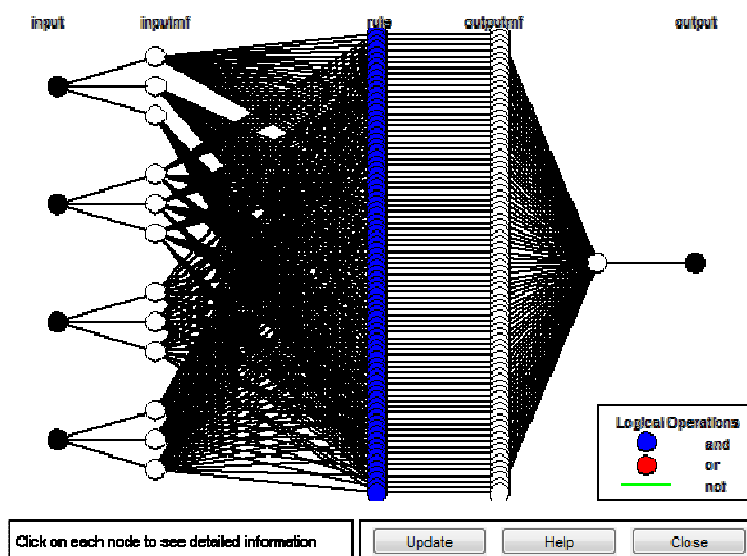


Рисунок 5 – Структура згенерованої системи нечіткого висновку

Для дослідження побудованої моделі гібридної мережі (навчання гібридним методом) можна скористатися програмою перегляду правил (Rule Viewer). Для отримання значення яке цікавить нас необхідно задати конкретне значення входної змінної (наприклад - 0,8368) аналогічно загальним рекомендаціям систем нечіткого виводу. При цьому на графіку функцій належності вихідної змінної буде вказано шукане значення вихідної змінної -2,59 (рис. 6).

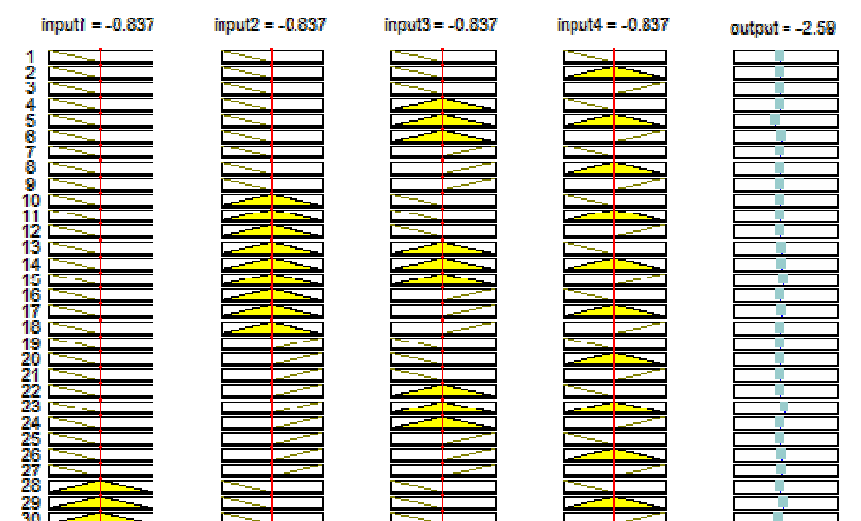


Рисунок 6 – Ілюстрація роботи нечіткої системи

На додаток до цього можна виконати візуальний аналіз поверхні виводу для побудованої гібридної мережі, яка також дозволяє оцінити значення вихідної змінної, рисунок 7.

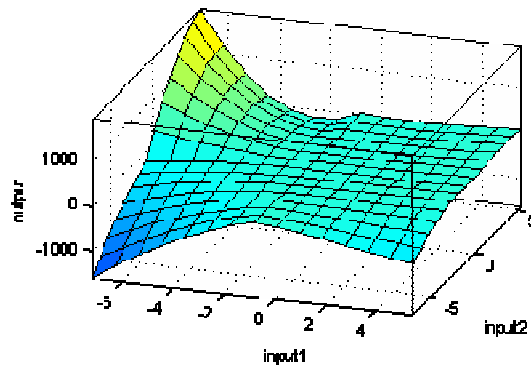


Рисунок 7 – Поверхня системи нечіткого висновку

Дана система навчена на гібридному методі, який об'єднує метод зворотного поширення помилки з методом найменших квадратів.

Виконаємо перевірку адекватності побудованої нечіткої моделі гібридної мережі. Для цієї мети зробимо ретроспективний прогноз значення амплітуди на наступний момент часу, наприклад, на 100 с, вважаючи для цього випадку поточним моментом часу – 99,9975 с.

Оскільки точність кількісних значень, що забезпечується графічними засобами пакету Fuzzy Logic Toolbox, є недостатньою для вирішення даного завдання, скористаємося функцією командного рядка `evalfis`. Як аргументи цієї функції вкажемо вектор значень амплітуди на поточний і 3 попередніх моменту часу. Після виконання цієї команди за допомогою розробленої нечіткої моделі буде набуто значення вихідної змінної для 100 с, яке дорівнює:

1) Завантаження

```
>> out1 = evalfis([0.0825 -0.0063 0.0075 -0.03], MLZagrHybrid)
out1 = 0.0393
```

2) Робочий режим

```
>> out1 = evalfis([0 0.0587 0.0137 -0.0225], MLRabRegH)
out1 = 0.0251
```

3) Розвантаження

```
>> out1 = evalfis([0.0325 0.0288 0.0375 0.04], MLRazgrH)
out1 = 0.0354
```

Розглянемо процес навчання нейронної мережі з використанням алгоритму зворотнього поширення помилки (backpropagation). Для

цього процесу використовуємо ту ж саму нейронну мережу яка має чотири входи і один вихід.

Загальна послідовність процесу розробки моделі гібридної мережі методом зворотнього поширення помилки така ж сама, як і у гібридному методі. Відмінність полягає в виборі метода навчання.

Виконаємо перевірку адекватності побудованої нечіткої моделі гібридної мережі. Для цієї мети зробимо ретроспективний прогноз значення амплітуди на наступний момент часу, наприклад, на 100 с, вважаючи для цього випадку поточним моментом часу – 99,9975 с.

Після виконання цієї команди за допомогою розробленої нечіткої моделі буде набуто значення вихідної змінної для 100 с, яке дорівнює:

1) Завантаження

```
>> out1 = evalfis([0.0825 -0.0063 0.0075 -0.03], MLZagrBack)
out1 = -0.1890
```

2) Робочий режим

```
>> out1 = evalfis([0 0.0587 0.0137 -0.0225], MLRabRegBack)
out1 = 0.0294
```

3) Розвантаження

```
>> out1 = evalfis([0.0325 0.0288 0.0375 0.04], MLRazgrBack)
out1 = 0.0351
```

Для порівняння цих двох методів навчання розрахуємо абсолютну і відносну похибки, таблиця 2.

Таблиця 2

Похибки начальних процесів

Метод навчання	(100 с) Out	out1	Δ (абсолютна)	δ (відносна)
Hybrid (завантаження)	0,0587	0,0393	0,0097	0,1652
Backproпа (завантаження)	0,0587	-0,1890	0,1239	2,1107
Hybrid (робочий режим)	0,07	0,0251	0,0225	0,3014
Backproпа (робочий режим)	0,07	0,0294	0,0203	0,42
Hybrid (роззавантаження)	0,0225	0,0354	0,0065	0,288
Backproпа (роззавантаження)	0,0225	0,0351	0,0063	0,28

Порівнюючи відносну похибку двох методів, маємо що гібридний метод має меншу похибку і тому, цей підхід є перспективнішим напрямом для побудови і використання відповідних нечітких моделей прогнозування.

Таким чином, перевірка побудованої нечіткої моделі гібридної мережі показує високу ступінь її адекватності реальним вихідними даними, що дозволяє зробити висновок про можливість її практичного використання для прогнозування амплітуд процесу подрібнення кварцевого піску. У цьому випадку нечіткі моделі адаптивних систем нейро-нечіткого виводу можуть вважатися новим і конструктивним інструментом технічного аналізу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Круглов В.И., Дли М.И., Голунов Р.Ю. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. – М.: Изд. Физ.мат.лит., 2002. – 312 с.
2. Михалев А. И. Адаптивно - поисковые методы и алгоритмы оптимизации и идентификации динамических систем. Учебное пособие. - УМК ВО, Киев, 1992. – 68 с.
3. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и FuzzyTECH. – БХВ: Санкт - Петербург, 2003. – 716 с.

К.Э. Рагимова

ПРОМЫШЛЕННОЕ ИСПЫТАНИЕ ПРОТИВОПРИГАРНЫХ СВОЙСТВ ФОРМОВОЧНЫХ И СТЕРЖНЕВЫХ СМЕСЕЙ С ТЕХНОГЕННЫМИ ОТХОДАМИ

Аннотация. В статье анализируются результаты промышленных испытаний противопригарных свойств формовочных и стержневых смесей с техногенными отходами. представлены свойства испытуемых смесей и проведён анализ качества технологических образцов. Формовочные и стержневые смеси с техногенными отходами рекомендуются для использования при производстве стальных отливок. Экспериментальным путем доказано, что стержневые смеси с испытуемым шламом препятствуют проникновению жидкого металла в пространство между зёрнами кварцевого песка и образованию пригара. В тоже время при использовании серийной смеси имеются условия для проникновения жидкого металла в поры формы и образования пригара.

Ключевые слова: техногенные отходы, формовочные и стержневые смеси, промышленные испытания, технологическая проба.

Введение

Добавка техногенных отходов в формовочные смеси для повышения их противопригарных свойств является актуальной научно-технической задачей. В качестве таких отходов можно использовать нефтесодержащие донные отложения (НДО) и отходы с прудов-шламов накопителей нефтеперерабатывающего завода (ОППН). Следовательно, разработка практических мер и технических решений по предотвращению загрязнения нефтеотходами окружающей среды и использование их отходов в литейном производстве имеет не только экологическую, но и экономическую выгоду [1; 2].

Постановка задачи

Произвести производственные испытания противопригарных свойств формовочных и стержневых смесей с целью выявления целесообразности их использования по сравнению с цеховой смесью.

Изложение основного материала исследования

Промышленные испытания проведены на Бакинском сталелитейном заводе при производстве стальных отливок. Целью испытаний являлось сопоставимое сравнение противопопригарных свойств заводской смеси №12 и предлагаемых смесей с техногенными отходами.

Составы заводских испытываемых смесей приведены в табл. 1, их свойства – в табл. 2. В лаборатории сталелитейного завода из испытываемых смесей были изготовлены цилиндрические стержни диаметром 23 мм и длиной 75 мм. На рис. 1 представлена технологическая проба, составленная из стержней. Технологическая проба была залита сталью марки 45 л при температуре 1823-1833К (1550-15600С) выплавленной в электродуговой печи ДСП-5М. На рис. 2 представлена отливка технологической пробы после выбивки из формы.

После очистки отливки технологической пробы подвергались нижеследующим режимам термической обработки: закалка: нагрев до температуры 9200С, выдержка 30 мин., охлаждение в воде; отпуск: нагрев до температуры 4000С, выдержка 30 мин., охлаждение на воздухе.

Таблица 1

Составы смесей

Компоненты смеси	Состав, % по массе		
	цеховая №12	предлагаемая №1	Предлагаемая №2
Песок 4 К10202 ГОСТ 2138-91	90,02	87,02	87,02
Связующие ЛСТ ТУ 13-0281036-05-89	5,95	5,95	5,95
Связующая КО ОСТ 38.01182-80	4,03	4,03	4,03
НДО	-	3,0	-
ОППН	-	-	3,0

Таблица 2

Свойства испытываемых смесей

Свойства смесей	Показатели во время испытаний		
	цеховая №21	Предлагаемая №1	предлагаемая №2
Прочность на сжатие во влажном состоянии, 105 Па	0,15	0,14	0,13
Прочность на разрыв после тепловой сушки, 105 Па	18	18	17
Газопроницаемость, ед.	100	110	100
Осыпаемость, %	0,20	0,20	0,20

С целью определения степени поражения пригаром технологические пробы после термической обработки разрезались. На рис. 3 представлены разрезанные пробы. Из рисунка видно, что отливки, изготовленные в формах из предлагаемой формовочной смеси, в меньшей степени поражены пригаром. В тоже время отливки, изготовленные в формах из заводской смеси №12, почти полностью поражены пригаром.

Проведёнными исследованиями подтверждена эффективность предлагаемой смеси. После промышленных испытаний отливки технологических проб очищались от пригара вручную. После очистки отливок от пригара количество горелой смеси составило: цеховая смесь – 810 г; смесь добавкой NDO – 230 г; смесь с добавкой OPPN – 255 г.

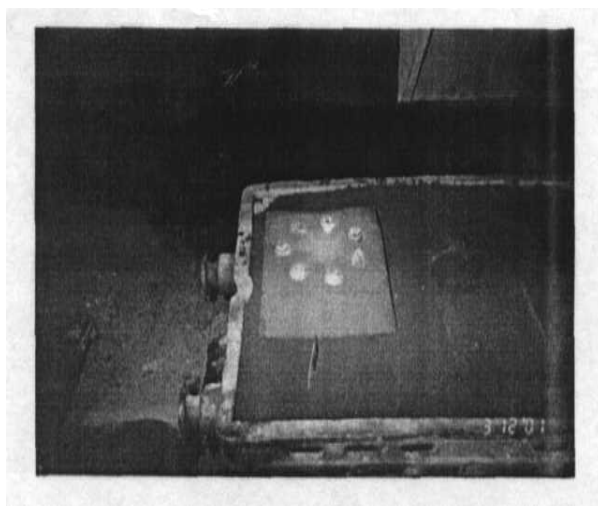


Рисунок 1 - Технологическая проба с установленными стержнями

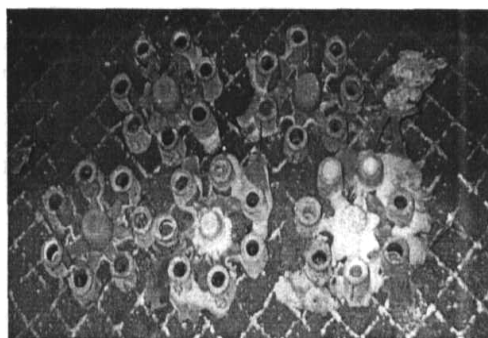


Рисунок 2 - Отливки технологических проб

В условиях Бинагадинского сталелитейного завода проведены испытания стержневой смеси с добавкой опытных шламов при изготовлении стальных отливок. Целью исследования являлось выявление

ние противопригарных предлагаемых формовочной и стержневой смесей в сравнении с применяемой на заводе формовочной смесью №12.

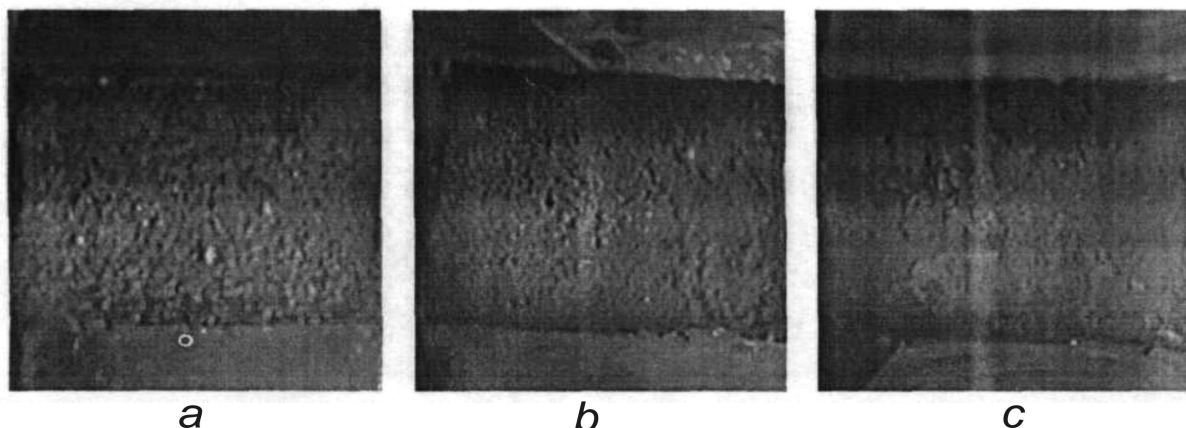


Рисунок 3 - Разрезы отливок с добавкой технологических проб:

- а – отливка, полученная из заводской смеси;
- б – отливка, полученная из смеси с добавкой NDO;
- с – отливка, полученная из смеси OPPN

Стержни, изготовленные в литейном цехе завода, сушились в вертикальном конвейерном сушиле при температуре 3200С в течении 90 мин. Стержни укладывались в форму для изготовления отливки "вилка" (чертёж 162.60.202) и при температуре порядка 1550-15600С заливались сталью 45л. На рис. 4 показана нижняя полуформа с установленными стержнями.

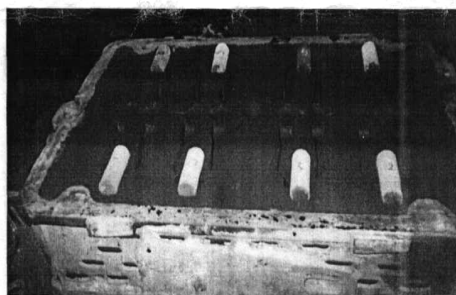


Рисунок 4 - Полуформа с установленными стержнями

На рис. 5 представлена группа отливок, полученных из стержней, изготовленных в формах опытной смеси.

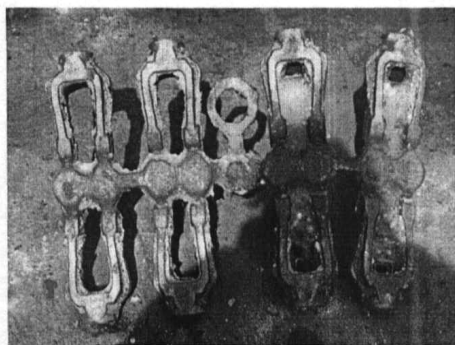


Рисунок 5 - Блок опытных отливок

После охлаждения, выбивки и разделения блока отливок, последние подвергались термической обработке по следующим режимам: закалка: нагрев до температуры 9200С, выдержка 30 мин., охлаждение в воде; отпуск: нагрев до температуры 4000С, выдержка 30 мин., охлаждение на воздухе.

С целью изучения поверхности отливок, полученных с использованием стержней из опытной смеси, последние разрезались. Разрезы отливок представлены на рис. 6, из которого видно, что по сравнению со смесью, применяемой на заводе, отливки, полученные с применением опытной смеси, отличаются практически полностью отсутствием пригара [3].

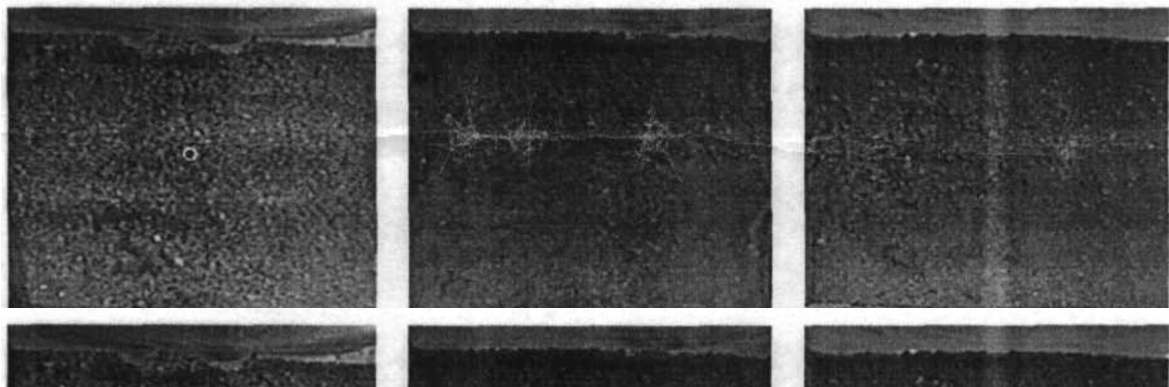


Рисунок 6 - Разрезы пробных отливок:

- а – отливка, изготовленная в форме существующей в цехе смеси;
- б – отливка, изготовленная в форме из смеси с добавкой НДО;
- с – отливка, изготовленная в форме из смеси с добавкой ОППН

Из опытных отливок были изготовлены образцы для металлографических исследований. Образцы изготавливались таким образом, чтобы можно было изучить как поверхность отливки с пригаром, так

и поверхность отливки, прилегающая к пригару. Для предотвращения изменения цвета и осыпаемости поверхностного слоя с пригаром при полировке поверхность образца с пригаром пропитывалась эпоксидной смолой. Из подготовленных таким образом темплетов изготавливались металлографические шлифы.

На рис. 7 представлены шлифы, изготовленные из отливок с применением заводской смеси и смеси с 3% шлама. Из рис. 7 видно, что стержневые смеси с испытуемым шламом препятствуют проникновению жидкого металла в пространство между зёрнами кварцевого песка и образованию пригара. В тоже время при использовании серийной смеси имеются условия для проникновения жидкого металла в поры формы и образования пригара.

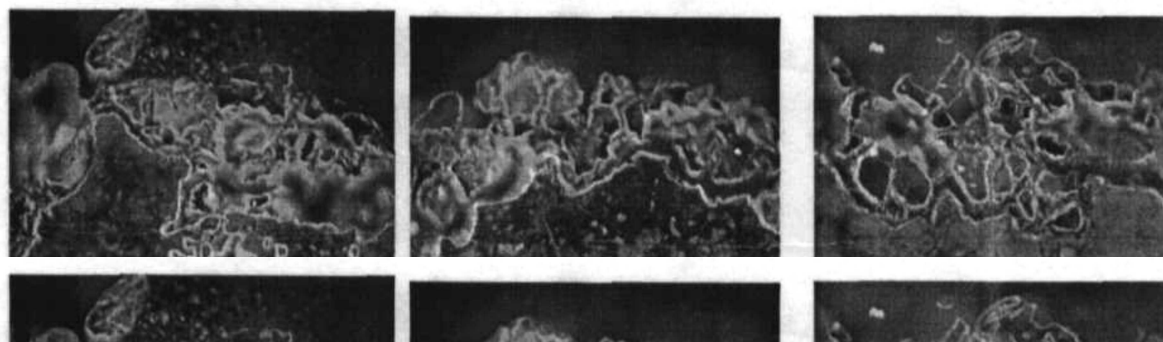


Рисунок 7 - Шлифы вырезанные из пробных отливок:

- а – шлиф, изготовленный с использованием цеховой смеси;
- б – шлиф изготовленный с использованием смеси 3% НДО;
- с – шлиф, изготовленный с использованием 3% ОПНН

Выводы

Таким образом, нами доказана целесообразность использования формовочных и стержневых смесей с техногенными отходами. Установлена возможность и эффективность использования таких смесей при изготовлении стальных отливок мелкого и среднего развесов.

Экспериментальным путем установлено, что стержневые смеси с испытуемым шламом препятствуют проникновению жидкого металла в пространство между зёрнами кварцевого песка и образованию пригара. В тоже время при использовании серийной смеси имеются условия для проникновения жидкого металла в поры формы и образования пригара.

Поэтому мы рекомендуем использовать формовочные и стержневые смеси с техногенными отходами при производстве стальных

отливок не только как экономически более выгодные, но и экологически более целесообразны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васин Ю. П. Окислительные противопопригарные формовочные и стержневые смеси / Ю. П. Васин, З. Я. Иткис. – Челябинск : ЮУТУ, 2005. – 320 с.
2. Иванов Н. П. Охрана труда в литейном производстве / Н. П. Иванов. – М. : Экология, 2005. – 260 с.
3. Исмаилова Н. Ш. Разработка противопопригарных формовочных смесей для стальных отливок / Н. Ш. Исмаилова // Учёные записки АзТУ. – 2001. – №4. – С. 61–64.

Л.Д. Чумаков

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРАТЕГИИ КОНТРОЛЯ ИСПРАВНОСТИ СИСТЕМЫ С ДУБЛИРОВАНИЕМ НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ

Аннотация. Обсуждаются вопросы нахождения оптимальных длительностей межпроверочных интервалов при проверке исправного состояния технической системы с дублированием на функционирование.

Исследовано влияние характеристик безотказности элементов, расхода ресурса при контроле на эффективность использования технической системы.

Введение

При эксплуатации технической системы возможно наступление отказов по некоторому множеству параметров, определяющих ее работоспособность. Для их устранения проводятся проверки исправности технической системы. Различные группы параметров могут контролироваться непрерывно, периодически или не контролироваться в течение всего срока эксплуатации.

В процессе разработки системы необходимо выбрать такую стратегию контроля ее исправного состояния, которая обеспечивает заданную эффективность ее использования по назначению.

С целью повышения уровня безотказности технических систем используют различные виды резервирования подсистем, узлов, элементов. Одним из наиболее распространенных является резервирование по схеме "1 из 2-х" или дублирование.

При разработке технической системы возникает задача определения оптимальных характеристик ее обслуживания, в частности, вида проверки, числа проверок при периодическом контроле и моментов их проведения.

Будем условно считать, что техническая система состоит из двух элементов и использована схема нагруженного резерва.

Анализ публикаций по теме исследования

Задачи оценки эффективности эксплуатации технической системы при агрегатном методе ремонта рассмотрены в работах [1-3].

В работе [5] исследовано влияние характеристик безотказности элементарнодублированной системы, длительности контроля исправности каждого элемента на эффективность использования технической системы.

Получена формула для приближенной оценки оптимальной длительности межпроверочного интервала в случае проверки исправности основного и резервного элемента.

Цель статьи

Цель статьи – показать решение задачи выбора оптимальных длительностей межпроверочных интервалов для системы с дублированием при проверке на функционирование, когда неизвестно, сохраняется дублирование или нет.

Основная часть

Рассматривается техническая система, находящаяся в состоянии готовности выполнить поставленную перед ней задачу на интервале $[0, T]$, где T – назначенный срок эксплуатации.

В случайный момент времени, равномерно распределенный на интервале $[0, T]$, может поступить команда на применение технической системы. При этом возможно существование скрытых отказов элементов системы. Для их устранения проводятся проверки исправности технической системы.

В данном случае рассматривается периодический контроль исправности. Будем считать, что стратегия контроля определяется вектором интервалов между проверками $\vec{\theta}$.

При проверке на функционирование отказ одного элемента не будет замечен, и система будет считаться исправной. Однако ее эффективность окажется сниженной.

Пусть эффективность эксплуатации технической системы определяется коэффициентом готовности

$$K_T(\vec{\theta}^*) = \sup_{\vec{\theta} \in R} K_T(\vec{\theta}),$$

где R – область, определяющая совокупность допустимых стратегий контроля.

Посмотрим, как влияет на стратегию контроля дублирование элементов.

Дублирование является частным случаем схемы резервирования "m из N", когда $m = 1$, а $N = 2$.

Рассмотрим идеальный контроль, когда ошибки диагностирования технического состояния системы отсутствуют.

При идеальном периодическом контроле система может находиться в следующих состояниях: E_1 – оба элемента исправны, E_2 – один элемент отказал, E_3 – оба элемента отказали.

Вероятность безотказной работы системы $P(t) = 2p(t) - p^2(t)$, где $p(t)$ – вероятность безотказной работы элемента.

Пусть время безотказной работы элемента распределено по экспоненциальному закону с параметром λ .

В этом случае процесс изменения состояний системы можно описать марковским случайным процессом.

Проверки исправности системы начинаются в моменты $t'_{\varphi-1}$, заканчиваются в моменты $t_{\varphi} = t'_{\varphi} + \tau$, где τ – расход ресурса при проверке.

Вероятности состояний системы в произвольный момент времени t , $t_{\varphi} \leq t \leq t'_{\varphi}$ находится следующим образом:

$$R(t) = R_0(t) \prod_{j=1}^{\varphi-1} A(\theta_j) B A(t - t_{j-1}) \quad (1)$$

где $R(t)$, $R_0(t)$ – матрицы вероятностей состояний системы в моменты t и t_0 , A и B – матрицы вероятностей переходов в межпроверочный период и при проверке [1].

Для системы без резерва оптимальной стратегией контроля исправности является равномерное расположение проверок [4].

Элементы матрицы A вычисляются по формулам: $a_{11} = e^{-2\lambda\theta_j}$, $a_{12} = 2e^{-\lambda\theta_j}(1 - e^{-\lambda\theta_j})$, $a_{13} = (1 - e^{-\lambda\theta_j})^2$, $a_{21} = 0$, $a_{22} = e^{-\lambda\theta_j}$, $a_{23} = 1 - e^{-\lambda\theta_j}$, $a_{31} = 0$, $a_{32} = 0$, $a_{33} = 1$.

Элементы матрицы B определяются следующим образом: $b_{11} = e^{-2\lambda\tau}$, $b_{12} = 2e^{-\lambda\tau}(1 - e^{-\lambda\tau})$, $b_{13} = (1 - e^{-\lambda\tau})^2$, $b_{21} = 0$, $b_{22} = e^{-\lambda\tau}$, $b_{23} = 1 - e^{-\lambda\tau}$, $b_{31} = e^{-2\lambda\tau}$, $b_{32} = 1 - e^{-\lambda\tau}$, $b_{33} = (1 - e^{-\lambda\tau})^2$.

Для системы с резервом время безотказной работы системы уже не распределено по экспоненциальному закону, и, строго говоря, равномерное расположение проверок не является оптимальным.

Рассмотрим, как изменяются длины межпроверочных интервалов в нашем случае. Для простоты предположим, что на интервале $[0, T]$ проводится одна проверка. Тогда из выражения (1) следует:

$$K_r = \{2/\lambda (1 - e^{-\lambda \theta_1}) - 1/2\lambda(1 - e^{-2\lambda \theta_1}) + [1 - 2e^{-\lambda(\theta_1 + \tau)} + 2e^{-2\lambda(\theta_1 + \tau)}][2/\lambda (1 - e^{-\lambda \theta_2}) - 1/2\lambda(1 - e^{-2\lambda \theta_2})] + [2e^{-\lambda(\theta_2 + \tau)} + 2e^{-2\lambda(\theta_2 + \tau)}][1/\lambda (1 - e^{-\lambda \theta_2})]\}/T, \quad (2)$$

где θ_j – длительность j -го межпроверочного интервала.

Пример. Пусть бортовая вычислительная машина состоит из двух каналов, включенных по схеме нагруженного резерва, интенсивность отказов одного канала $\lambda = 0,21$ 1/год, $\tau = 0,002$ года, $T=1$ год. Тогда оптимальные величины интервалов $\theta_1 = 0,653$ года, $\theta_2 = 0,347$ года и $K_r = 0,9933$. Если интенсивность отказов при проверке на два порядка выше, чем в режиме ожидания, то $\theta_1 = 0,666$ года, $\theta_2 = 0,334$ года и $K_r = 0,9927$.

Если принять стратегию проверок, при которой межпроверочные интервалы равны, то $K_r = 0,9926$, а во втором случае $K_r = 0,9911$.

Таким образом, на практике можно использовать стратегию проверок с равными межпроверочными интервалами.

Выводы и перспективы дальнейших исследований

Проведены исследования способов определения оптимальной стратегии проверок исправности технической системы, элементы которой дублированы, а при проверке контролируется только процесс функционирования.

Проведена оптимизация длин межпроверочных интервалов. Показано, что при проверке системы с дублированием на функционирование, оптимальной стратегией является такая, при которой длины последующих интервалов сокращаются. Однако применение стратегии проверок с одинаковой длиной межпроверочных интервалов незначительно снижает эффективность эксплуатации технической системы.

В перспективе предполагается распространить полученные результаты на другие, широко используемые виды резервирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Переверзев Е.С. Параметрические модели отказов и методі оценки надежности технических систем [Текст] / Е.С. Переверзев, Л.Д. Чумаков ; [отв. ред. В.С. Будник] ; АН УССР. Институт технической механики. – К. : Наук. думка, 1989. – 184 с. : ил. – Библиогр.: с. 179-182. – ISBN 5-12-000536-5.
2. Курасов В.Г. Надежность системы при комбинированном контроле и экспоненциальном распределении времени до отказа и времени восстановления [Текст] / В.Г. Курасов, Л.Д. Чумаков / Сб. "Надежность и прочность технических систем". – К. : Наукова думка, 1976 – С. 73-83.
3. Чумаков Л.Д. Надежность, стоимость эксплуатации технического устройства при комбинированном контроле исправности и возможности ошибок контролирующей аппаратуры [Текст] / Л.Д. Чумаков / Сб. "Прочность и долговечность конструкций". – К. : Наукова думка, 1980 – С. 174-183.
4. Чумаков Л.Д. Оптимизация стратегии контроля исправности хранящейся системы [Текст] / Л.Д. Чумаков / Сб. " Надежность сложных технических систем". – К. : Наукова думка, 1974 – С. 36-43.
5. Чумаков Л.Д. Оптимизация стратегии контроля исправности системы с резервными элементами [Текст] / Л.Д. Чумаков // Системные технологии. Регион. межвуз. сб. научн. работ. – Днепропетровск, 2011.– Вып. 2 (73). – С. 50–55.

В.Б. Зворыкин, О.Н. Кукушкин, А.И. Михалев, Г.Ю. Станчиц
**ОПТИМИЗАЦИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ
 С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ**

Аннотация. В работе решена задача оптимизации в системе с запаздыванием в условиях неопределенности на примере системы заполнения смесителя сыпучим материалом. Построена модель системы в результате исследования которой определены оптимальные параметры регулятора.

Задача оптимизации, изложенная в [1], может быть усложнена, если есть неопределенные параметры. К таким параметрам относятся величины, точные значения которых неизвестны или которые могут изменяться.

Структурная схема системы регулирования изображена на рис. 1.

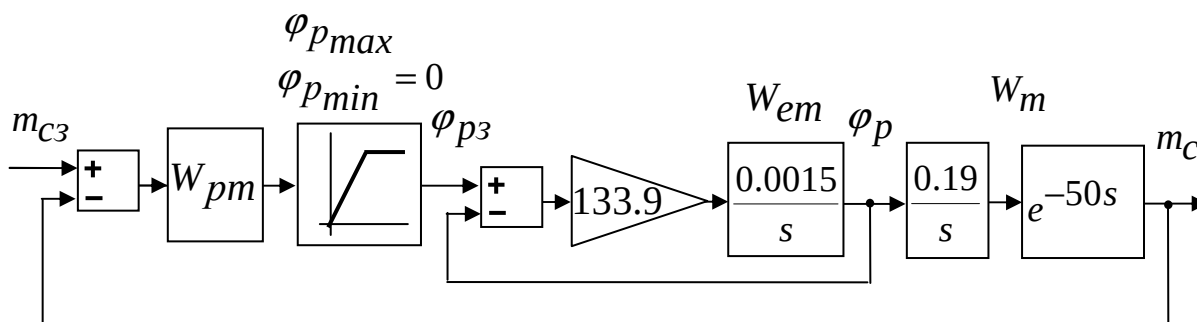


Рисунок 1 - Структурная схема системы заполнения смесителя сыпучим материалом

Решим задачу оптимизации, учитывая, что время чистого запаздывания τ находится в пределах от 46 до 54 с.

Постановка задачи оптимизации управления ленточным дозатором в условиях неопределенности: при заданной структуре объекта управления (рис. 1) Синтезировать регулятор $W_{pm}(s)$, который обеспечивает следующие требования:

- время чистого запаздывания τ находится в пределах – от 46 до 54 с,
- перерегулирование отсутствует,
- время регулирования и время переходного процесса должны быть минимальными.

Построим Simulink-модель в соответствии со структурной схемой, представленной на рис. 2.

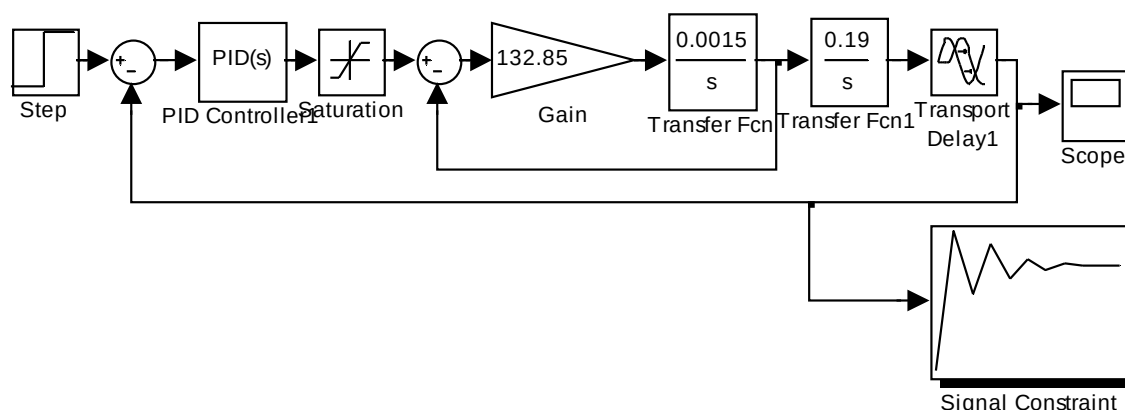


Рисунок 2 - Модель системы управления ленточным дозатором с оптимизатором

Модель системы управления ленточным дозатором (рис. 2) представляет собой замкнутую структуру, состоящую из следующих компонентов:

- контур регулирования положения заслонки, которому в модели соответствуют усилитель (блок Gain), интегратор (блок Transfer Fcn), цепь обратной связи и узел сравнения;
- передаточная функция транспортера $W_m(s) = \frac{0.19}{s} e^{-50s}$, которой в модели соответствуют интегратор (блок Transfer Fcn1) и звено запаздывания (блок Transport Delay);
- ПИД - регулятор (PID Controller);
- звено ограничения угла поворота вала заслонки (блок Saturation);
- цепь обратной связи и узел сравнения;
- источник входного сигнала (блок Step);
- осциллограф (блок Scope);

- блок Signal Constrain, предназначенный для настройки ПИД-регулятора.

Для решения поставленной задачи:

- инициализируем в командном окне MATLAB переменную $t_0 = 50$ с;
- в блоке Transport Delay в качестве параметра Time Delay введем переменную t_0 ;
- В рабочем окне блока Signal Constrain, зададим переменную t_0 , ее верхнюю (54 с) и нижнюю (46 с) границы.
- В качестве варьируемых переменных укажем параметры ПИД-регулятора K_p , K_i , K_d .

Иллюстрация процесса оптимизации приведена на рис. 3.

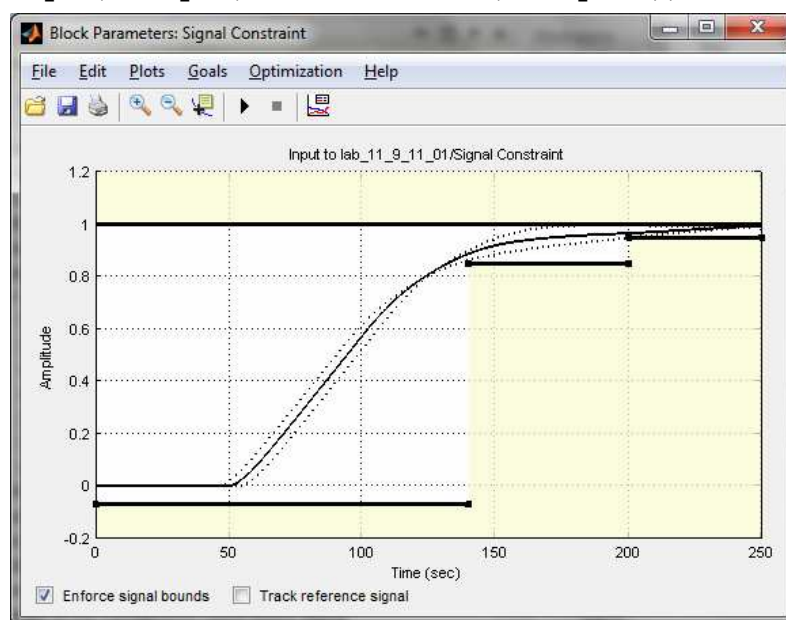


Рисунок 3 - Иллюстрация процесса оптимизации при наличии неопределенных параметров

По окончании процесса оптимизации, оптимальные значения настраиваемых переменных, соответствующих окончательным кривым, сохраняются в рабочем пространстве MATLAB: $K_p = 0.0663$, $K_i = 0$, $K_d = 1.643$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зворыкин В.Б., Михалев А.И. Станциц Г.Ю. Моделирование переходных процессов в системах с запаздыванием. Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. – Выпуск 6, 2014.

ЙМОВІРНІСНІ ЗАДАЧІ ПРО ВКЛАДЕНІ ШАБЛОНИ В ОБЛАСТІ ГАРМОНІЧНОСТІ

Анотація. В роботі описані нові ймовірнісні задачі про квадрати, випадково вкладені в основний (стандартний) квадрат. Встановлені особливі властивості перехідних ймовірностей поширені на випадкові блукання з багатьма стартами в симплексі.

Ключові слова: випадкові блукання, перехідні ймовірності, математичне сподівання, мультиплекс, симплекс.

Постановка проблеми. Випадкові блукання є найпростішим класом випадкових процесів, що достатньо багаті, щоб слугувати змістовними моделями багатьох явищ, що вивчаються різними розділами природничих та технічних наук. Крім того, часто формулювання задач та різні методи їх розв'язання доцільно випробувати на випадкових блуканнях. Математична модель випадкових блукань з багатьма стартами відповідає фізичній моделі випадкових блукань, в якій відсутні ефекти взаємодії між блукаючими частинками, зокрема, відсутній ефект стикання блукаючих частинок в одному вузлі. Так за умови знаходження в одному вузлі кількох блукаючих частинок визначає модель блукань що має застосування у прикладних областях. Наприклад, при дослідженні явища самодифузії у кристалах з вакансійним механізмом припускають можливість існування в одному вузлі кількох вакансій. Обчислювальні схеми, що містять елементи рандомізованих обчислень, відносять до родини методів Монте-Карло. Правило обчислення перехідних ймовірностей є головним питанням схематизації випадкових блукань, а отже існує проблема оптимізації даних схем.

Аналіз попередніх публікацій й постановка задачі. Першим алгоритмом прискорення методу Монте-Карло є алгоритм "блукання по сферах (колах)", який дозволяє знаходити розв'язок задачі Діріхле для рівняння Лапласа. Цей алгоритм запропонований Дж.Брауном та обґрунтований М.Маллером [1]. При напівдискретній реалізації цей

алгоритм природним чином переходить в алгоритм "блукання по вершинах правильних багатокутників (або багатогранників, у залежності від вимірності задачі)". За наявності сітки або графу підходящої регулярної структури отримуємо аналогічний алгоритм дискретних випадкових блукань. При дискретно заданих граничних умовах задача відновлення гармонічної функції розв'язується за допомогою симетричних випадкових блукань з вузлами, що поглинають блукаючі частинки. Зрозуміло, що цей факт цілком виправдовує спроби змоделювати випадкові блукання по дискретних елементах з певною геометрією.

У той же час, на момент початку досліджень, ми не знайшли у літературі системного дослідження властивостей випадкових блукань, що починаються у точках, визначених вершинами багатокутників, що вкинуті випадковим чином в області блукань. Викладені нижче дослідження спираються на встановлені закономірності [3,4]: використання локальних координат у схемах випадкових блукань у межах дискретних елементів дає можливість теоретичного визначення перехідних ймовірностей; властивість рівності перехідної ймовірності з довільної точки симплексу або мультиплексу (K) у вузол цього елемента (M_i) значенню базисної функції $N_i(\xi_k; \eta_k)$, пов'язаної з даним вузлом, у точці старту блукань: $P(K \rightarrow M_i) = N_i(\xi_k; \eta_k)$.

Основна частина. В [5] розглянута ймовірнісна задача на трикутнику Тернера. В даній роботі розглянемо задачу на квадраті, в якій покажемо, що при концентричному або випадковому вкладанні квадратів сума перехідних ймовірностей з вершин цих квадратів M_k ($k = \overline{1,4}$) в будь-яку вершину A_i ($i = \overline{1,4}$) основного квадрата є величина постійна, рівна одиниці:

$$\sum_{k=1}^4 P_i(M_k) = 1, \quad i = \overline{1,4} \quad (1)$$

Також встановимо принцип розташування сукупностей точок в квадраті, щоб виконувалася рівність (1).

Випадковий квадрат з вершинами M_k ($k = \overline{1,4}$) будемо називати вкладеним в основний квадрат з вершинами A_i ($i = \overline{1,4}$), якщо будь-яка вершина M_k лежить всередині (можливо, на границі) основного квадрата. Вважається, що вкладені квадрати мають

спільний барицентр. При цьому розглянемо наступні способи вкладання: концентричний, ексцентричний.

Скористаємося ймовірнісно-геометричною моделлю несіткового метода Монте-Карло [6]. Розглянемо блукання з чотирма стартами M_k ($k = \overline{1,4}$) і поглинаючими вузлами A_i ($i = \overline{1,4}$) в вершинах квадрата. Сформулюємо правила випадкових блукань: частинки стартують з точок M_k ($k = \overline{1,4}$) з ймовірністю переходу $P_i(M_k)$ в вершину A_i . Вплив випадкових факторів обумовлено розширенням або стисненням квадратів до барицентру, а також їх поворотом навколо барицентру.

Випадок перший – чотири точки старту суміщені в центрі (рис.1а). Ймовірність переходу частинок з M_k у вузол A_i дорівнює $\frac{1}{4}$. Для отримання ймовірностей переходу з M_k ($k = \overline{1,4}$) в вершину

A_i використовуємо теорему додавання ймовірностей: $\sum_{k=1}^4 P_{1,k} = 1$. Аналогічними будуть вирази для інших трьох вершин, узагальнюючи всі вершини, отримаємо рівність 1.

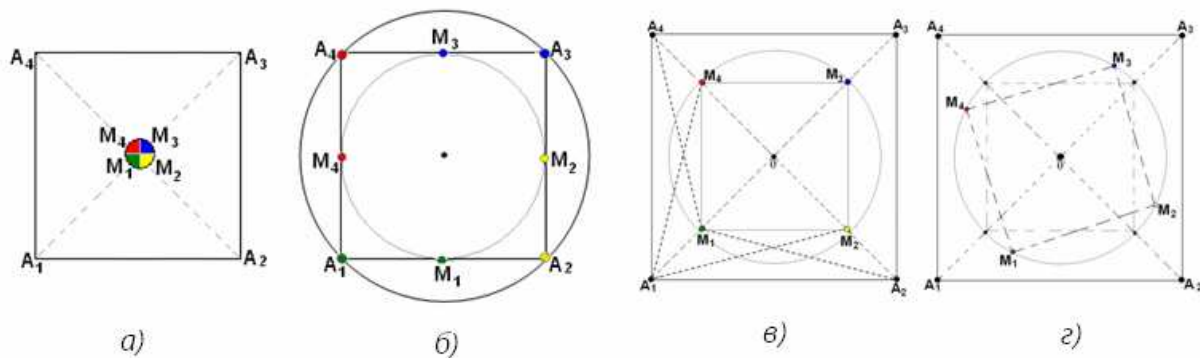


Рисунок 1 - Схема блукань з чотирма стартами (концентричне вкладання)

Розглянемо випадок, коли чотири точки старту лежать на описаному колі і при цьому співпадають з вершинами основного квадрата (рис.1б), тоді $P_1(M_k) = 0$, ($k = 2,3,4$) $P_1(M_1) = 1$. Отже, рівність (1) справедлива для другого випадку. Будемо зменшувати коло, до тих пір поки воно не стане вписаним, точки старту тепер будуть розташовані на серединах сторін квадрату, т.б. в точках дотику кола і основного квадрата (рис.1в). Для третього випадку маємо

$P_1(M_1) = P_1(M_4) = \frac{1}{2}$, $P_1(M_2) = P_1(M_3) = 0$, отже справедлива рівність (1).

Наступний випадок – точки старту A_i ($i = \overline{1,4}$) лежать на одному з концентричних кіл, вкладених в основний квадрат, а саме точки старту розташовані на діагоналях основного квадрата, утворюючи при цьому вкладений квадрат (рис.1в). Відомо, що сума перехідних ймовірностей з заданої точки в чотири вершини постійна і дорівнює одиниці, наприклад для точки M_1 :

$$P_1(M_1) + P_2(M_1) + P_3(M_1) + P_4(M_1) = \sum_{i=1}^4 P_{i,1} = 1. \text{ Користуючись симетрією}$$

квадрата можна виконати заміну: $P_2(M_1) = P_1(M_2)$, $P_3(M_1) = P_1(M_3)$, $P_4(M_1) = P_1(M_4)$, в результаті отримаємо рівність

$$P_1(M_1) + P_1(M_2) + P_1(M_3) + P_1(M_4) = \sum_{k=1}^4 P_{1,k} = 1. \text{ Це співвідношення спра-}$$

ведливе також для випадку, коли вкладений квадрат повернути відносно основного на довільний кут (рис.1г). Узагальнюючи результати для всіх вершин квадрата, отримаємо:

$$\sum_{i=1}^4 P_i(M_k) = \sum_{k=1}^4 P_k(M_i) = 1, \quad i, k = \overline{1,4}.$$

Оже, для виконання рівності (1) необхідно, щоб всі точки старту були розташовані на вписаних або описаних концентричних колах регулярно; точки старту можна не пов'язувати з колами, а використовувати будь-який квадрат (вкладений, описаний, січний), головне щоб барицентр цього квадрата співпадав з барицентром основного квадрата (рис.2).

В процесі подальших досліджень було встановлено, що не обов'язково, щоб барицентри основного і вкладеного квадратів співпадали, т.б. можливе випадкове вкладання квадрата в мультиплекс (рис.3). На підставі імовірнісних властивостей базисних функцій стандартного квадрата доведемо наступне **твердження**:

- математичне сподівання перехідної ймовірності з вершин вкладеного випадковим чином квадрата в основний квадрат, у вершину основного квадрата дорівнює ймовірності переходу з барицентра вкладеного квадрата в вершину основного.

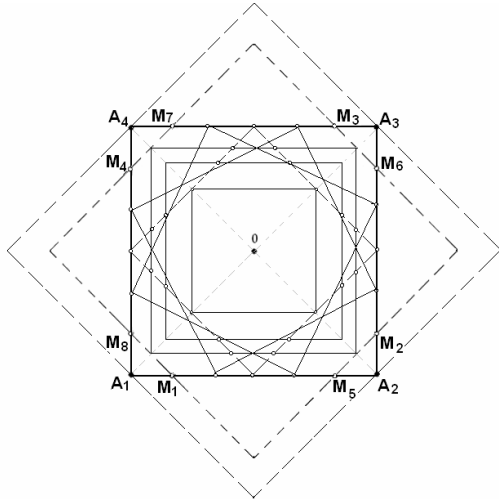


Рисунок 2 - Задача визначення
вершин вкладених квадратів

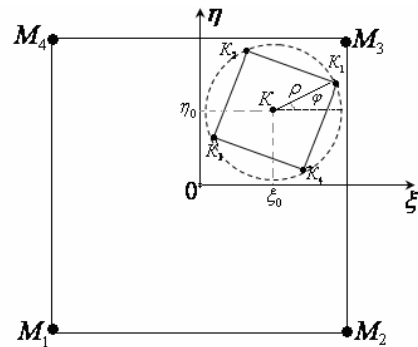


Рисунок 3 - Випадкове
вкладання квадрата

Доведення. Нехай квадрат $K_1K_2K_3K_4$ випадковим чином вклядено в основний квадрат $M_1M_2M_3M_4$. З основним квадратом зв'яжемо локальну систему координат $(\xi; \eta)$, а з вкладеним - полярну систему координат $(\rho; \phi)$ (рис.3). $K(\xi_0; \eta_0)$ - барицентр квадрата $K_1K_2K_3K_4$. Вершини вкладеного квадрата (точки старту), мають наступні координати:

$$K_1(\xi_0 + \rho \cos \phi; \eta_0 + \rho \sin \phi);$$

$$K_2(\xi_0 + \rho \cos(\phi + \frac{\pi}{2}); \eta_0 + \rho \sin(\phi + \frac{\pi}{2}));$$

$$K_3(\xi_0 + \rho \cos(\phi + \pi); \eta_0 + \rho \sin(\phi + \pi));$$

$$K_4(\xi_0 + \rho \cos(\phi + \frac{3}{2}\pi); \eta_0 + \rho \sin(\phi + \frac{3}{2}\pi)).$$

Застосовуючи формули приведення, маємо:

$$K_1(\xi_0 + \rho \cos \phi; \eta_0 + \rho \sin \phi); \quad K_3(\xi_0 - \rho \cos \phi; \eta_0 - \rho \sin \phi);$$

$$K_2(\xi_0 - \rho \sin \phi; \eta_0 + \rho \cos \phi); \quad K_4(\xi_0 + \rho \sin \phi; \eta_0 - \rho \cos \phi).$$

Базисні функції стандартного квадрата (мультиплекса):

$$N_1 = \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 - \eta),$$

$$N_2 = \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 - \eta),$$

$$N_3 = \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 + \eta),$$

$$N_4 = \frac{1}{4}(1 - \xi)(1 + \eta).$$

Ці функції мають чітко виражені імовірнісні властивості:

$$0 \leq N_i(\xi, \eta) \leq 1, \quad \sum_{i=1}^4 N_i(\xi, \eta) = 1, \quad \text{отже} \quad N_i(\xi_k, \eta_k) \quad (i = \overline{1, 4}) \quad - \quad \text{визначає}$$

ймовірність переходу частинки з точки $K(\xi_k; \eta_k)$ $k = \overline{1, 4}$ у граничний вузол мультиплекса: $P(K \rightarrow M_i) = N_i(\xi_k; \eta_k)$. Для першого вузла:

$$\sum_{k=1}^4 P_1(K_k) = \sum_{k=1}^4 N_1(\xi_k; \eta_k).$$

Математичне сподівання переходу блукаючої частинки з довільної вершини в вузол M_1 :

$$m_1 = \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 N_1(\xi_k; \eta_k) = \frac{1}{4} (1 - \eta_0 - \xi_0 + \xi_0 \eta_0) = \frac{1}{4} (1 - \xi_0)(1 - \eta_0) = N_1(K).$$

Аналогічно можна довести справедливості твердження для M_2, M_3, M_4 узагальнивши які, маємо $m_i = \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 N_i(\xi_k; \eta_k) = N_i(K)$.

Отриманий результат дозволяє формувати нові ймовірнісні задачі на квадратах з білінійною інтерполяцією, а саме отримання прискорених схем випадкових блукань з багатьма стартами по мультиплексах, "блукання" по вершинах правильних багатокутників (рис.3) (або багатогранників).

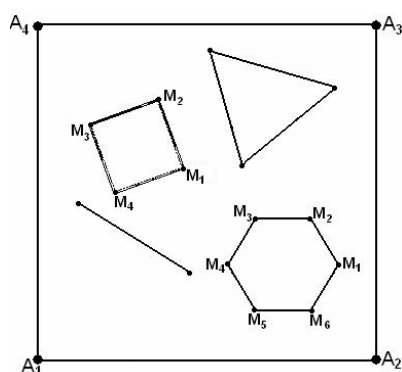


Рисунок 3 - Випадкові вкладання геометричних об'єктів

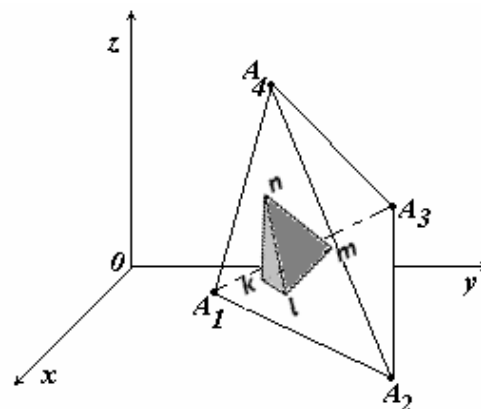


Рисунок 4 - Тривимірний симплекс

Розглянемо випадкову вибірку з тетраедрів з загальним барицентром M_0 , які вкладені в основний тетраедр. Вершини вкладеного тетраедра позначимо через k, l, m, n .

Твердження. Математичне сподівання перехідної ймовірності з вершини вкладеного тетраедра в вершину основного тетраедра дорівнює ймовірності переходу з барицентра вкладеного тетраедра у вказану вершину основного тетраедра.

Доведення. Нагадаємо, що ймовірність випадкового переходу з внутрішньої точки “ k ” основного тетраедра в його вершину “ i ” визначається значенням базисної функції $\xi_i(k) = \xi_i(x_k, y_k, z_k)$. Враховуючи геометрично-ймовірнісний дуалізм базисної функції, обчислимо безпосередньо середнє значення (математичне сподівання) перехідних ймовірностей по 4-ом маршрутам, прокладеним з вершин k, l, m, n вкладеного тетраедра в вершину A_1 основного тетраедра, як геометричну ймовірність – через об’єми відповідних частин тетраедра: Δ - об’єм тетраедра $A_1A_2A_3A_4$; Δ_l - об’єм тетраедра $MA_2A_3A_4$, Δ_m - об’єм тетраедра $MA_1A_3A_4$, Δ_n - об’єм тетраедра $MA_1A_2A_4$, Δ_k - об’єм тетраедра $MA_2A_3A_1$.

$$\overline{P_1} = \frac{0,25}{\Delta} (\Delta_k + \Delta_l + \Delta_m + \Delta_n) =$$

$$= \frac{0,25}{\Delta} \begin{vmatrix} 4 & x_k + x_l + x_m + x_n & y_k + y_l + y_m + y_n & z_k + z_l + z_m + z_n \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} = \frac{\Delta_0}{\Delta} = \xi_1(M_0),$$

де $x_0 = \frac{x_k + x_l + x_m + x_n}{4}$, $y_0 = \frac{y_k + y_l + y_m + y_n}{4}$, $z_0 = \frac{z_k + z_l + z_m + z_n}{4}$ - координати барицентра вкладеного тетраедра.

Аналогічно, $\overline{P_2} = \xi_2(M_0)$; $\overline{P_3} = \xi_3(M_0)$; $\overline{P_4} = \xi_4(M_0)$.

Локальні координати точки симплексу можна інтерпретувати ще і як відстань від цієї точки до відповідної сторони симплексу. Тому твердження можна переформулювати наступним чином.

НАСЛІДОК. Математичне сподівання відстані від вершини вкладеного тетраедра до будь-якої грані основного тетраедра дорівнює відстані від цієї ж грані до барицентру вкладеного тетраедра.

Висновок. Отриманий результат дозволяє проводити різноманітні узагальнення задачі Бюффона від випадкового вкладання геометричних об’єктів (відрізка, n -кутника) в скінченний елемент, в цьому випадку вершини n -кутників розглядаються як точки старту одночасних випадкових блукань частинок. У схемах випадкових блукань для вказаних задач доцільним і виправданим є наближення кіл правильними багатокутниками, а сфер – правильними багатогранниками. Крім того встановлені властивості дозволяють бу-

дувати економічні схеми одночасних випадкових блукань по k -вимірним симплексам.

ЛІТЕРАТУРА

1. Соболев И.М. Численные методы Монте-Карло/И.М. Соболев. -М.: Наука, 1973. –312 с.
2. Хомченко Б.А. Ймовірнісні моделі та алгоритми зваженого усереднення параметрів в інформаційних технологіях відновлення функцій: Дис...канд. техн. наук: 05.13.06. –Херсон, 2000.- 200 с.
3. Валько Н.В. Ймовірнісні моделі і методи барицентричного усереднення граничних потенціалів: Дис...канд. Фіз.-мат. наук: 01.05.02. –Дніпропетровськ, 2005.- 170 с.
4. Астионенко И.А., Хомченко А.Н. Вероятностные задачи на треугольнике Тернера // Теорія та методика навчання математики, фізики, інформатики: Зб. наук. праць. – Кривий Ріг: НМетАУ, 2006. – Вип.VI., Т.1. – С. 299 – 302
5. Хомченко А.Н., Тулущенко Г.Я. Ймовірнісна інтерпретація рекурентної процедури побудови базисних функцій трикутних скінченних елементів // Геом. та комп'ют. моделювання. Зб. наук. праць. – Вип..16. – Харків: ХДУХТ, 2007. – С.22-29.

O.I. Syrotkina

THE APPLICATION OF SPECIALIZED DATA STRUCTURES FOR SCADA DIAGNOSTICS

Abstract. The general characteristics and working methods relating to the specialized data structure template, such as m -tuples based on the ordered set of arbitrary power are considered in the paper. This structure has been applied during the diagnostic model research for the diagnosis search area on the classification space of the Expert System knowledge base. The method for determining the functional dependency between element index of ordered set that is subset of base set power and m -tuple of base set indexes is examined in detail. The example of the software screenshot designed to the work with m -tuples is given. The advantages of working with this specialized structure to increase the efficiency of intellectual operations for SCADA diagnostics are shown.

Keywords: diagnostics, fault tolerance, SCADA, data organization structure, m -tuples.

Problem statement. At this time, SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) systems are widely spread due to the intensification of production, implementation of the high technologies and the increasing complexity of the technological process and equipment [1, 2]. The distinctive feature of this system class is a supervisory control based on HMI (Human Machine Interface). The system reliability is not only affected by hardware-software safety and effectiveness of the control algorithms of TCO (Technological Control Object), but also the validity of actions performed by operators to elaborate the system diagnostic messages. This inappropriate diagnostic subsystem work leads to the time deficit, emergency situations and unscheduled downtimes.

According to high requirements to ensure the safety of production, there is an actual task to improve the methods of SCADA diagnostics in real time. One of the ways to solve this problem is the development of the independent outside automated “expert” based on the methodology of Expert Systems. It allows for a reduction in the flow of diag-

nostic messages directed to operator and for providing comprehensive, preprocessed diagnostic information. In that regard, the accuracy and effectiveness of operator actions of SCADA work are increased. Also, the reliability and fault tolerance of system are raised.

Analysis of publications on the topic research

Analysis of the diagnosis subsystems of well-known SCADA systems such as WinCC (Siemens, Germany), SPPA-T3000 (Siemens, Germany) and Genesis 32 (Iconics, USA) [3, 4, 5] allows us to draw an important conclusion. This is that as a rule, automated maintenance of SCADA systems can be performed by using “hot” backups of systemically important units, with automatic switching to reserve equipment in case of failure.

User interface proposed by the diagnostic subsystems of the most common SCADA displays vast amounts of diagnostic information to monitor the states and analyze errors. However, the low-level system diagnostics are usually presented similar to the service that is provided by utilities and operating system functions and developmental environments.

It is easier to analyze diagnostic information about some possible reasons of failure by using built-in system diagnostic mechanisms that trace errors and provide memory dumps. However, even by using software debuggers it is difficult to track periodically occurring errors due to the mistiming of interaction between two or more SCADA real time processes in the wide area network.

At this time, the Expert System methodology is not widely used in diagnostic subsystems of the most common SCADA.

At the same time, many developing toolkits for Expert Systems, such as Expert System shells, specialized environments and programming languages are proposed to professionals [6].

Among the best known Expert System shells, there are such as G2 (Gensym, USA), TDC Expert (Honeywell, USA), RT Expert (Integrated Systems Inc., USA), ILOG Rules (ILOG, France) [7].

The distinctive feature of the Expert System methodology usage for SCADA diagnostic subsystems is the application of both algorithmic methods and heuristic methods, the possibility of application methods that allows forming accurate logical conclusion under conditions of uncertainty [8].

Formulation of aims of the article

The purpose of the article is development of specialized data structure template such as m -tuples based on the ordered set of arbitrary power. This structure is applied to form the diagnosis search area on the classification space of the Expert System knowledge base for SCADA failure diagnostics. The task statement and diagnostic model using Expert System methodology are described in detail by the author in the paper [9].

Main part of the article

Suppose we have a finite base set X which is in ascending order:

$$X = \{x_1, \dots, x_i, x_{i+1}, \dots, x_n\} = \{x_i \mid 1 \leq i \leq n, \forall i \in [1, n) \rightarrow x_i < x_{i+1}\},$$

where i – sequential number of element x of the set X ; $n = |X|$ – number of elements or power of set X ; $<$ – comparison operator of the set X elements that might be defined depending on the element type of the set X ; 2^X – set of all subsets of X ; $|2^X| = 2^n$ – power of set of all subsets.

$$2^X = \{\emptyset, Y_1^n, \dots, Y_m^n, \dots, Y_n^n\} = \left\{ Y_m^n \mid 1 \leq m \leq n, k_m^n = |Y_m^n| = \frac{n!}{(n-m)! \cdot m!} \right\},$$

where Y_m^n – subset of the set of all subsets, the elements of which are m -tuples containing the elements of set X . These elements are sorted by using a right-handed search of their indexes in m -tuples, beginning from the lower boundary of index value, changing to the upper one; k_m^n – power of the subset Y_m^n .

$$Y_m^n = \{y_{m,j}^n \mid y_{m,j}^n = (x_{i_1}, \dots, x_{i_\eta}, \dots, x_{i_m}), 1 \leq \eta \leq m, \alpha_{m,\eta}^n \leq i_\eta \leq \beta_{m,\eta}^n, \alpha_{m,\eta}^n = \eta,$$

$$\beta_{m,\eta}^n = n - m + \eta, \forall \eta \in [1, m) \rightarrow x_{i_\eta} < x_{i_{\eta+1}}\},$$

where $y_{m,j}^n$ – m -tuple; It is an element of set Y_m^n that contains the elements of base set X ; m – tuple length; j – tuple index (sequential number) in set of tuples Y_m^n ; η – element index within the tuple $y_{m,j}^n$; i_η – tuple element index $y_{m,j}^n$ within the base set X ; $\alpha_{m,\eta}^n$ – lower boundary of changing i_η in m -tuple $y_{m,j}^n$; $\beta_{m,\eta}^n$ – upper boundary of changing i_η in m -tuple $y_{m,j}^n$.

Suppose we have a set of indexes I which is in ascending order of elements of set X ; J_m^n – a set of element indexes of set Y_m^n which is in ascending order; I_m^n – a set of index tuples of base elements which correspond to tuples of set Y_m^n ; $i_{m,j}^n$ – a tuple of indexes of base elements in the tuple $y_{m,j}^n$.

$$I = \{1, 2, \dots, n\} = \{i \mid 1 \leq i \leq n\},$$

$$J_m^n = \{1, 2, \dots, k_m^n\} = \{j \mid 1 \leq j \leq k_m^n\},$$

$$I_m^n = \{i_{m,1}^n, i_{m,2}^n, \dots, i_{m,k_m^n}^n\} = \{i_{m,j}^n \mid i_{m,j}^n = (i_1, \dots, i_\eta, \dots, i_m), \quad 1 \leq j \leq k_m^n, \quad i_\eta \in I,$$

$$1 \leq \eta \leq m, \quad \eta \leq i_\eta \leq n - m + \eta, \quad \forall \eta \in [1, m) \rightarrow i_{\eta+1} - i_\eta \geq 1\}.$$

Consider the example of expansion of the set of all subsets 2^X into the sets Y_m^n for $n=7$ (see Tab. 1).

Table 1

Representation the set of all subsets 2^X by using sets Y_m^n for $n=7$

m	Y_m^n	k_m^n
1	$Y_1^7 = \{a, b, c, d, e, f, g\}$	7
2	$Y_2^7 = \{(a, b), (a, c), (a, d), (a, e), (a, f), (a, g), (b, c), (b, d), (b, e), (b, f), (b, g), (c, d), (c, e), (c, f), (c, g), (d, e), (d, f), (d, g), (e, f), (e, g), (f, g)\}$	21
3	$Y_3^7 = \{(a, b, c), (a, b, d), (a, b, e), (a, b, f), (a, b, g), (a, c, d), (a, c, e), (a, c, f), (a, c, g), (a, d, e), (a, d, f), (a, d, g), (a, e, f), (a, e, g), (a, f, g), (b, c, d), (b, c, e), (b, c, f), (b, c, g), (b, d, e), (b, d, f), (b, d, g), (b, e, f), (b, e, g), (b, f, g), (c, d, e), (c, d, f), (c, d, g), (c, e, f), (c, e, g), (c, f, g), (d, e, f), (d, e, g), (d, f, g), (e, f, g)\}$	35
4	$Y_4^7 = \{(a, b, c, d), (a, b, c, e), (a, b, c, f), (a, b, c, g), (a, b, d, e), (a, b, d, f), (a, b, d, g), (a, b, e, f), (a, b, e, g), (a, b, f, g), (a, c, d, e), (a, c, d, f), (a, c, d, g), (a, c, e, f), (a, c, e, g), (a, c, f, g), (a, d, e, f), (a, d, e, g), (a, d, f, g), (a, e, f, g), (b, c, d, e), (b, c, d, f), (b, c, d, g), (b, c, e, f), (b, c, e, g), (b, c, f, g), (b, d, e, f), (b, d, e, g), (b, d, f, g), (b, e, f, g), (c, d, e, f), (c, d, e, g), (c, d, f, g), (c, e, f, g), (d, e, f, g)\}$	35
5	$Y_5^7 = \{(a, b, c, d, e), (a, b, c, d, f), (a, b, c, d, g), (a, b, c, e, f), (a, b, c, e, g), (a, b, c, f, g), (a, b, d, e, f), (a, b, d, e, g), (a, b, d, f, g), (a, b, e, f, g), (a, c, d, e, f), (a, c, d, e, g), (a, c, d, f, g), (a, c, e, f, g), (a, d, e, f, g), (a, e, f, g)\}$	21

	$(b, c, d, e, f), (b, c, d, e, g), (b, c, d, f, g), (b, c, e, f, g), (b, d, e, f, g),$ $(c, d, e, f, g)\}$	
6	$Y_6^7 = \{(a, b, c, d, e, f), (a, b, c, d, e, g), (a, b, c, d, f, g), (a, b, c, e, f, g),$ $(a, b, d, e, f, g), (a, c, d, e, f, g), (b, c, d, e, f, g)\}$	7
7	$Y_7^7 = \{(a, b, c, d, e, f, g)\}$	1

Consider the example of expansion of the set Y_4^7 into the elements (see Tab. 2).

Table 2

Expansion of the set Y_4^7 into the elements

J_4^7	Y_4^7	$I_{m,j}^n$			
		i_1	i_2	i_3	i_4
1	(a, b, c, d)	1	2	3	4
2	(a, b, c, e)	1	2	3	5
3	(a, b, c, f)	1	2	3	6
4	(a, b, c, g)	1	2	3	7
5	(a, b, d, e)	1	2	4	5
6	(a, b, d, f)	1	2	4	6
7	(a, b, d, g)	1	2	4	7
8	(a, b, e, f)	1	2	5	6
9	(a, b, e, g)	1	2	5	7
10	(a, b, f, g)	1	2	6	7
11	(a, c, d, e)	1	3	4	5
12	(a, c, d, f)	1	3	4	6
13	(a, c, d, g)	1	3	4	7
14	(a, c, e, f)	1	3	5	6
15	(a, c, e, g)	1	3	5	7
16	(a, c, f, g)	1	3	6	7
17	(a, d, e, f)	1	4	5	6
18	(a, d, e, g)	1	4	5	7
19	(a, d, f, g)	1	4	6	7
20	(a, e, f, g)	1	5	6	7
21	(b, c, d, e)	2	3	4	5
22	(b, c, d, f)	2	3	4	6

23	(b, c, d, g)	2	3	4	7
24	(b, c, e, f)	2	3	5	6
25	(b, c, e, g)	2	3	5	7
26	(b, c, f, g)	2	3	6	7
27	(b, d, e, f)	2	4	5	6
28	(b, d, e, g)	2	4	5	7
29	(b, d, f, g)	2	4	6	7
30	(b, e, f, g)	2	5	6	7
31	(c, d, e, f)	3	4	5	6
32	(c, d, e, g)	3	4	5	7
33	(c, d, f, g)	3	4	6	7
34	(c, e, f, g)	3	5	6	7
35	(d, e, f, g)	4	5	6	7

Method for determining the dependency $j \rightarrow i_{m,j}^n$ that was developed by the author is proposed to consider in this paper.

We have: $X = \{x_i \mid n = |X|, 1 \leq i \leq n, \forall i \in [1, n) \rightarrow x_i < x_{i+1}\}, m, j$.

We have to find: $i_{m,j}^n = (i_1^j, \dots, i_\eta^j, \dots, i_m^j)$.

Decision:

1. Let's perform the validity of the input data: X , m and j .

$$1 \leq m \leq n,$$

$$k_m^n = \frac{n!}{(n-m)! \cdot m!},$$

$$1 \leq j \leq k_m^n, \forall i \in [1, n) \rightarrow x_i < x_{i+1}.$$

2. Let's form Tab. 3 with dimension $(m+1) \times 4$ for calculation the parameters $\alpha_{m,\eta}^n$, $\beta_{m,\eta}^n$, $\mu_{m,\eta}^n$:

$$\forall \eta \in [1, m] \rightarrow (\alpha_{m,\eta}^n = \eta, \beta_{m,\eta}^n = n - m + \eta, \mu_{m,\eta}^n = m - \eta).$$

Table 3

Variable scopes for indexes i_η

η	$\alpha_{m,\eta}^n$	$\beta_{m,\eta}^n$	$\mu_{m,\eta}^n$	1 m
1				
...	η	$n - m + \eta$	$m - \eta$	
m				

3. Let's form Tab. 4 with dimension $(\beta_{m,1}^n - \alpha_{m,1}^n + 4) \times (2m + 1)$ for calculation the parameters $C_{n-i_\eta}^{m-\eta}$, that define the count of elements of the set Y_m^n . These elements were deducted by using ordered a right-handed search of their indexes i_η in the scope:

$$(\forall \eta \in [1, m]) \& (\forall i_\eta \in [\alpha_{m,\eta}^n, \beta_{m,\eta}^n]) \rightarrow C_{n-i_\eta}^{m-\eta} = \frac{(n - i_\eta)!}{((n - i_\eta) - (m - \eta))! \times (m - \eta)!}.$$

Table 4

Table for calculation the parameters $C_{n-i_\eta}^{m-\eta}$

η	1		2		...		m		1
$\mu_{m,\eta}^n$	$m - 1$		$m - 2$		...		0		2
i_η	i_1	$C_{n-i_1}^{m-\eta}$	i_2	$C_{n-i_2}^{m-\eta}$	...	...	i_m	$C_{n-i_m}^{m-\eta}$	3
$\alpha_{m,\eta}^n$	$\alpha_{m,1}^n$	$C_{n-\alpha_{m,1}^n}^{m-1}$	$\alpha_{m,2}^n$	$C_{n-\alpha_{m,2}^n}^{m-2}$	...	...	$\alpha_{m,m}^n$	1	} $\beta_{m,1}^n - \alpha_{m,1}^n$
...	...	...	...	...	...	...	...	...	
$\beta_{m,\eta}^n$	$\beta_{m,1}^n$	$C_{n-\beta_{m,1}^n}^{m-1}$	$\beta_{m,2}^n$	$C_{n-\beta_{m,2}^n}^{m-2}$	...	...	$\beta_{m,m}^n$	1	

4. Let's form Tab. 5 with dimension $(\beta_{m,1}^n - \alpha_{m,1}^n + 2) \times 2m$ for calculation the parameters $J_{m,\eta}^n(i_\eta)$:

Table 5

Table for calculation the parameters $J_{m,\eta}^n(i_\eta)$

i_1	$J_{m,1}^n(i_1)$	i_2	$J_{m,2}^n(i_2)$	...	...	i_m	$J_{m,m}^n(i_m)$	1
$\alpha_{m,1}^n$		$\alpha_{m,2}^n$		...	...	$\alpha_{m,m}^n$		} $\beta_{m,1}^n - \alpha_{m,1}^n + 1$
...		...		...	...	...		
$\beta_{m,1}^n$		$\beta_{m,2}^n$		...	...	$\beta_{m,m}^n$		

Calculation $J_{m,\eta}^n(i_\eta)$ for filling the Tab. 5 is performed by using the formulas (1), (2), (3).

5. Calculation i_η^j is performed by using the formulas (2), (5).

6. The rules for completing the algorithm are given in the formulas (6), (7).

The following formulas show the sequence of calculation performance:

$$J_{m,1}^n(i_1) := \sum_{\alpha_{m,1}^n}^{i_1} C_{n-i_1}^{m-1} = \begin{cases} J_{m,1}^n(i_1) := C_{n-\alpha_{m,1}^n}^{m-1}, & i_1 = \alpha_{m,1}^n \\ J_{m,1}^n(i_1) := J_{m,1}^n(i_1 - 1) + C_{n-i_1}^{m-1}, & i_1 \in (\alpha_{m,1}^n, \beta_{m,1}^n] \end{cases}, \quad (1)$$

$$i_1^j \leftarrow \min_{i_1 = \alpha_{m,1}^n}^{\beta_{m,1}^n} (J_{m,1}^n(i_1)) \geq j, \quad (2)$$

$$(\eta \in (1, m]) \rightarrow ((i_{\eta-1}^j > \alpha_{m,\eta-1}^n) ? (i_\eta := i_{\eta-1}^j, j_{\min} := J_{m,\eta}^n(i_\eta) := J_{m,\eta-1}^n(i_{\eta-1}^j - 1) : (j_{\min} := 0)), \quad (3)$$

$$(i_\eta \in (i_{\eta-1}^j, \beta_{m,\eta}^n]) \rightarrow J_{m,\eta}^n(i_\eta) := j_{\min} + \sum_{i_{\eta-1}^j+1}^{i_\eta} C_{n-i_\eta}^{m-\eta} = \begin{cases} J_{m,\eta}^n(i_\eta) := j_{\min} + C_{n-i_\eta}^{m-\eta}, & i_\eta = i_{\eta-1}^j + 1 \\ J_{m,\eta}^n(i_\eta) := J_{m,\eta}^n(i_\eta - 1) + C_{n-i_\eta}^{m-\eta}, & i_\eta \in (i_{\eta-1}^j, \beta_{m,\eta}^n] \end{cases} \quad (4)$$

$$i_\eta^j \leftarrow \min_{i_\eta = i_{\eta-1}^j+1}^{\beta_{m,\eta}^n} (J_{m,\eta}^n(i_\eta)) \geq j). \quad (5)$$

Final rules for the algorithm:

$$i_{\eta^*}^j \leftarrow (J_{m,\eta^*}^n(i_{\eta^*}) = j), \quad (6)$$

$$(\eta^* < m) \rightarrow (i_{\eta^*+h}^j := \beta_{m,\eta^*+h}^n, \quad h \in [1, m - \eta^*]) \quad (7)$$

Answer: $i_{m,j}^n = \{i_\eta^j \mid \eta \in [1, m]\}$.

The described method of determining dependency $j \rightarrow i_{m,j}^n$ for m -tuples based on the ordered set of arbitrary power was realized by using the software that is shown below (see Fig.1).

Tuples based on the ordered set of arbitrary power

Input data: $n = 7$, $m = 4$

Enter Reset

Range of indexes

i	alfa	beta
i1	1	4
i2	2	5
i3	3	6
i4	4	7

Table for calculation of the number of index combinations

i	i1	C(i1)	i2	C(i2)	i3	C(i3)	i4	C(i4)
alfa(i)	1	20	2	10	3	4	4	1
	2	10	3	6	4	3	5	1
	3	4	4	3	5	2	6	1
beta(i)	4	1	5	1	6	1	7	1

Input data for algorithm: $k = 35$, $j = 22$

Calculate Reset

Table for calculation of the algorithm

i	i1	J(i1)	i2	J(i2)	i3	J(i3)	i4	J(i4)
alfa(i)	1	20	2	20	3	20	4	20
	2	30	3	26	4	23	5	21
	3	-	4	-	5	-	6	22
beta(i)	4	-	5	-	6	-	7	-

Output data: Tuple of indexes

Index	Value
i1	2
i2	3
i3	4
i4	6

Figure 1 - Software screenshot for working with m -tuples

Conclusions and recommendations for further research

The described method of working with m -tuples based on the ordered set of arbitrary power allows us to significantly reduce the system resources spent for storing and processing the big data arrays. It allows for a generation in any m -tuple by using some consequence of formal rules. It should also be noted that the input data of the diagnostic subsystem of SCADA system are complex data structures. The proposed method minimizes the data processing duration due to the proposed indexation that allows us to work with the sequence of natural numbers instead of complex data structures.

The application of proposed specialized data structure during the formation diagnosis search area on the classification space of Expert System knowledge base allows us to increase the performance of intellectual operations, reduce the time of executing the procedures of conflict resolutions. Also, it allows for easily reconfiguration in the formal knowledge structures that may significantly reduce the time spent on the determining diagnosis about SCADA technical state.

As future-oriented studies in the given direction can be recommended for the development of strategies for working with the Expert System knowledge base with using data organization structure that was considered above for SCADA diagnostics.

REFERENCES

1. Stouffer K. Guide to supervisory control and data acquisition (SCADA) and industrial control systems security. // Recommendations of the National Institute of Standards and Technology. NIST Special publication 800-82 / Eds.: K. Stouffer, J. Falco, and K. Kent. — Gaithersburg, 2006. — 164 p.
2. Kudlak B.I. Purposes and base functions of SCADA, (2015), available at: <http://votum.ua/old/uk/publications/scada.htm> (accessed March 12, 2015).
3. Siemens. User manual SPPA-T3000. Diagnostic system / Siemens AG. — Erlangen, 2009. — 251 p.
4. The official site of SIMATIC WinCC SCADA System, (2015), available at: <http://automation.siemens.com> (accessed March 12, 2015).
5. The official site of Genesis32 SCADA system, (2015), available at: <http://iconics.com> (accessed March 12, 2015).
6. Giarratano J. Expert Systems: principles and programming/ J. Giarratano, G. Riley. — Moscow: Publishing house “Williams”, 2007. — 1152 p. (in Russian).
7. Popov E.V. Real time Expert Systems / E.V. Popov // Open Systems. 1995. — No. 2. available at: <http://www.osp.ru/os/1995/02/178608/> (accessed March 12, 2015, in Russian).
8. Jackson P. Introduction to Expert Systems / P. Jackson. — Moscow: Publishing house “Williams”, 2001. — 624 p. (in Russian).
9. Syrotkina O.I. Formation of the classification space of the Expert System knowledge base for SCADA failure diagnostics // Power Engineering, Control and Information Technologies in Geotechnical Systems. — 2015. — P. 179-184.

Т.В. Кожанов

ПРОИЗВОДСТВО АГЛОМЕРАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДОМЕННЫХ И СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ШЛАМОВ

Аннотация. По результатам проведенных экспериментов и расчетов, предложено оптимальное соотношение основных компонентов агломерационной шихты и максимально допустимое содержание шламов для достижения максимальной производительности аглоустановки и качества агломерата.

Ключевые слова: производство агломерата, окомкование, спекание, шламы, производительность аглоустановки, качество агломерата.

Введение

Утилизация железосодержащих шламов при агломерации железорудных материалов представляет одно из наиболее экономичных направлений повышения эффективности производства и снижения себестоимости агломерата. Сложность с точки зрения подготовки шихтовых материалов представляет использование заскладированных металлургических шламов [1]. В процессе длительного пребывания на складах шламы слеживаются, их поверхность высыхает. В результате образуются прочные гранулы шламов, которые не разрушаются по всей технологической линии подготовки аглошихты и попадают на паллеты агломерационных машин, где нарушается технология спекания [2].

Постановка проблемы и состояние вопроса

Современная технология агломерации предъявляет повышенные требования к качеству подготовки спекаемых материалов. Вовлечение в сферу окускования железосодержащих отходов, в том числе и заскладированных шламов, приводит к усложнению технологии подготовки и условий смешивания и окомкования аглошихты. Наилучшим образом смешиваются частицы одинаковой крупности, влажности и формы. Поэтому гомогенизация агломерационной шихты и последующее гранулообразование в барабанах-окомкователях будут за-

висеть от степени однородности гранулометрического и химического составов компонентов шихты [3].

Основные результаты исследований

Для исследования влияния шламов - доменных и конвертерных на показатели процесса спекания, а также на прочность готового агломерата, в лабораторных условиях проводились исследования.

Подготовка шихтовых материалов проводилась следующим образом. Смешивание шихты осуществлялось в поддоне, путем послойной укладки материалов с последующим перемешиванием слоев между собой до получения однородной массы шихты.

Спекание окомкованной шихты проводилось на лабораторной агломерационной установке. Загрузка осуществлялась вручную, соблюдая равномерность и однородность укладки материала на слой постели массой 200 г из возврата фракции 5-10 мм. Высота спекаемого слоя - 300 мм. Разрежение в вакуум-камере на момент зажигания - 500 мм. в. ст. Продолжительность зажигания - 1 мин. Температура зажигания - 1200 °С. В процессе спекания каждые 30 с. фиксировались разрежение и температура в вакуум-камере. Спекание проводилось до достижения максимальной температуры в вакуум-камере. Масса агломерационного спека взвешивалась, после чего определялся выход годного агломерата (масса и процентное соотношение фракции +10 мм к массе спека).

Далее проводилось вычисление вертикальной скорости спекания по формуле:

$$V_{\text{сп.}} = h/t_{\text{сп.}}, \text{ мм/мин} \quad (1)$$

где h - высота слоя шихты, мм; $t_{\text{сп.}}$ - время спекания, мин
и производительности установки по формуле:

$$\text{Пр.} = (G * 60)/(1000 * t_{\text{сп.}} * f), \text{ т/м}^2 * \text{ час} \quad (2)$$

где G - выход годного агломерата, кг; f - площадь спекания, м².

Испытание готового агломерата на прочность производилось по стандартной методике – рассев пробы годного агломерата массой 1,5 кг, после 4 сбрасываний в копре, на фракции 0-5 мм, 5-10 мм и +10 мм.

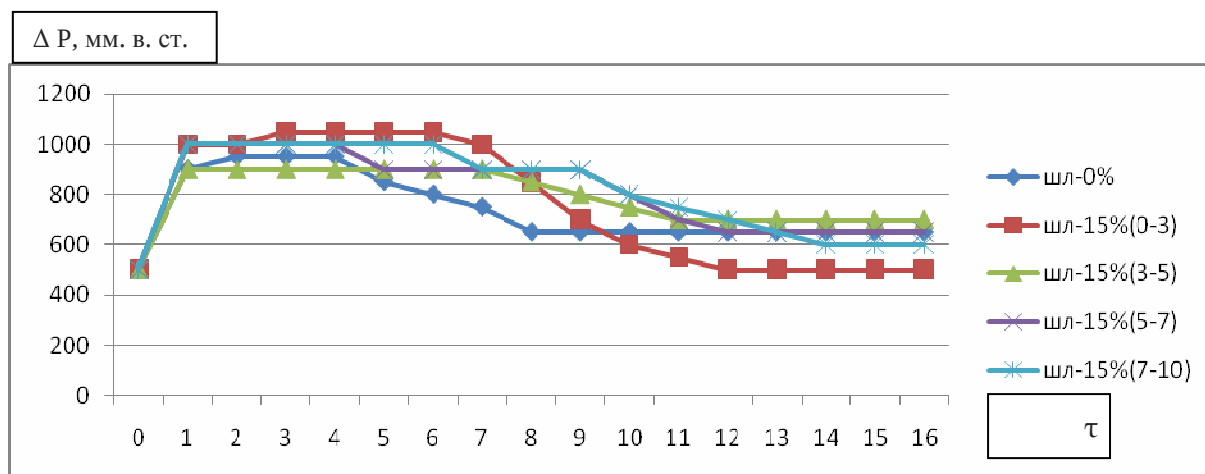


Рисунок 1 - График изменения разрежения
в вакуум-камере в процессе спекания

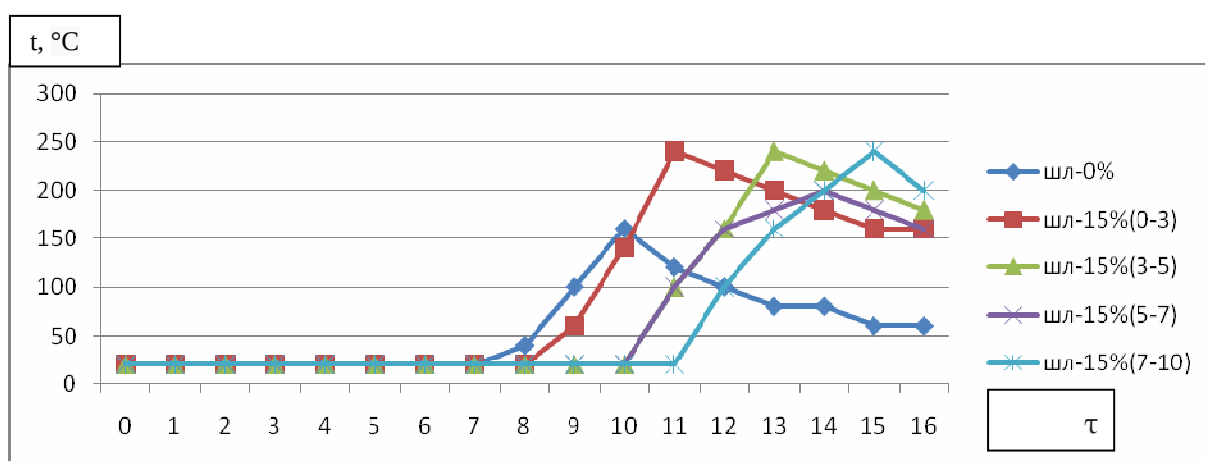


Рисунок 2 - График изменения температуры
отходящих газов в процессе спекания

Таблица 1

№ Показатели		Показатели спеканий и прочности готового агломерата				
		Характеристики экспериментов				
		Шихта 1	Шихта 2	Шихта 3	Шихта 4	Шихта 5
1	Расход шламов, %	0	15	15	15	15
2	Крутность шламов, мм	-	0-3	3-5	5-7	7-10
3	Загружено шихты, %	100	100	100	100	100
4	Выход твердого, %	90,43	90,43	90,43	90,43	90,43
5	Выход годного (+10 мм), %	72,12	63,70	58,41	57,45	53,61
6	Время спекания, мин	9,5	11,0	12,0	13,5	14,5
7	Максимальная температура, °C	160	240	240	200	240
8	Рассев после испытания на прочность в копре, %	0-5 мм - 27,00 5-10 мм - 18,33 +10 мм - 54,67	0-5 мм - 37,00 5-10 мм - 16,33 +10 мм - 46,67	0-5 мм - 40,33 5-10 мм - 15,67 +10 мм - 44,00	0-5 мм - 42,00 5-10 мм - 16,00 +10 мм - 42,00	0-5 мм - 44,00 5-10 мм - 14,67 +10 мм - 41,33
9	Вертикальная скорость спекания, мм/мин	31,579	27,273	25,000	22,222	20,690
10	Производительность аглоустановки, т/м²*час	2,20	1,68	1,41	1,24	1,07

Обсуждение результатов экспериментов

Как видно из результатов экспериментов, введение шламов в состав аглошихты, отрицательно сказывается на производительности аглоустановки и прочности готового агломерата. Несмотря на значительную долю оксидов железа, топлива и флюсующих добавок, что оказывает положительное влияние на показатели агломерационного процесса, шламы вносят в аглошихту множество вредных примесей, что ограничивает их использование в доменном процессе. Кроме того, использование шламов ухудшает теплофизические характеристики аглошихты из-за их более низкой температуропроводности ($\sim 1,20 \text{ Ч } 10^{-5} \text{ мI/с}$ (поскольку соотношение в смеси доменных и конвертерных шламов $\sim 50/50$, $X_{\text{д.шл.}} \sim 1,08 \text{ Ч } 10^{-5} \text{ мI/с}$; $X_{\text{к.шл.}} \sim 1,32 \text{ Ч } 10^{-5} \text{ мI/с}$; $X_{\text{см.шл.}} = (1,08 \text{ Ч } 10^{-5} + 1,32 \text{ Ч } 10^{-5})/2 = 1,20 \text{ Ч } 10^{-5} \text{ мI/с}$) по сравнению с аглошихтой, не содержащей шламов, $\sim 1,75 \text{ Ч } 10^{-5} \text{ мI/с}$) и более высокой удельной теплоемкости ($\sim 925 \text{ Дж/кг}$ (сд.шл. $\sim 980 \text{ Дж/кг}$; ск.шл. $\sim 870 \text{ Дж/кг}$; $c_{\text{см.шл.}} = (980 + 870)/2 = 925 \text{ Дж/кг}$), по сравнению с аглошихтой, не содержащей шламов, $\sim 693 \text{ Дж/кг}$).

Ухудшением теплофизических характеристик агломерационной шихты (снижением температуропроводности, повышением удельной теплоемкости) при введении в её состав шламов, объясняется также и снижение производительности аглоустановки и прочности готового агломерата при увеличении фракции вносимых шламов, поскольку гранулы шламов обладают значительной прочностью, что позволяет им не разрушаться в процессе окомкования, а это приводит к тому, что в процессе спекания они забирают на себя значительную часть тепловой энергии, и при этом, времени пребывания в аглочаше крупным гранулам шламов все равно не достаточно для полноценного спекания, что и оказывает отрицательное влияние на производительность аглоустановки и прочность готового агломерата. Поэтому можно сделать вывод, что оптимальная фракция шламов для использования в агломерационном процессе, ведущая к минимальным потерям производительности и прочности – 0-3 мм, более крупную фракцию рекомендуется предварительно измельчать.

Однако внесение в агломерационную шихту шламов мелкой фракции имеет один существенный недостаток, который, тем не менее, компенсируется повышением производительности агломерационной установки и прочности готового агломерата. Как видно из рисун-

ка 1, при снижении крупности вносимых шламов, газопроницаемость столба шихты снижается (при внесении в аглошихту фракции шламов 0-3 мм, разрежение в вакуум-камере достигает 1050 мм.в.ст., и сохраняется на этом уровне на протяжении большей части времени спекания – аж до момента повышения температуры отходящих газов, при внесении в аглошихту фракции шламов 3-5 мм, высокое разрежение в вакуум-камере так же сохраняется до начала роста температуры отходящих газов, однако его максимальное значение достигает только 900 мм.в.ст., при внесении в аглошихту фракции шламов 5-7 мм, максимальное разрежение чуть выше – 950 мм.в.ст., однако начиная с 4-й минуты спекания оно постепенно снижается, при внесении в аглошихту фракции шламов 7-10 мм, максимальное разрежение еще выше – 1000 мм.в.ст., снижение начинается на 6-й минуте спекания, однако к окончанию спекания оно достигает более низкой отметки, наилучшие же показатели газопроницаемости показала аглошихта без добавления шламов – про максимальном значении разрежения 950 мм.в.ст., начиная с 4-й минуты спекания, наблюдается стабильная тенденция к снижению разрежения в вакуум-камере). Объясняется это попаданием значительного количества шихты мелкой фракции в аглошашу, которая заполняет межкусковое пространство между более крупными гранулами шихтовых материалов, что и затрудняет прохождение газов через столб агломерационной шихты.

А вот зависимость максимальной температуры отходящих газов во время спекания от крупности вносимых в агломерационную шихту шламов не установлена.

Выводы

1. Сравнением теплофизических свойств агломерационной шихты и смеси шламов доменного и конвертерного производств установлено, что последние обладают более низкой температуропроводностью и более высокой удельной теплоемкостью, что приводит к более медленному прогреву гранул шламов. Неспекшаяся часть крупных гранул шламов является причиной снижения газопроницаемости столба агломерационной шихты и снижения прочности готового агломерата.

2. Снижение фракции вносимых в агломерационную шихту шламов отрицательно сказывается на газопроницаемости столба шихты, однако при этом производительность агломерационной установки

и прочность готового агломерата возрастает. Объясняется это более низкой температуропроводностью и более высокой удельной теплоемкостью гранул шламов, по сравнению с агломерационной шихтой, и их высокой прочностью, что приводит к увеличению затрат тепловой энергии, недостаточному прогреву и, как следствие, неполноценному спеканию крупных гранул шламов, поэтому оптимальная фракция шламов, вносимых в агломерационную шихту – 0-3 мм, более крупную фракцию рекомендуется предварительно измельчать.

3. Зависимость максимальной температуры газов в вакуум-камере во время спекания от фракции вносимых в агломерационную шихту шламов не установлена.

ЛИТЕРАТУРА

1. Савицкая Л.И. Использование железосодержащих отходов при окисковании руд / Л.И. Савицкая // ISSN 0208-1032 / Обзорная информация / М.: Черметинформация. – 1984. – Серия: «Подготовка сырьевых материалов к металлургическому переделу и производству чугуна». - Вып. 5. - С. 27.
2. Вест Н.О. Использование железосодержащих отходов металлургического производства в повторном цикле / Н.О. Вест // Практика и тенденции / Iron and Steel International.–1976. - № 6. - Р. 173- 185.
3. Сабинин Ю.А. Оценка качества агломерата при использовании обесцинкованных шламов / Ю.А. Сабинин, А.И. Гамаюров, П.В. Левин // Издательство Института Уралмеханобр.–1984. – С. 37-46.

Л.С. Коряшкіна, А.П. Череватенко

ЗАДАЧА ПАРАМЕТРИЧНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ БАГАТОЗОННИХ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ

Антоція. В роботі розглянуто метод ідентифікації моделей динаміки, розроблений на основі поєднання методів розв'язання задач оптимального керування та неперервних задач оптимального розбиття множин. Наведений алгоритм розв'язання задач ідентифікації границь між зонами функціонування багатозонних динамічних систем та їх параметрів. Ключові слова: динамічна система, ідентифікація багатозонних систем, методи оптимального розбиття множин.

Вступ

Багато різноманітних енергоємних об'єктів, таких як теплові апарати, машини з електроприводами, технологічні установки у машинобудівній, хімічній, металургійній, будівельній промисловості, значну частку часу працюють в динамічних режимах. Зниження енергоспоживання таких об'єктів можливе за рахунок оптимального керування в різних станах їх функціонування. Сьогодні розвиток теорії аналізу та синтезу енергозберігаючого управління на множині станів функціонування, створення методів оперативного синтезу керуючих впливів динамічними режимами енергоємних об'єктів є актуальним напрямком наукових досліджень.

Робота присвячена розробці методу ідентифікації параметрів моделей динаміки енергоємних об'єктів, придатних для розв'язання задач енергозберігаючого керування [1,2]. Такі моделі можна досить точно описати системою диференціальних рівнянь з розривною правою частиною.

В даній роботі розглядається задача ідентифікації багатозонної моделі динаміки, в якій невідомими є не тільки границі між зонами функціонування об'єктів, але й деякі параметри, що впливають на стан об'єкта в межах певних зон. Як і в роботах [3,4], метод розв'язання цієї задачі використовує основні положення теорії неперервних задач оптимального розбиття множин, яка дозволяє звести

задачу нескінченновимірної програмування до задачі мінімізації недиференційовної функції декількох змінних. Але на відміну від алгоритмів, представлених в [3,4], у розробленому в даній роботі алгоритмі на кожному кроці розв'язання задачі мінімізації негладкої функції для визначення границь між зонами функціонування об'єкту розв'язується набір послідовних задач оптимального керування. При цьому розрахункові формули для останніх отримані за допомогою необхідних умов оптимальності.

Постановка задачі ідентифікації

Нехай стан деякого об'єкту характеризується двома фазовими координатами (x_1, x_2) ; Ω – множина всіх можливих його станів; $(\Omega_1, \dots, \Omega_N)$ – множини значень першої фазової координати системи, які визначають можливі зони функціонування системи; $P_N(\Omega)$ – клас всіх можливих розбиттів множини Ω на N підмножин:

$$P_N(\Omega) = \{\bar{\omega} = (\Omega_1, \dots, \Omega_N) : \bigcup_{i=1}^N \Omega_i = \Omega, \text{mes}(\Omega_i \cap \Omega_j) = 0, i \neq j, i, j = \overline{1, N}\}$$

Будемо вважати, що зміна фазових координат з часом описується наступною задачею Коші для системи диференціальних рівнянь з розривною правою частиною:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \phi(t, x; \bar{\omega}, \tau), \phi \in \Phi, \end{cases} \quad (1)$$

$$x_1(0) = x_{10}, \quad x_2(0) = x_{20}, \quad (2)$$

$\Phi = \{\phi(\cdot, \cdot; \bar{\omega}, \tau) : \phi(t, x; \bar{\omega}, \tau) = \phi_i(t, x; \tau_i) \text{ м.в. для } x \in \Omega_i, \tau_i \in \Xi, i = \overline{1, N}, \bar{\omega} \in P_N(\Omega)\}$, де функції $\phi_i(t, x; \tau_i)$, $i = \overline{1, N}$, які описують або внутрішню структуру об'єкту, або вплив зовнішніх факторів на нього в межах відповідних зон Ω_i , $i = \overline{1, N}$, містять набори параметрів τ_i , деякі з яких, а може й усі, можуть бути невідомими, $\Xi \subseteq R^{sN}$, s – вимірність кожного з векторів τ_i , $i = \overline{1, N}$.

Нехай в певні моменти часу t_k , $k = \overline{1, K}$, на проміжку $\bar{T} = [0; T]$ вимірюється значення змінної $z = \gamma_1 x_1 + \gamma_2 x_2$, де $\gamma_1^2 + \gamma_2^2 \neq 0$ – задані величини. Модель вимірювань представимо у такий спосіб:

$$\tilde{z}(t_k) = \gamma_1 x_1(t_k; \tau) + \gamma_2 x_2(t_k; \tau) + \xi_k, \quad k = \overline{1, K}, \quad t_k \in [0, T], \quad (3)$$

де, ξ_k , $k = \overline{1, K}$, – випадкові похибки вимірювань.

Під ідентифікацією багатозонної динамічної системи (1) будемо розуміти визначення границь між зонами функціонування $(\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_N)$ системи (1), а також вектору параметрів $\tau = (\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N)$, за відомими значеннями вихідної величини $\tilde{z}(t_k)$, $k = \overline{1, K}$, і за умов (2).

Математична модель задачі ідентифікації багатозонної динамічної системи запишемо в такий спосіб:

$$I(x(\cdot; \bar{\omega}, \tau)) \rightarrow \min_{(\bar{\omega}, \tau) \in P_N(\Omega) \times \Xi}, \quad (4)$$

де

$$I(x(\cdot; \bar{\omega}, \tau)) = \int_0^T (\gamma_1 x_1(t; \bar{\omega}, \tau) + \gamma_2 x_2(t; \bar{\omega}, \tau) - \tilde{z}(t))^2 \sum_{k=1}^K \delta(t - t_k) dt,$$

$x(\cdot; \bar{\omega}, \tau)$ – розв’язок задачі Коші (1), (2), $\tilde{z}(t)$ – значення вихідної змінної, $\delta(\cdot)$ – дельта-функція Дірака.

Надалі вважатимемо функції $\phi_i(t, x; \tau_i)$, $i = \overline{1, N}$, – лінійними за фазовими змінними, що записуються в такий спосіб: $\phi_i(t, x; \tau_i) = a_1^i x_1 + a_2^i x_2 + f_i(b^i, t)$, $i = \overline{1, N}$, а набір параметрів, що визначає кожну з цих функцій, $\tau_i = (a_1^i, a_2^i, b^i)$, $i = \overline{1, N}$.

Введемо до розгляду характеристичні функції $\lambda_1(x_1), \dots, \lambda_N(x_1)$ підмножин $\Omega_1, \dots, \Omega_N$:

$$\lambda_i(x_1) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } x_1 \in \Omega_i, \\ 0, & \text{якщо } x_1 \in \Omega \setminus \Omega_i, \end{cases} \quad i = \overline{1, N},$$

Згідно з методикою розв’язання неперервних задач оптимального розбиття множин, від задачі мінімізації функціоналу $I(x(\cdot; \bar{\omega}, \tau))$ здійснюємо перехід до еквівалентної задачі: знайти вектор - функцію $\lambda(\cdot) = (\lambda_1(\cdot), \dots, \lambda_N(\cdot)) \in \Lambda_0$ і вектор $\tau = (\tau_1, \dots, \tau_N)$, за яких

$$I^1(x(\cdot; \lambda(\cdot), \tau)) \rightarrow \min_{(\lambda(\cdot), \tau) \in \Lambda_0 \times \Xi}, \quad (5)$$

де

$$I^1(x(\cdot; \lambda(\cdot), \tau)) = \int_0^T (\gamma_1 x_1(t; \lambda(x_1), \tau) + \gamma_2 x_2(t; \lambda(x_1), \tau) - \tilde{z}(t))^2 \sum_{k=1}^K \delta(t - t_k) dt,$$

$$\Lambda_0 = \{\lambda(x_1) = (\lambda_1(x_1), \dots, \lambda_N(x_1)) : \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_1) = 1; \lambda_i(x_1) = 0 \vee 1, i = \overline{1, N}, \text{ м.в. для } x_1 \in \Omega\},$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \sum_{i=1}^N (a_1^i x_1 + a_2^i x_2 + f_i(b^i, t)) \lambda_i(x_1) \end{cases} \quad (6)$$

$$x_1(0) = x_{10}, \quad x_2(0) = x_{20}. \quad (7)$$

Метод розв'язування задачі ідентифікації

Нехай $\bar{\tau} \in \Xi$ - довільний, але фіксований вектор. Розглянемо задачу

$$I_{\bar{\tau}}^1(x(\cdot; \lambda(\cdot))) \rightarrow \min_{\lambda(\cdot) \in \Lambda_0}, \quad (8)$$

за умов (6), (7), де

$$I_{\bar{\tau}}^1(x(\cdot; \lambda(\cdot))) = \int_0^T (\gamma_1 x_1(t; \lambda(x_1), \bar{\tau}) + \gamma_2 x_2(t; \lambda(x_1), \bar{\tau}) - \tilde{z}(t))^2 \sum_{k=1}^K \delta(t - t_k) dt.$$

Оскільки перша координата фазової змінної є функцією часу, вектор-функція $\lambda(\cdot) = (\lambda_1(\cdot), \dots, \lambda_N(\cdot)) \in \Lambda_0$ також фактично залежить від часової змінної, що будемо позначати у такий спосіб: $\lambda(x_1(t)) = (\lambda_1(x_1(t)), \dots, \lambda_N(x_1(t)))$. Введемо до розгляду вектор-функцію

$\hat{\lambda}(t) = \left(\hat{\lambda}_1(t), \dots, \hat{\lambda}_N(t) \right)$, таку що $\hat{\lambda}(t) = \lambda(x_1(t))$. Отже, на відміну від

вектор-функції λ , компоненти якої визначені на множині Ω , коор-

динати вектор-функції $\hat{\lambda}(t)$ є функціями часу і визначені на інтерва-

лі $t \in [0, T]$, тобто: $\hat{\lambda}(\cdot) \in \hat{\Lambda}$,

$$\hat{\Lambda} = \left\{ \hat{\lambda}(t) = \left(\hat{\lambda}_1(t), \dots, \hat{\lambda}_N(t) \right) : \sum_{i=1}^N \hat{\lambda}_i(t) = 1; \hat{\lambda}_i(t) = 0 \vee 1, i = \overline{1, N}, \text{ м.в. для } t \in [0, T] \right\}$$

Отже, задачу (6) – (8) можна інтерпретувати як задачу оптимального керування динамічною системою, в якій керуючою функці-

єю є вектор-функція $\hat{\lambda}(t)$. Представимо таку задачу оптимального

керування на проміжку $t \in [0, t_K]$ набором наступних послідовних K задач:

$$J_{\bar{\tau}}^k(x(\cdot; \hat{\lambda}(\cdot))) \rightarrow \min_{\hat{\lambda}(\cdot) \in \Lambda}, \quad k = \overline{1, K}, \quad (9)$$

$$J_{\bar{\tau}}^k(x(\cdot; \hat{\lambda}(\cdot))) = \left(\gamma_1 x_1(t_k; \hat{\lambda}(\cdot)) + \gamma_2 x_2(t_k; \hat{\lambda}(\cdot)) - \tilde{z}(t_k) \right)^2, \\ \begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = \sum_{i=1}^N (a_1^i x_1 + a_2^i x_2 + f_i(b^i, t)) \hat{\lambda}_i(t), \quad t \in [t_{k-1}, t_k], \end{cases} \quad (10)$$

$$x_1(0) = x_{10}, \quad x_2(0) = x_{20}, \quad x_1(t_{k-1}) = \bar{x}_1(t_{k-1}), \quad x_2(t_{k-1}) = \bar{x}_2(t_{k-1}), \quad k = \overline{1, K}, \quad (11)$$

де $\bar{x}_1(t_{k-1})$ і $\bar{x}_2(t_{k-1})$, $k = \overline{1, K}$, – значення першої та другої фазової координати у момент часу $t = t_{k-1}$, які або збігаються з $\tilde{x}_1(t_{k-1})$ і $\tilde{x}_2(t_{k-1})$ відповідно у випадку, коли спостерігаються обидві фазові змінні ($\tilde{x}_j(t_{k-1})$, $j = \overline{1, 2}$ – значення, що спостерігаються), або обчислені у результаті розв’язання попередньої $(k-1)$ -ї задачі.

Наведемо необхідні умови оптимальності для кожної із задач (9) – (11). Для цього, за аналогією з методикою розв’язання неперервних задач оптимального розбиття множин, зануримо множину $\hat{\Lambda}$ у симплекс

$$\bar{\Lambda} = \left\{ \lambda(t) = (\lambda_1(t), \dots, \lambda_N(t)) : \sum_{i=1}^N \lambda_i(t) = 1 ; 0 \leq \lambda_i(t) \leq 1, i = \overline{1, N}, \text{ м.в. для } t \in [0, T] \right\}$$

і розглянемо задачу:

$$J_{\bar{\tau}}^k(x(\cdot; \hat{\lambda}(\cdot))) \rightarrow \min_{\hat{\lambda}(\cdot) \in \bar{\Lambda}}, \quad k = \overline{1, K}, \quad (12)$$

за умов (10), (11). Про правомірність переходу від задачі (9) – (11) до задачі (10) – (12) буде зазначено нижче.

Нехай $\left((x_1, x_2), \hat{\lambda} \right)$ – допустимий процес в задачі (9) – (11). Во-

чевидь, цей процес буде також допустимим для задачі (10) – (12).

Дамо приріст $\Delta \hat{\lambda}(\cdot)$ функції керування такий, щоб виконувалися умови:

$$\hat{\lambda}(t) + \Delta\hat{\lambda}(t) \in \bar{\Lambda}, \sum_{i=1}^N \left(\hat{\lambda}_i(t) + \Delta\hat{\lambda}_i(t) \right) = 1 \quad \forall t \in [0, T].$$

Це означає, що $\Delta\hat{\lambda} \in \hat{\Lambda}_\Delta$, де

$$\hat{\Lambda}_\Delta = \left\{ \lambda(t) = (\lambda_1(t), \dots, \lambda_N(t)) : \sum_{i=1}^N \lambda_i(t) = 0 ; \quad -1 \leq \lambda_i(t) \leq 1, i = \overline{1, N}, \quad \forall t \in [0, T] \right\}$$

Приріст $\Delta\hat{\lambda}(\cdot)$ викликає прирости фазових змінних $\Delta x_1, \Delta x_2$, які задовольняють систему диференціальних рівнянь

$$\begin{cases} \Delta\dot{x}_1 = \Delta x_2, \\ \Delta\dot{x}_2 = \sum_{i=1}^N (a_1^i x_1 + a_2^i x_2 + f_i(b^i, t)) \Delta\hat{\lambda}_i + \sum_{i=1}^N (a_1^i \Delta x_1 + a_2^i \Delta x_2) \hat{\lambda}_i. \end{cases} \quad (13)$$

і початкові умови

$$\Delta x_1(t_{k-1}) = 0, \Delta x_2(t_{k-1}) = 0. \quad (14)$$

Лінеаризований функціонал задачі (9) – (11) має наступний вигляд:

$$J_{\bar{\tau}}^k(x(\cdot; \hat{\lambda} + \Delta\hat{\lambda})) = J_{\bar{\tau}}^k(x(\cdot; \hat{\lambda})) + \int_{t_{k-1}}^{t_k} p_2 \sum_{i=1}^N (a_1^i x_1 + a_2^i x_2 + f_i(b^i, t)) \Delta\hat{\lambda}_i dt,$$

де вектор $p(t) = (p_1(t), p_2(t))$ відповідає наступним умовам:

$$\begin{cases} \dot{p}_1 = -p_2 \sum_{i=1}^n a_1^i \hat{\lambda}_i, \\ \dot{p}_2 = -p_1 - p_2 \sum_{i=1}^n a_2^i \hat{\lambda}_i; \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} p_1(t_k) &= -2\gamma_1 \left(\gamma_1 x_1(t_k; \hat{\lambda}) + \gamma_2 x_2(t_k; \hat{\lambda}) - \tilde{z}(t_k) \right), \\ p_2(t_k) &= -2\gamma_2 \left(\gamma_1 x_1(t_k; \hat{\lambda}) + \gamma_2 x_2(t_k; \hat{\lambda}) - \tilde{z}(t_k) \right). \end{aligned} \quad (16)$$

Для того, щоб допустимий процес $\left((x_1, x_2), \hat{\lambda} \right)$ був оптимальним в задачі (10) – (12), необхідно щоб для всіх допустимих приростів $\Delta\hat{\lambda} \in \hat{\Lambda}_\Delta$ виконувалась нерівність:

$$\int_{t_{k-1}}^{t_k} p_2 \sum_{i=1}^N (a_1^i x_1(t) + a_2^i x_2(t) + f_i(b^i, t)) \Delta \hat{\lambda}_i(t) dt \geq 0, \quad (17)$$

де (x_1, x_2) задовольняють задачу Коші (10), (11) при $\lambda(\cdot) = \hat{\lambda}(\cdot)$; а $p_2(\cdot)$ задовольняє умовам задачі (15), (16) за відповідних функцій $\left((x_1, x_2), \hat{\lambda} \right)$.

Нехай $\left((x_1, x_2), \hat{\lambda} \right)$ – довільний допустимий процес в задачі (10) – (12), що є допустимим також для задачі (9) – (11). Користуючись умовою (17), побудуємо напрям спуску в цій точці $\left((x_1, x_2), \hat{\lambda} \right)$, якщо він існує. Для цього розглянемо таку задачу:

$$\int_{t_{k-1}}^{t_k} p_2(t) \sum_{i=1}^N (a_1^i x_1(t) + a_2^i x_2(t) + f_i(b^i, t)) \Delta \hat{\lambda}_i(t) dt \rightarrow \min_{\Delta \hat{\lambda}_i \in \Lambda_{\Delta}}, \quad (18)$$

де $p_2(\cdot)$ задовольняє умовам задачі (15), (16) за відповідних функцій $\left((x_1, x_2), \hat{\lambda} \right)$. Мінімальне значення інтегралу в (18) досягається в точ-

ці $\Delta \hat{\lambda}_*(\cdot)$, в якій майже всюди для $t \in [t_{k-1}, t_k]$ виконується рівність:

$$\begin{aligned} p_2(t) \sum_{i=1}^N (a_1^i x_1(t) + a_2^i x_2(t) + f_i(b^i, t)) \Delta \hat{\lambda}_{*i}(t) = \\ = \min_{\substack{\Delta \hat{\lambda}(t) \in \Lambda_{\Delta} \\ \hat{\lambda}(t)}} p_2(t) \sum_{i=1}^N (a_1^i x_1(t) + a_2^i x_2(t) + f_i(b^i, t)) \Delta \hat{\lambda}_i(t), \end{aligned}$$

де

$$\Lambda_{\Delta}^{\hat{\lambda}(t)} = \left\{ \Delta \hat{\lambda} = (\Delta \hat{\lambda}_1, \dots, \Delta \hat{\lambda}_N) : \sum_{i=1}^N \Delta \hat{\lambda}_i = 0; 0 \leq \hat{\lambda}_i + \Delta \hat{\lambda}_i \leq 1, i = \overline{1, N} \right\}.$$

Допустимий приріст $\Delta \hat{\lambda}_i$ координати $\hat{\lambda}_i$ задовольняє наступні умови: якщо $\hat{\lambda}_i = 1$, то $\Delta \hat{\lambda}_i \in [-1, 0]$; якщо $\hat{\lambda}_i = 0$, то $\Delta \hat{\lambda}_i \in [0, 1]$; крім

того, $\sum_{i=1}^N \hat{\Delta\lambda}_i = 0$. Фактично, майже в кожен момент часу $t \in [t_{k-1}, t_k]$

маємо справу із задачею лінійного програмування на паралелепіпеді з однією умовою-рівністю. Запишемо її у наступному вигляді:

$$p_2(t) \sum_{i=1}^N \phi_i(x, t; \tau_i) \hat{\Delta\lambda}_{*i}(t) = \min_{\substack{\Delta\lambda(t) \in \Lambda_{\lambda(t)}}} p_2(t) \sum_{i=1}^N \phi_i(x, t; \tau_i) \hat{\Delta\lambda}_i(t).$$

Нагадаємо, що у разі оптимальності вектор-функції $\hat{\lambda}(\cdot)$ для задачі (10) – (12), майже всюди для $t \in [t_{k-1}, t_k]$ виконується умова

$$p_2(t) \sum_{i=1}^N \phi_i(x, t; \tau_i) \hat{\Delta\lambda}_i(t) \geq 0 \quad \forall \Delta\lambda \in \Lambda_{\lambda(t)}.$$

Зафіксуємо довільний момент часу $t \in [t_{k-1}, t_k]$. Нехай у векторі $\hat{\lambda}(t)$ такі компоненти: $\hat{\lambda}_m(t) = 1$, $\hat{\lambda}_i(t) = 0$, $i = \overline{1, N}$, $i \neq m$. Далі момент часу t і позначку « $\hat{\cdot}$ » будемо опускати. Розглянемо задачу

$$p_2\phi_1\Delta\lambda_1 + p_2\phi_2\Delta\lambda_2 + \dots + p_2\phi_N\Delta\lambda_N \rightarrow \min \quad (19)$$

за умов

$$\Delta\lambda_1 + \Delta\lambda_2 + \dots + \Delta\lambda_N = 0, \quad (20)$$

$$\Delta\lambda_m \in [-1, 0], \quad \Delta\lambda_i \in [0, 1], \quad i = \overline{1, N}, \quad i \neq m. \quad (21)$$

Введемо $\Delta\bar{\lambda}_m = -\Delta\lambda_m$, $\Delta\bar{\lambda}_m \in [0, 1]$ і, враховуючи умову (20), виключимо змінну

$$\Delta\bar{\lambda}_m = \Delta\lambda_1 + \dots + \Delta\lambda_{m-1} + \Delta\lambda_{m+1} + \dots + \Delta\lambda_N \quad (22)$$

з цільової функції. Тоді задача (19) – (21) запишеться у наступному вигляді:

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq m}}^N (p_2\phi_i - p_2\phi_m) \Delta\lambda_i \rightarrow \min_{\substack{0 \leq \Delta\lambda_i \leq 1, \\ i=1, N}} \quad (23)$$

за умов (22).

Якщо для всіх $i = \overline{1, N}$, $i \neq m$ і майже всіх $t \in [t_{k-1}, t_k]$ виконується нерівність: $p_2\phi_i - p_2\phi_m \geq 0$, то мінімальне значення цільової функції в (23) досягається при $\Delta\lambda_i = 0$, $i = \overline{1, N}$, $i \neq m$, і можна зробити

висновок про оптимальність вектору $\hat{\lambda}(t)$ в задачі (10) – (12), в силу довільності вибору моменту часу $t \in [t_{k-1}, t_k]$.

Якщо ж при деякому $t \in [t_{k-1}, t_k]$ існують такі індекси k , що виконується нерівність $p_2\phi_k - p_2\phi_m < 0$, то цільова функція в (23) може бути зменшена за рахунок збільшення відповідних змінних $\Delta\lambda_k$. З урахуванням того, що базис опорного розв'язку задачі лінійного програмування (23), (22) складає лише один вектор умов, маємо можливість у векторі $\Delta\lambda$ збільшити до одиниці лише одну змінну. Нехай

$$p_2(\phi_s - \phi_m) = \min_{k: p_2(\phi_k - \phi_m) < 0} p_2(\phi_k - \phi_m).$$

Тоді оптимальним розв'язком задачі (18) буде вектор $\Delta\lambda_{*s}(t) = 1$; $\Delta\lambda_{*m}(t) = -1$, $\Delta\lambda_{*i}(t) = 0$, $i = \overline{1, N}$, $i \neq s, m$. Відповідно, в задачі (10) – (12) можна здійснити перехід від вектор-функції $\hat{\lambda}(\cdot)$ до іншої допустимої вектор-функції $\lambda_*(\cdot)$, в якій $\lambda_{*s}(t) = 1$, $\lambda_{*i}(t) = 0$, $i = \overline{1, N}$, $i \neq s$, і яка забезпечує релаксійність процесу побудови розв'язку цієї задачі. З огляду на те, що точка $\lambda_*(\cdot)$ є

крайньою точкою симплексу $\bar{\Lambda}$, і $\Lambda \subset \bar{\Lambda}$, то справедливим буде твердження про те, що отриманий у такий спосіб розв'язок задачі (10) – (12) буде оптимальним розв'язком і для задачі (9) – (11).

З урахуванням наведених вище міркувань побудуємо допоміжний ітераційний алгоритм пошуку границь між зонами функціонування системи.

Алгоритм А

Ініціалізація. $k = 1$, τ_i , $i = \overline{1, N}$, $\varepsilon > 0$; крок h чисельного інтегрування системи диференціальних рівнянь (10), (11).

1. Задаємо $q := 0$.

Якщо $k = 1$, то задаємо початкові умови $x_1(0) = x_{10}$, $x_2(0) = x_{20}$. Якщо ж $k > 1$, то за початкові умови для фазових змінних $x_1(t_{k-1})$, $x_2(t_{k-1})$ обираються значення цих змінних у момент часу t_{k-1} , які отримані в результаті розв'язання попередньої

задачі. Задаємо також початкове наближення значень характеристичних функцій: $\lambda_i^{(0)}(t) \forall t \in [t_{k-1}, t_k]$.

Нехай у результаті q ітерацій отримані значення $\lambda_i^{(q)}(t), i = \overline{1, N}$. Опишемо q -ту ітерацію.

2. В кожній точці t сітки часового інтервалу $t_{k-1} \leq t \leq t_k$ обчислюємо значення функцій $x_1^{(q)}(t), x_2^{(q)}(t)$, розв'язуючи зліва направо за допомогою методу Рунге-Кутта задачу Коші (10), (11) при $\lambda = \lambda^{(q)}$. Обчислюємо значення функцій $p_1(t), p_2(t)$, розв'язуючи зправа наліво за допомогою методу Рунге-Кутта задачу Коші (15), (16) при $\lambda = \lambda^{(q)}, x = x^{(q)}$.

3. Перевіряємо виконання умов стаціонарності процесу:

$$p_2\phi_i - p_2\phi_m \geq 0 \quad \forall i \neq m \quad (24)$$

де m - номер одиничної компоненти вектору λ .

Якщо для деякого моменту часу $\bar{t} \in [t_{k-1}, t_k]$ існує такий індекс i , що $p_2\phi_i - p_2\phi_m < 0$, то серед них обираємо індекс l , що відповідає найменшому від'ємному значенню цієї різниці і покладаємо $\lambda_l(\bar{t}) = 1, \lambda_m(\bar{t}) = 0$. Перехід на крок 4.

Якщо $\forall t \in [t_{k-1}, t_k]$ для поточного значення $\lambda(t)$ таке, що $\forall i \neq m$ виконуються умови стаціонарності процесу (24), то $\lambda(t)$ буде оптимальним (умовно стаціонарним) на відрізку $t \in [t_{k-1}, t_k]$. Перехід на крок 5.

4. $q := q + 1$. Переходимо на крок 2.

5. $k := k + 1$

Якщо $k \leq K$, то переходимо на крок 1, інакше – на крок 6.

6. Відновлюємо оптимальне розбиття множини Ω за відомими значеннями характеристичних функцій $\lambda_i(t), i = \overline{1, N}$ і значеннями першої фазової координати системи у відповідних моментах часу. Обчислюємо значення цільового функціоналу загальної задачі (8).

Кінець алгоритму.

Отже, для кожного фіксованого вектору невідомих параметрів $\tau = (\tau_1, \dots, \tau_N)$ границі між зонами перемикання правих частин системи (10) можна знайти за алгоритмом А. Схема розв'язання задачі,

коли відновленню підлягають не тільки границі між підмножинами, але й параметри $\tau = (\tau_1, \dots, \tau_N)$ кусково-неперервної функції правої частини рівняння (6), ґрунтується на поєднанні алгоритмів недиференційовної оптимізації для пошуку скінченного числа невідомих параметрів і вищеописаного підходу пошуку границь між підмножинами.

Для розв'язування задачі параметричної ідентифікації динамічної системи (6) представимо ітераційний процедуру, яка поєднує г-алгоритм Шора і вищеописаний алгоритм А.

Алгоритм Б

Ініціалізація. Задаємо $q = 0$, $\tau_i^{(q)}$, $i = \overline{1, N}$, $\varepsilon_0 > 0$.

1. Застосовуємо алгоритм А для розв'язання задачі пошуку значень характеристичних функцій $\lambda = \lambda^{(q)}$ при фіксованих центрах підмножин.

2. Обчислюємо наближено за допомогою формул чисельного диференціювання узагальнений градієнт $\gamma^{(q)}$ функції $I^1(x(; \lambda, \tau))$ за змінними $\tau_i^{(q)}$, $i = \overline{1, N}$ при $\lambda = \lambda^{(q)}$.

3. Здійснюємо q -ту ітерацію г-алгоритму Шора за формулою

$$\tau^{k+1} = \tau^k - \alpha_k H_k \gamma^k,$$

де H_k – матриця розтягнення простору змінних $\tau_i^{(q)}$, $i = \overline{1, N}$ у напрямку різниці двох послідовних узагальнених градієнтів γ^k і γ^{k-1} , $H_0 = E$;

$$H_{q+1} = H_q + (1/\alpha^2 - 1) \frac{H_q \xi_q \xi_q^T H_q}{(H_q \xi_q, \xi_q)},$$

$$\xi_q = \gamma^{(q)} - \gamma^{(q-1)}.$$

$\alpha_k \geq 0$ – кроковий множник, який обирається з умови мінімуму цільової функції $I^1(x(; \lambda, \tau))$ за змінною τ у напрямку $d = -H_q \gamma^{(q)}$.

4. Якщо виконується хоча б одна з умов

$$\|\tau^{(q+1)} - \tau^{(q)}\| \leq \varepsilon_0;$$

$$\|\gamma^{(q)}\| \leq \varepsilon_0;$$

$$|I^1(x(; \lambda^{(q+1)}, \tau^{(q+1)})) - I^1(x(; \lambda^{(q)}, \tau^{(q)}))| \leq \varepsilon_0,$$

то кінець алгоритму. В якості оптимального розв'язку задачі (5) – (7) обираємо $(\lambda^{(q+1)}, \tau^{(q+1)})$. Інакше $k := k + 1$ і переходимо на п. 1.

Зауваження. Для того, щоб обчислити узагальнений градієнт функції $I^1(x(; \lambda^{(q)}, \tau)$ необхідно поряд із задачею п.1 додатково розв'язати sN таких задач при збурених компонентах вектора параметрів τ , де s – вимірність кожного з векторів τ_i , $i = \overline{1, N}$.

Аналіз результатів обчислювальних експериментів

Представимо результати розрахунків, виконаних для двох модельних обернених задач. Для отримання вхідних даних за допомогою методу Рунге – Кутта 4-го порядку розв'язувалась пряма задача Коші (6) – (7) з відомими границями між зонами функціонування системи. Далі, задавши кількість точок вимірювання K , і, вибираючи із отриманого чисельного розв'язку задачі значення фазових змінних (величини, що спостерігаються) у цих K точках, збурюючи ці значення за допомогою генератора випадкових чисел, формувалась послідовність обернених задач виду (9) – (11).

Реконструкція вигляду розривних за фазовою змінною правих частин диференціальних рівнянь проводилась для динамічних систем з різною кількістю зон функціонування. На рисунку 1 зображені фазові траєкторії системи (6) (змодельована та відтворена за алгоритмом А), де переключення правої частини диференціального рівняння в (6) з функції $\phi_1 = -0.2x_1 + 0.2x_2 + 0.3t$ на функцію $\phi_2 = 0.27x_1 - 0.2x_2 - 0.17t$, а далі на $\phi_3 = -0.3x_1 + 0.2x_2 + 0.46t$ відбуваються відповідно у точках $x_1 = \sigma_1 = -1$, $x_1 = \sigma_2 = 6$. За початкових умов $x_1(0) = -3$, $x_2(0) = -2$, $T = 8$ та за значеннями фазових координат у $K = 38$ точках спостережень отримані такі відновлені границі між зонами функціонування: $\sigma_1 = -1.504$, $\sigma_2 = 6.092$. Інтегрування системи (6) відбувалося з кроком $h = 0.05$. Похибки спостережень – $\xi_k \in (-0.005; 0.005)$, $k = \overline{1, K}$.

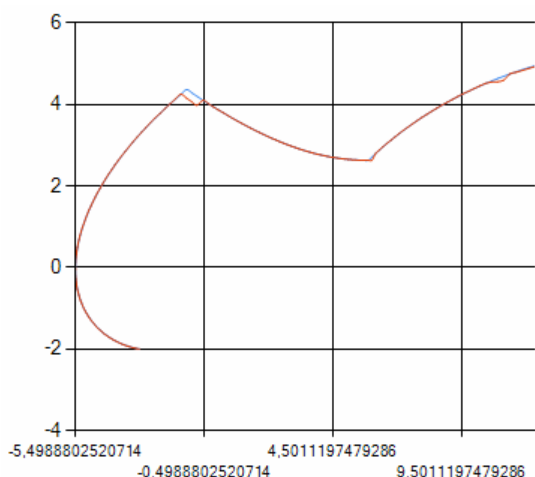


Рисунок 1 - Фазові траєкторії системи (6), реконструйованої за допомогою алгоритму А

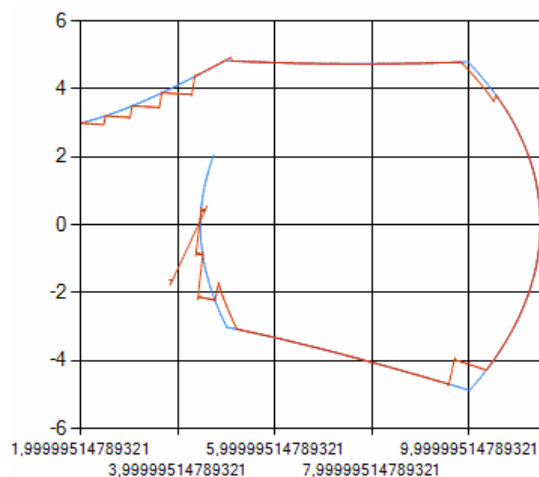


Рисунок 2 - Змодельовані та відтворені фазові траєкторії тризонної динамічної системи

На рисунку 2 представлені змодельована та відтворена за допомогою алгоритму А фазові траєкторії динамічної системи з трьома зонами функціонування, яким відповідають такі функції правої частини системи (6): $\phi_1 = 0.8x_1 - 0.2x_2 + 0.9t$, $\phi_2 = 0.14x_1 - 0.2x_2 - 0.1t$, $\phi_3 = -0.6x_1 - 0.01x_2 - 0.6t$ з границями перемикання $x_1 = 5$ та $x_1 = 10$ відповідно. Початкові дані в задачі: $x_1(0) = 2$, $x_2(0) = 3$, $T = 5$, $K = 30$. За проміжок часу, що розглядається, переключення відбувалося декілька разів. Усі чотири точки переключення були виявлені. При цьому отримані наступні значення шуканих границь між зонами функціонування системи: $\sigma_1 = 5.11$, $\sigma_2 = 9.83$, $\sigma_3 = 10.3$, $\sigma_4 = 5.23$.

Висновки

Робота є послідовним продовженням наукових досліджень з питань застосування теорії та методів розв'язання неперервних задач оптимального розбиття множин для задач ідентифікації мультистадійних (або мультизонних) динамічних систем. Алгоритм реконструкції систем звичайних диференціальних рівнянь з правими частинами, що перемикаються, розроблений на основі поєднання елементів теорії обернених задач, методів розв'язання задач оптимального керування і неперервних задач оптимального розбиття множин. Наведені та інші приклади розв'язання задач відновлення границь між зонами функціонування динамічних систем виду (6) свідчать про те, що якість реконструювання динамічної системи за допомогою алго-

ритму A залежить від сукупності початкових даних задачі, таких як: параметри $\tau_i = (a_1^i, a_2^i, b^i)$, що визначають функцію справа в диференціальному рівнянні, величина часового інтервалу $\bar{T}$, співвідношення коефіцієнтів γ_1, γ_2 , а також крок інтегрування системи (6) і кількість моментів часу, в яких спостерігається вихідна величина. Дослідження питань, пов'язаних з некоректністю постановки обернених задач для систем диференціальних рівнянь з правими частинами, що перемикаються, і засобами регуляризації таких задач, триває.

ЛІТЕРАТУРА

1. Муромцев Ю.Л. Моделирование и оптимизация технических систем при изменении состояний функционирования. / Ю.Л. Муромцев, Л.Н. Ляпин, О.В. Попова. – Воронеж: ВГУ, 1992. – 164 с.
2. Матвейкин В.Г. Теоретические основы энергосберегающего управления динамическими режимами установок производственно-технического назначения: монография. / В.Г. Матвейкин, Д.Ю. Муромцев. – М.: "Издательство Машиностроение-1", 2007. – 128 с.
3. Koriashkina L. One way to solve problems of multi-zone dynamics models identification / L. Koriashkina, A. Pravdivy, A. Cherevatenko // Power engineering control and information technologies in geotechnical systems. - CRC Press, 2014 – P. 153 - 160
4. Кісельова О.М. Ідентифікація динамічної системи з декількома режимами функціонування / О.М. Кісельова, Л.С. Коряшкіна, О.В. Правдивий // Питання прикладної математики і математичного моделювання. – Д.: ДНУ, 2011. – С.141–150.

М.О. Молчанова

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ КЛАССАМИ В УСЛОВИЯХ ЗАДАЧИ РАСПОЗНАВАНИЯ ПЛОСКИХ СТАЦИОНАРНЫХ ОБЪЕКТОВ С БОЛЬШИМ КОЛИЧЕСТВОМ БИНАРНЫХ ПРИЗНАКОВ

Аннотация. Решается задача распознавания плоских стационарных объектов с большим количеством бинарных признаков с помощью нейронной сети типа когнитрон. В рамках этой задачи исследуется взаимозависимость между распознаваемыми классами, а также влияние параметров обучения на качество распознавания.

Ключевые слова: когнитрон, нейронная сеть, распознавание, матрица спутываний.

Вступление

В эпоху стремительного развития новых технологий процессам автоматизации отведено отдельное место, так как они помогают не только в вопросах сокращения времени выполнения рутинных операций, но и способствуют уменьшению ошибок, вызванных человеческим фактором. Процессы автоматизации занимают достаточно широкий круг применений – на технологических объектах, в медицине, социальной сфере и т.д.

Для поддержания львиной доли процессов автоматизации необходима качественная классификация, выполняемая программно-математическими средствами – классификаторами. Классификаторы должны обладать такими качествами как высокое быстродействие и точность, быстрая адаптация к изменениям входных образов, низкий уровень потребления ресурсов.

Анализ первоисточников

В качестве классификаторов часто используют нейронные сети, которые имеют ряд преимуществ, среди которых их использование в ситуациях, когда известны сопоставимый по точности прогноза метод решения, но критическое, например, время при получении результата, а бученная нейронная сеть решает задачу достаточно быстро [1].

Задачи, которые решают нейросети, сводятся к аппроксимации многомерных функций, то есть построения отображения вида [1]:

$$F: x \rightarrow y, \quad (1)$$

где $x \in \mathbb{R}^n$ – входной n -мерный вектор, $y \in \mathbb{R}$ – скаляр-результат.

Одной из самых популярных нейронных сетей для решений задач распознавания считают многослойный персептрон. Он однозначно имеет ряд преимуществ, среди которых возможность распознавания зашумленных образов с достаточно высоким уровнем пиксельного шума [2], но его основным недостатком есть то, что для каждого вида искажения его нужно переучивать, а этот процесс может занять часы, или даже дни.

Но персептрон далеко не единственная нейронная сеть, которая призвана решать задачу классификации. В процессе распознавания входных образов часто используется нейронная сеть типа когнитрон.

В основу функционирования когнитрона положена модель зрительной коры мозга человека [3,4]. Каждый слой мозга реализует различные уровни обобщения – входной слой чувствителен к простым образам, таким как линии различной ориентации в плоскости, в то время как другие слои позволяют формировать более сложные, абстрактные и независимые от положения образы. Каждый нейрон когнитрона связан только с локальной областью предыдущего слоя, причем области связей могут взаимопересекаться. Слоев в когнитроне обычно больше, чем в сетях других типов, таким образом достигается иерархическая организация. Высшие слои когнитрона реагируют на выделенные абстрактные признаки, поэтому на распознавание меньшей степени влияет зашумления исходного образа [3].

Архитектура когнитрона изображена на рисунке 1. Когнитрон конструируется в виде слоев нейронов, соединенных синапсами. Пресинаптический нейрон в одном слое связан с постсинаптическим нейроном в следующем слое. Есть два типа нейронов: возбуждающие узлы, которые стремятся вызвать возбуждение постсинаптического узла, и тормозящие узлы, которые тормозят это возбуждение. Возбуждение нейрона определяется взвешенной суммой его возбуждающих и тормозящих входов, однако в действительности механизм является более сложным, чем простое суммирование [4]. Алгоритм обучения и

математическая модель нейронной сети типа когнитрон представлена в работе [5].

Постановка задачи

В рамках вышесказанного ставится задача исследовать зависимости между распознаваемыми классами, и выяснить возможные причины таких зависимостей. Также выяснить, как влияет на процесс спутывания образов настройка входных параметров когнитрона.

Материалы исследования

Для решения этой задачи будет использоваться три вариации нейронной сети типа когнитрон с разными параметрами обучения.

Модели (SONNC self-organization neural network cognitron) будут представлять собой когнитрон со следующими параметрами:

- 1) Число слоев когнитрона (L).
- 2) Величина области связи (V_s).
- 3) Величина области конкуренции (V_c).
- 4) Величина области латерального торможения (L_i).
- 5) Величина значения коэффициента изменения весов при конкурентном обучении (q_1).
- 6) Величина значения коэффициента изменения весов неконкурентном обучении (q_2).
- 7) Количество проходов сети (I_c).

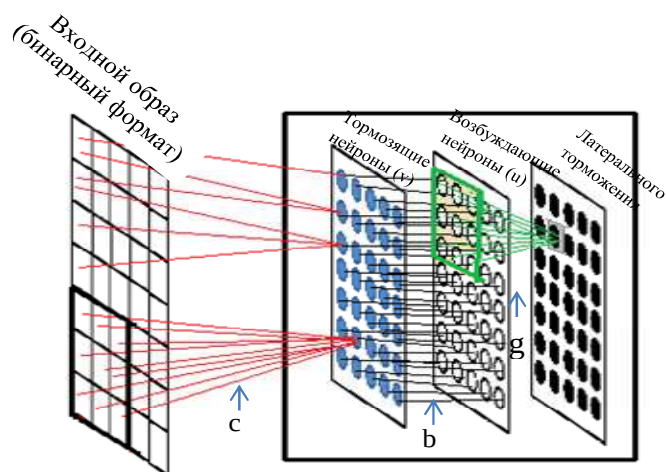


Рисунок 1 - Архитектура нейронной сети когнитрон (связи возбуждающих нейронов с входным образом изображены не, однако эти связи идентичны как между слоем тормозных нейронов и входным образом)

Параметры для трёх вариаций нейронных сетей SONNC1, SONNC2 и SONNC3 представлены в таблице:

Таблица 1

	L	V_s	V_c	L_i	q_1	q_2	I_c
SONNC1	3	3	2	8	48	2	90
SONNC2	3	3	3	8	50	2	60
SONNC3	3	3	4	8	60	2	90

Нейронные сети будут обучаться на одинаковом наборе входных изображений вида, представленного на рисунке 2.



Рисунок 2 – Обучающая выборка

Результаты распознавания различных вариантов искажений (рис. 3) представлены в таблице 2 и проиллюстрированы на рисунке 4.

Таблица 2

Сравнение продуктивности альтернативных вариаций когнитрона

Параметры Сеть	Время обучения	Чистые образы	Шум №1	Шум №2	Шум №3	Шум №4	Шум №5	Шум №6	Шум №7	Шум №8
SONNC1	20	100	96,2	69,2	73,1	69,2	46,2	11,5	46,2	46,2
SONNC2	14	92,3	84,6	76,9	76,9	76,9	34,6	11,5	46,2	50
SONNC3	21	100	34,6	84,6	69,2	69,2	7,69	100	11,5	15,4

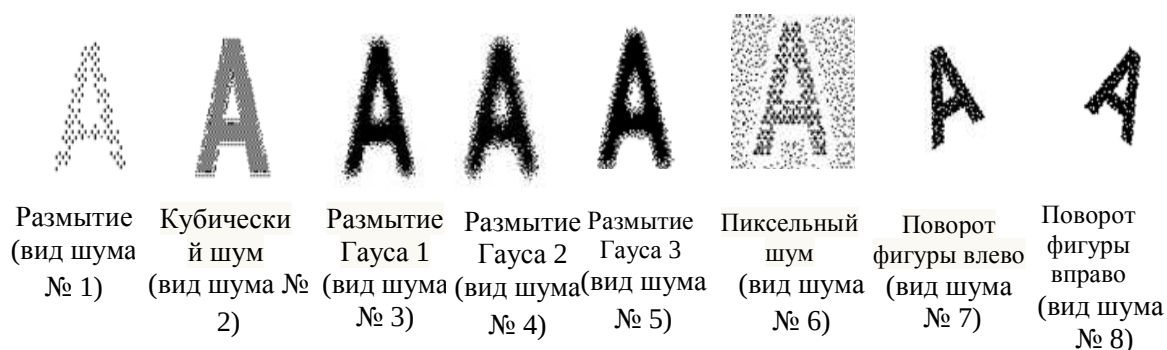


Рисунок 3 – Различные варианты искажений

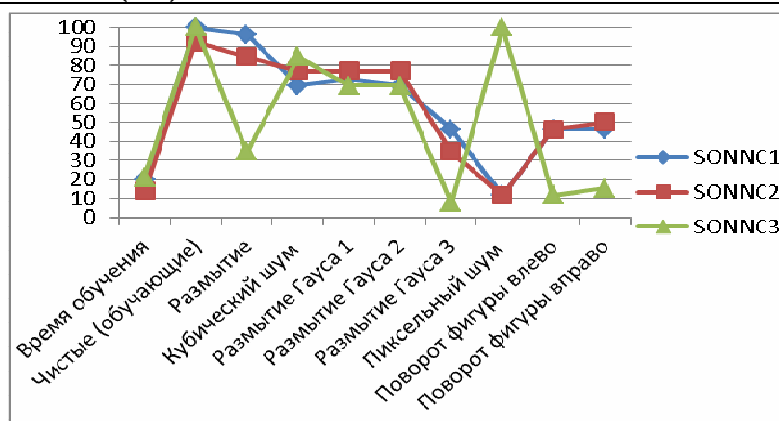


Рисунок 4 – Результат распознавания входных образов с разным типом искажений

Как видно по рисунку 4, очень большое влияние на когнитрон имеют параметры обучения. Также по рисунку 4 можно сделать вывод, что практически под любой вид искажений можно подобрать оптимальные параметры классификатора [5].

По результатам распознавания была построена матрица спутываний, которая показывает вероятность спутывания в соответствующих классах:

$$P_i = \frac{P_i}{\sum_{i=1}^{i \leq 26} P_i}, \quad i = \overline{1..26}, \quad (2)$$

где индекс i соответствует номеру буквы в латинском алфавите.

Как видно по рисунку 5, наибольшая статистическая частота спутывания с буквой “В”. В то же время буква “В” распознается в 100 % случаев. Такая высокая частота спутывания связана с тем, что многие буквы имеют большое количество сходных бинарных признаков с буквой “В”.

Также большая статистическая частота спутываний существует для “круглых” букв. Буквы “О” и “Q” в 70 % случаев путаются с буквой “D”.

С изменением параметров обучения наблюдалось небольшое изменение в матрице спутываний. В SONNC1 и SONNC3 чистые образы распознаются безошибочно. Самые частые спутывания наблюдаются с классами изображений “В” и “D”. Но поскольку каждый вид сети настроен под конкретный вид искажений, то большая доля спутываний происходит именно на виде искажений, к которому сеть неустойчива.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
1 A	0,778	0,111	0	0	0	0	0	0	0,111	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2 B	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3 C	0,111	0,111	0,667	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,111
4 D	0	0,222	0	0,778	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5 E	0	0,889	0	0	0,111	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6 F	0	0,111	0	0	0	0,778	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,111	0	0	0	0	0	0
7 G	0	0,667	0	0	0	0	0,222	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,111	0	0	0	0	0
8 H	0	0,222	0	0	0	0	0	0,667	0	0	0	0	0	0,111	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9 I	0	0,111	0	0	0	0	0	0	0,778	0,111	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10 J	0	0,111	0	0	0	0	0	0	0,111	0,778	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11 K	0	0,111	0	0	0	0	0	0	0	0,667	0	0,667	0	0,111	0	0	0	0,111	0	0	0	0	0	0	0	0
12 L	0	0,111	0	0	0	0	0	0	0,111	0	0,778	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13 M	0,111	0,333	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,556	0	0,889	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14 N	0	0,111	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,111	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15 O	0	0,111	0,111	0,667	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,111	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16 P	0	0,111	0	0	0	0,111	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,778	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17 Q	0	0,111	0	0,667	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,111	0	0	0	0,111	0	0	0	0	0
18 R	0	0,222	0	0	0	0,111	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,667	0	0	0	0	0	0	0	0
19 S	0,222	0,778	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20 T	0	0,111	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,889	0	0	0	0	0	0	0
21 U	0,222	0,111	0	0	0	0	0	0	0,111	0	0,111	0	0	0,111	0	0	0	0	0	0	0,556	0	0	0	0	0
22 V	0	0,111	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,667	0	0	0	0
23 W	0	0,222	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,778	0	0	0
24 X	0	0,111	0	0	0	0	0	0	0,111	0	0	0	0	0	0	0	0	0,333	0	0,111	0	0	0	0,333	0	0
25 Y	0	0,111	0	0	0	0	0	0	0,111	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,778	0
26 Z	0	0,111	0	0	0	0	0	0	0,111	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,778

Рисунок 5 – Матрица спутываний для модели когнитрона SONNC2

Выводы

Нейронная сеть типа когнитрон способна справляться с достаточно высоким уровнем пиксельного шума. Она быстро обучается (меньше 1 минуты), и показывает высокую точность в классификации входных образов (практически для каждого вида искажений, кроме поворотов и масштабирования, можно добиться точности распознавания выше 95 %).

Как показало исследование, для каждого вида искажений когнитрон требует переобучения с подборкой соответствующих параметров. Также показано, что есть классы изображений, которые практически не распознаются. К таким классам относятся буквы “Е”, “G”, “O”, “Q”, “S”. Буквы “Е”, “G”, “S” более чем в 65 % случаев спутывались с классом “B”. А буквы “O” и “Q” в 67 % спутывались с классом “D”. Связано это прежде всего с тем, что данные буквы имеют достаточно много схожих бинарных признаков. Что касается распознавания изображений с поворотом, когнитрон не показал высокой эффективности, так как подстройкой параметров обучения не удалось достичь эффективности свыше 55 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gerald H. L. C. Approximation with neural networks activated by ramp sigmoids / H. L. C. Gerald // Journal of Approximation Theory. – 2010. – Volume 162, Issue 8. – P. 1450 – 1465.
2. Romanuke V. V. An attempt for 2-layer perceptron high performance in classifying shifted monochrome 60-by-80-images via training with pixel-distorted shifted images on the pattern of 26 alphabet letters / V. V. Romanuke // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2013. – № 2. – С. 112 – 118.
3. Fukushima K. A self-organizing multilayered neural network: Cognitron / K. Fukushima // Biological Cybernetic. – 1975, vol 20. – P. 121–136.
4. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика / Уоссермен Ф. – М. : Мир, 1992. – 240 с.
5. Молчанова М. О. Дослідження впливів параметрів навчання когнітрону на якість розпізнавання вихідних образів / М. О. Молчанова, М. В. Протасов // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2014. – № 5. – С. 240 – 246

УДК 621.315.592.2:66.012.1

Л.Я. Шварцман, Э.А. Троценко, Е.В. Баженов, П.Е. Баженов
**ОЦЕНКА СПОСОБОВ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ОСАЖДЕНИЯ
КРЕМНИЯ, КАК УСЛОВИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ
SIEMENS-РЕАКТОРОМ**

Аннотация. Выполнен анализ параметров управления процессом водородного восстановления трихлорсилана в «Siemens-Реакторе». Предложен новый способ определения управляемого параметра, что устраняет увеличение абсолютной ошибки его измерения по мере ведения процесса.

Ключевые слова: идентификация, адекватность, методическая ошибка, поликристаллический кремний, Siemens-Реактор, скорость осаждения кремния, диаметр стержня, скорость роста диаметра, абсолютная ошибка.

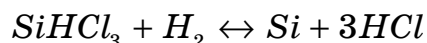
Поликристаллический кремний (ПКК) в виде стержней получают осаждением кремния в **Реакторах** водородного восстановления трихлорсилана (**ТХС**). Современный уровень технологии определен реализацией процесса в «Сименс-реакторах»[1], обеспечивающей приемлемые технико-экономические показатели производства и предоставляющей ряд существенных преимуществ в сравнении с альтернативными схемами:

- технологическая простота и невысокая себестоимость исходного получения расходуемого в реакторереагента - ТХС;
- возможность эффективной очистки ТХС до требуемого уровня чистоты, обеспечивающего соответствие заданному качеству конечного продукта;
- обеспечение высокой скорости осаждения кремния в процессе формирования поликристалла;
- обеспечение высокого уровня извлечения кремния из ТХС, достигаемого в процессе.

Несмотря на преимущества технологической схемы, реализуемой на базе Сименс-реактора, ставшей своего рода мировым стандар-

том в результате многолетнего совершенствования, процесс поиска улучшения технологии продолжается. Направления поиска - оптимизация как общей технологической схемы во всем объеме технологических операций и переделов, так и в направлении совершенствования непосредственно процесса в самом реакторе.

Метод получения поликристаллического кремния в Сименс-реакторах водородного восстановления ТХС основан на реакциях, в обобщенном виде представляемых формулами:



Разнообразие схем управления процессом в Сименс-реакторах сводится к управлению технологическим параметром - **скоростью осаждения кремния в соответствии с создаваемыми условиями в реакторе для соответствующей стадии процесса** (выходящая переменная - при описании процесса как объекта автоматизации). Реализуется управление процессом путем регулирования параметров (входящие переменные):

- объемная скорость подаваемой в реактор парогазовой смеси (ПГС);
- давление подаваемой в реактор ПГС;
- молярное соотношение реагентов $\text{SiHCl}_3:\text{H}_2$ в ПГС;
- температура нагрева стержней ПКК (функция токовой нагрузки).

Критерием оптимизации скорости осаждения кремния является ее максимизация в ограничениях, обеспечивающих заданное качество получаемого поликристалла для условий, определяемых стадией процесса. Основным параметром объективного управления процессом является скорость осаждения кремния.

В силу особенностей процесса в Сименс-реакторе, скорость осаждения кремния вычисляется по косвенным параметрам - по геометрическим размерам стержня [2], по весу, по токовой нагрузке [1,3], или возможным прочим контролируемым параметрам процесса на основании их функциональной связи со скоростью осаждения кремния [4].

Вычисление скорости осаждения кремния в широком смысле является задачей многофакторного анализа, определяемого стохастическим характером влияющих на процесс параметров (входящих переменных). Способы измерения этих параметров являются источником-

методической погрешности оценки площади осаждения кремния (выходящей переменной). Как результат - в течение длительности процесса нарушается адекватность моделей управления.

Рассмотрим последствия этих погрешностей, в качестве примера, на схеме функциональной связи скорости осаждения кремния и текущего значения диаметра стержня. В настоящей работе выполнено исследование влияния стохастического характера диаметра стержня на определение оценки площади осаждения кремния - в ограниченном интервале времени при стабильных прочих условиях пропорционально определяющей скорость осаждения кремния.

Введем обозначения.

D_{cm} - диаметр стержня поликристаллического кремния;

$D(h)$ - диаметр стержня ПКК в поясе с ординатой h (где

$h = k \cdot H$ -, H - длина слитка, $k = \{0 - 1\}$ - коэффициент пропорциональности);

$\bar{D}$ - приведенное среднее значение диаметра стержня ПКК, исходя из способа определения: по весу, путем прямого измерения диаметра $D(h)$, или др.;

$\Delta D(h)$ - отклонение значения диаметра $D(h)$ от $\bar{D}$ в поясе с ординатой h стержня ПКК;

$\omega(h) = dD / dt$ - скорость роста значения диаметра $D(h)$ в поясе h стержня ПКК в момент времени t ;

S_{cm} - площадь боковой поверхности стержня поликристаллического кремния:

$$S_{cm} = f(D_{cm})$$

ΔS_{cm} - погрешность оценки S_{cm} .

Для определения ΔS_{cm} - погрешности оценивания S_{cm} путем вычисления площади боковой поверхности стержня по измеренному значению $D(h)$, а так же динамики ΔS_{cm} в зависимости от времени в течение процесса, рассмотрим взаимосвязь приведенных выше параметров (Рис. 1).

Задача вычисления объема стержня ПКК как цилиндра с плоским основанием решается путем определения двойного интеграла, ограниченного поверху некоторой поверхностью [5].

В рассматриваемом случае это цилиндр, основанием которого является замкнутая область $F(h, h=0) \in xOy$ и имеющий ограничение сверху поверхностью $h = f(x, y)$. Объем цилиндра (Рис. 1, а) определяется выражением:

$$V = \iint_F f(x, y) dx dy = \iint_F f(x, y) dS = \lim_{F \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n dhi \cdot \Delta Si \quad (1)$$

где dhi - размер выделенной элементарной области по оси h , ΔSi - площадь выделенной элементарной области внутри плоскости сечения $S(h) \in xhiy$.

Источники методической погрешности измерения диаметра слитка в Siemens-реакторе

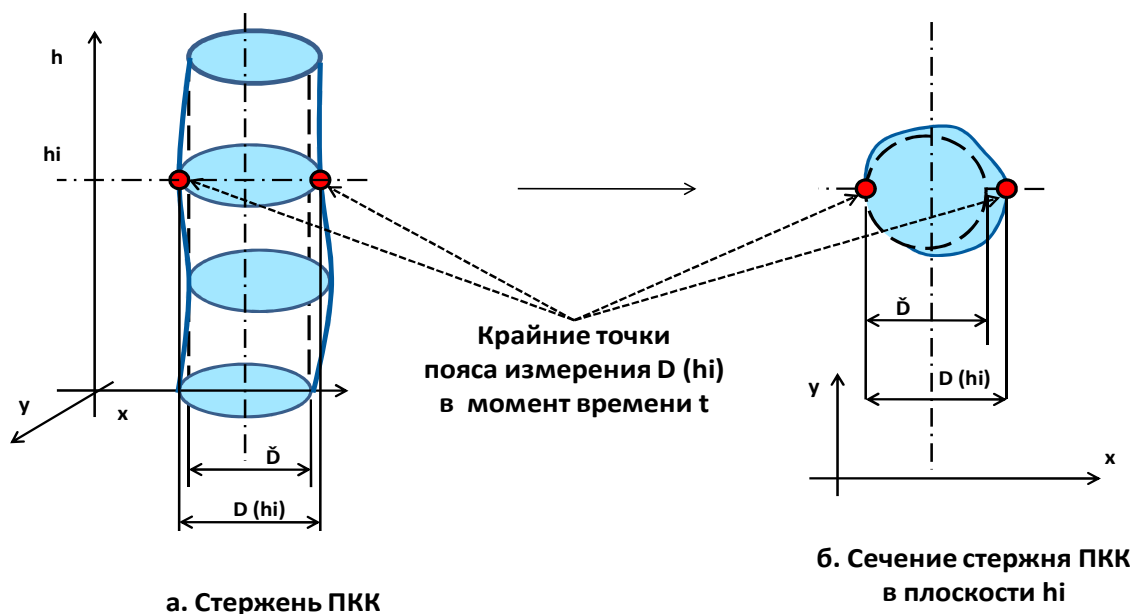


Рисунок 1 - Схема измерения диаметра стержня ПКК в реакторе

После несложных преобразований может быть получено эквивалентное выражение:

$$V = \int_{h0}^H S(h) dh \quad (2)$$

где $S(h)$ - площадь сечения цилиндра в плоскости h .

Приведенное среднее значение диаметра стержня ПКК $\bar{D}$ может быть определено

$$\bar{D} = \sqrt{\frac{4 \cdot V}{\pi \cdot H}} \quad (3)$$

Площадь боковой поверхности цилиндра определяется выражением:

$$S_{cm} = \int_{h0}^H L(h)dh \quad (4)$$

где $L(h)$ длина линии, огибающей площадь сечения цилиндра в плоскости h .

Наравне с (4) площадь боковой поверхности цилиндра может быть определена выражениями:

$$S_{cm} = V / H \quad (5)$$

где V - объем цилиндра, получаемый из соотношения(1), и

$$S_{cm} = \pi \cdot \check{D} \cdot H \quad (6)$$

Так как величина H является величиной детерминированной, то не представляет интереса для анализа методологической погрешности оценивания ΔS_{cm} .

Таким образом, имеется возможность однозначного определения S_{cm} т(используя полученное по (1) значение V - по формуле (5), или полученное по (3) значение $\check{D}$ - по формуле (6)). Погрешность оценки S_{cm} будет определяться кроме точности, обеспечиваемой системой измерения исходного параметра (V или $\check{D}$), так же и методикой пересчета измеренных параметров в оценку S_{cm} . Рассмотрим это на примере оценки S_{cm} по значению $\check{D}$.

В реальных условиях измерение $D(h)$ является точечным, “привязанным” к определенному поясу стержня hi . Принимая измеренное значение диаметра стержня $D(hi)$ за $\check{D}$, т.е. $\check{D} = D(hi)$, происходит введение в оценку S_{cm} , методической погрешности. Из схемы сечения цилиндра Рис. 1, б видно, что площадь сечения цилиндра в плоскости hi и площадь, определяемая по приведенному среднему диаметру $\check{D}$ - в общем случае не совпадают по значению. Величина погрешности:

$$\Delta D(hi) = D(hi) - \check{D} \quad (7)$$

Исходя из (6) ошибка определения S_{cm} составит:

$$\Delta S_{cm} = \pi \cdot D(hi) \cdot H - \pi \cdot \check{D} \cdot H = \pi \cdot \Delta D(hi) \cdot H \quad (8)$$

при измерении диаметра стержня $D(hi)$ в поясе hi .

$D(hi)$ - величина случайная, нормально распределенная со значением математического ожидания $m(D(hi)) = \bar{D}$ - что является следствием методики определения $\bar{D}$ (формулы (1) – (3)). Указанный характер распределения случайной величины $D(hi)$ справедлив:

– как для $\forall t, t_0 < t < t_k$, (где t_0 - начало процесса, t_k - окончание процесса) при определении выборки по всем значениям hi ($hi \in \{hi = 0; hi = H\}$)

– так и для $\forall hi, 0 < hi < H$ при определении выборки по всем значениям t , когда $t \rightarrow \infty$.

В реальном процессе эти условия невыполнимы (измерение $D(hi)$ выполняется для единственного значения hi , и ограничено во времени). Отсюда следует вывод о значимости отклонений $D(hi)$ от $\bar{D}$ в ограниченных интервалах времени, что и является источником методической ошибки в оценивании параметра ΔS_{cm} , являющегося входным параметром системы управления технологическим процессом.

Наличие методической погрешности определения параметра ΔS_{cm} приводит к ее накоплению во времени, как следствие суммирования погрешностей случайных величин [6]. Влияние наличия методической ошибки измерения диаметра стержня D_{cm} на ΔS_{cm} во временном разрезе показано на рис.2.

Устойчивое положение параметра вне зоны допустимых значений визуализирует наличие методической ошибки.

Такие следствия особо негативно сказываются на управлении процессом на завершающих стадиях - так как при больших значениях D_{cm} управление переходит в диапазон регулирования больших объемных скоростей подачи ТХК в реактор, что приводит к усилению дифференциации условий осаждения кремния для локальных зон - формируя устойчивую тенденцию роста дисперсии значений $D(hi)$. Следствия практического характера - усиление неравномерности осаждения кремния вдоль направляющей стержня, формирование условий для нежелательных реакций и соответственно увеличение вероятности аварийного завершения процесса.

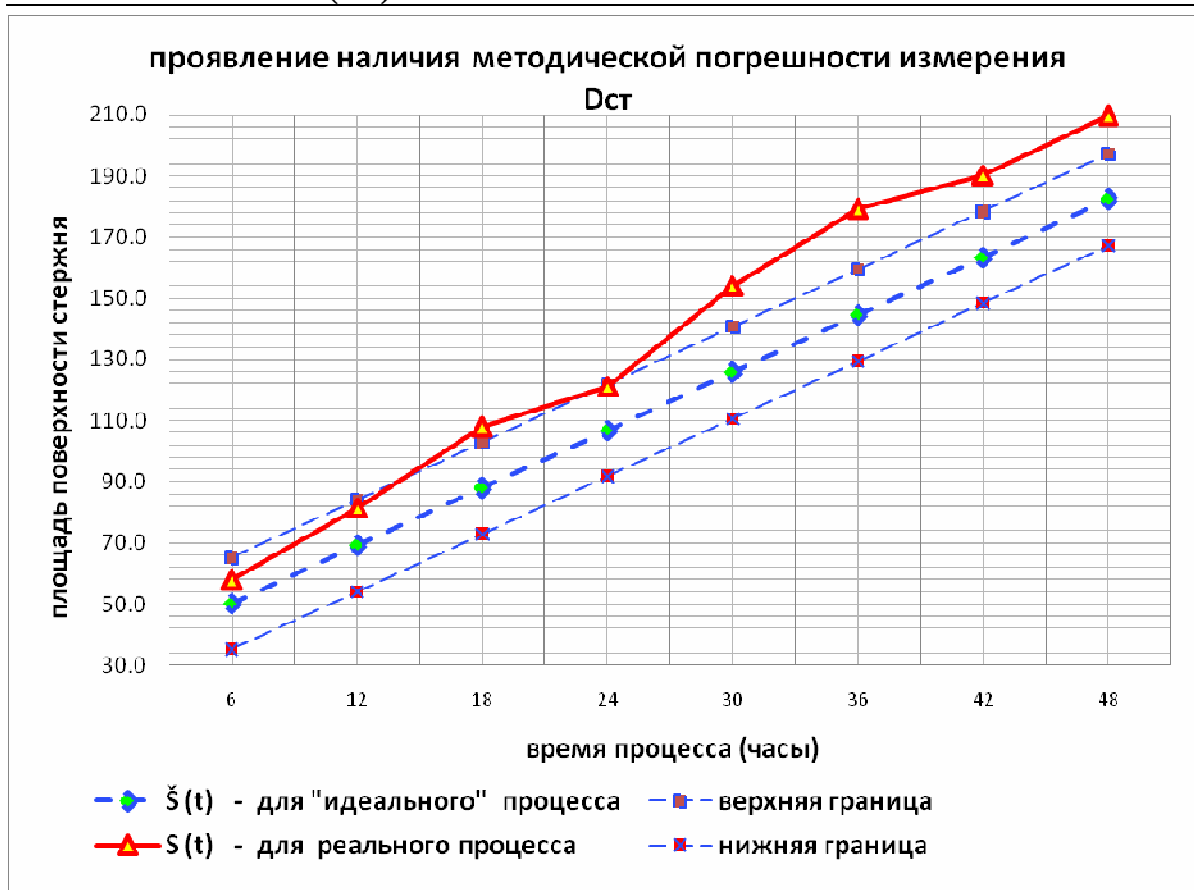


Рисунок 2 - Влияние методической ошибки измерения диаметра стержня ПКК в реакторе на вычисляемую оценку площади осаждения

Пример временной зависимости погрешности управляемой переменной ΔS_{cm} - при отсутствии и наличии методической ошибки измерения (вычисления) этой переменной - приведен на Рис.3. Оценки погрешности получены на имитационной модели. На рисунке приведены графики оценок соответствующих погрешностей, и графики линейных трендов этих оценок. Характерным следствием наличия методической погрешности измерения является увеличение дисперсии оценок - что хорошо видно на приведенных графиках и продемонстрировано вычисленными дисперсиями погрешностей. Введение дополнительной методической погрешности в процедуру измерения привело к резкому, в 2,87 раза, росту дисперсии измерений.

Объективное наличие неточности способов определения, а также влияние определенного уровня случайностей на вычисление/измерение ΔS_{cm} являются источниками, ограничивающим сегодня качество регулирования процессом.

Необходимо указать на еще одно негативное следствие ведения управления процессом по данным прямого измерения диаметра стержня поликристаллического кремния, проявляемому на больших значениях D_{cm} . Таким следствием является пропорциональный рост абсолютной погрешности $\Delta D'(hi)$ измерения D_{cm} :

$$\Delta D'(hi) = \delta \cdot D(hi) \quad (9)$$

где δ - относительная погрешность системы измерения диаметра стержня.

Таким образом, по совокупности изложенного можно сделать вывод, что даже при наличии высокоточного канала измерения D_{cm} , применение получаемой оценки будет потенциально ограничено по достигаемым показателям точности и качества регулирования в управлении процессом осаждения кремния.

Для “осязания” полученных выводов выполним расчет методической погрешности для одного из этапов процесса водородного восстановления в Реакторе получения ПКК. Для упрощения вычислений - будем считать случайную величину $\Delta D(hi)$ (см. (7)) таковой, что распределена по нормальному закону $N(0, \delta^2)$ - где 0 есть математическое ожидание случайной величины, δ^2 - дисперсия случайной величины [6]. Принятое допущение приведет к тому, что нами будет получена наименьшая оценка искомого значения ошибки. Плотность вероятности случайной величины $\Delta D(hi)$ для $\forall t, t_0 < t < t_k$ (где t_0 - начало процесса, t_k - окончание процесса) имеет вид:

$$f(x) = \frac{1}{\delta \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(x - \bar{D})^2}{2 \cdot \delta^2}\right), \quad (10)$$

где x введено для упрощения записи, и $x = \Delta D(hi)$.

Оценка будет выполнена для поздних стадий процесса, например для момента времени, когда в точке измерения $D(hi) = 120$ мм. Выполнив замеры диаметра стержня, были определены значения $D_{\max} = 122$ мм и $D_{\min} = 97$ мм. Исходя из свойств N-распределения - а именно используя правило 6δ - получим количественную оценку δ : $6\delta = D_{\max} - D_{\min} = 121 - 97 = 25$ мм, откуда $\delta = 25 / 6 = 4,7$ (мм).

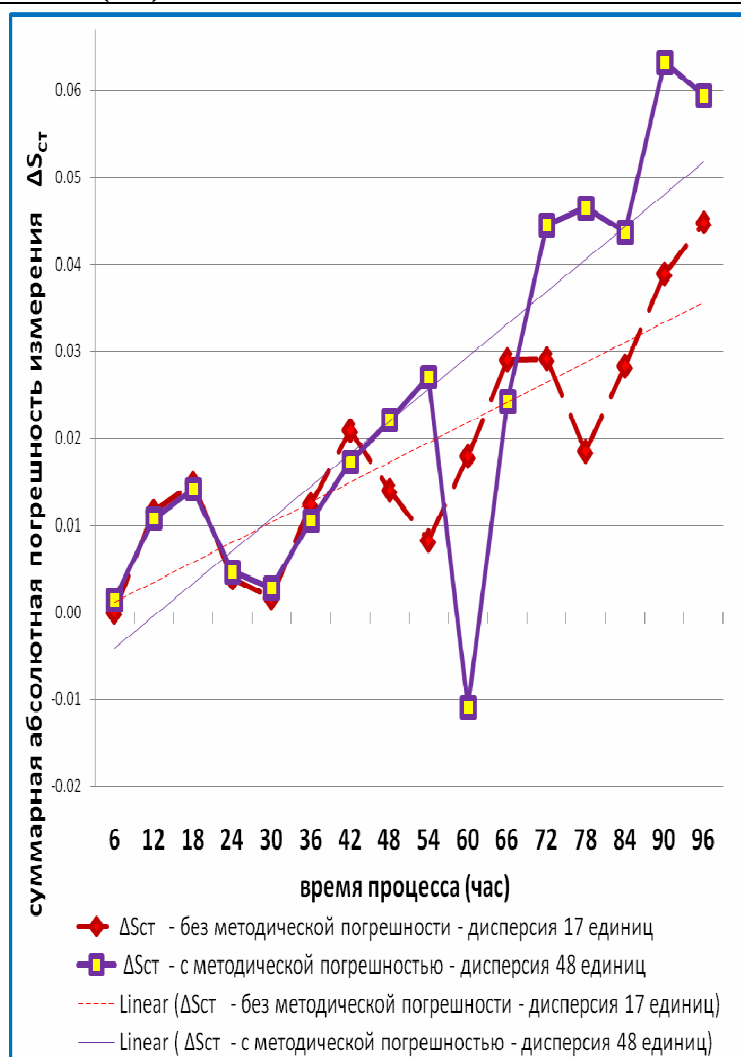


Рисунок 3 - Динамика ошибок измерения диаметра стержня ПКК в реакторе

Принимая $\tilde{D} = D(hi)$ и исходя из свойства N-распределения о том, что максимально вероятное отклонение случайной величины от ее математического ожидания равно σ - получим значение наиболее вероятной величины оценки $\Delta D(hi) = \delta = 4.17(\text{мм})$.

Полученная методическая погрешность многократно (в разы) превышает часовую скорость наращивания диаметра стержня (до 1 мм в час), что наглядно демонстрирует справедливость выводов о проблематичности использования измерения $D(hi)$ для оценки S_{cm} и, соответственно, для прогнозирования скорости осаждения кремния.

Повысить качество управления можно путем измерения первой (dD/dt) (а лучше и второй (d^2D/dt^2) производной (производных) D_{cm} по времени. Решение проблемы в этом направлении позволит

устранить зависимость управляемого параметра от доминирующего случайного фактора - местоположения измеряемой характеристики.

Введением прямого измерения скорости роста диаметра слитка dD/dt (именно прямого, независимого измерения скорости наращивания диаметра стержня, а не дифференцирование измеряемого параметра $D_{сл}$) обеспечивается значительное подавление (вплоть до полного исключения) методической ошибки в оценивании параметра dD/dt . Перестройка моделей, по которым ведется управление процессом, на использование в качестве параметра регулирования - скорости роста диаметра слитка dD/dt - позволит повысить уровня адекватности моделей и соответственно точность управляющего воздействия. Кроме прочего, появляется возможность управлять процессом и по производной более высокого порядка – по d^2D/dt^2 . Схема, реализующая прямое измерение скорости наращивания диаметра стержня ПКК путем измерения скорости перемещения точки, расположенной на визуальной кромке боковой поверхности стержня поликристалла приведена, на рис. 4.

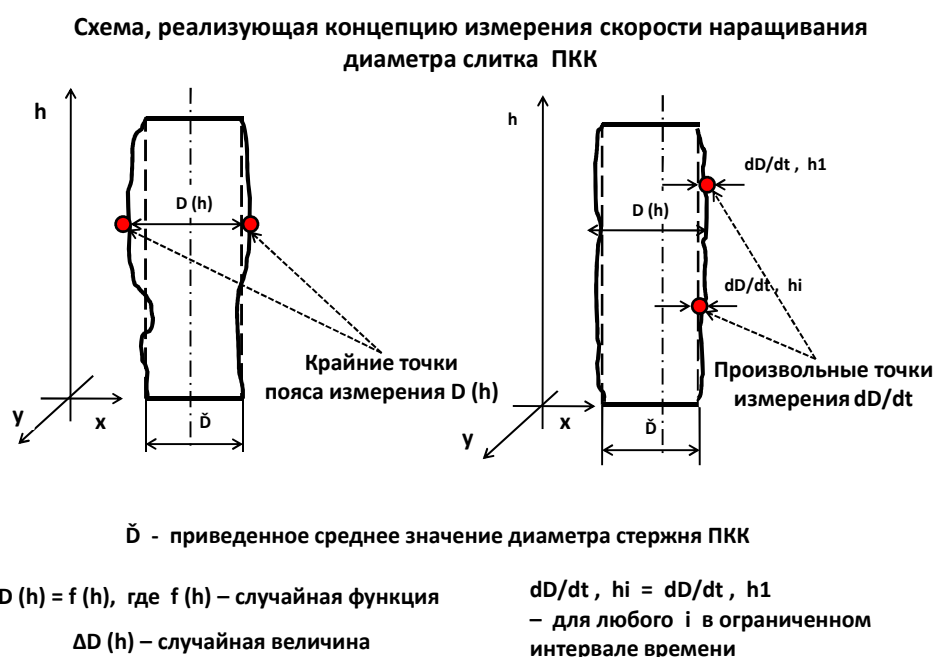


Рисунок 4 - Прямое измерение скорости наращивания диаметра стержня ПКК

Дополнение системы управления процессом в Реакторе водородного восстановления прямым измерением в реальном времени скорости роста диаметра слитка позволит:

- устранить зависимость погрешности измерения от стадии процесса;
- значительно уменьшить перерегулирование процессом;
- повысить степень усреднения условий осаждения кремния как по длине слитка, так и для различных зон Реактора;
- повысить однородность слитка по его длине;
- без ухудшения качества ПКК увеличить производительность процесса;
- сократить количество аварийно завершенных процессов.

Предложенное решение обеспечивает оперативный технологический персонал эффективным инструментом определения (непосредственно по ходу промышленного процесса) по скорости осаждения - скорости извлечения кремния из ПГС и текущего значения диаметра стержня. Указанная возможность позволяет оптимизировать газодинамические режимы в реакторе на различных стадиях процесса, что особенно актуально при завершении процесса, когда расходные характеристики резко возрастают.

Укажем, что совершенствование способа управления ростом стержня ПКК связано с целым рядом технических проблем прямого измерения геометрических параметров стержня в Реакторе, течение процесса. Выделим одну из них – проблема идентификации местоположения и перемещения визируемой кромки боковой поверхности стержня на фоне, создаваемом соседними стержнями (рис. 5).



Рисунок 5 - Визуальное наблюдение разогретых стержней
ПКК в Реакторе

Проблема осложнена условиями ведения измерения, основные из которых - изменяющаяся прозрачность окна наблюдения и условия взрывопожароопасности на производственном участке. Эффек-

тивное решение проблемы видится в применении оптоволоконных систем видеонаблюдения и алгоритмов цифровой обработки видеoinформации.

Заключение. Выполнен анализ источников погрешности, возникающей при измерении управляемых параметров процесса водородного восстановления ТХС в Реакторе получения ПКК. Определена методика, позволяющая оценивать влияние методических ошибок измерения диаметра стержня на скорость осаждения кремния. Полученные результаты позволяют утверждать об ограничениях в направлении развития управления процессом по параметрам, определяемым по каналу измерения диаметра стержня. В качестве перспективного - с точки зрения повышения адекватности используемых в управлении моделей и качества регулирования - предложен способ измерения скорости осаждения кремния по скорости роста диаметра стержня, определяемой в ходе прямого измерения перемещения видимой кромки стержня ПКК.

Предлагаемый подход обеспечивает уменьшение зависимости абсолютной ошибки измерения от стадии процесса - что характерно для методов, ориентированных на измерение диаметра стержня (слитка). Эта зависимость, и что - в высшей степени отрицательно - сказывается на поздних этапах ведения процесса, когда диаметр стержня имеет значительные габариты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технология полупроводникового кремния / Фалькевич Э.С., Пульнер Э.О., Червоный И.Ф., Шварцман Л.Я., Яркин В.Н., Салли И.В. – М.: Металлургия, 1992.- 408 с.
2. Гашенко С.И., Девяткин Б.Д., Дегтярик Н.В., Тимченко И.М.//Цветные металлы. 1970. №7. с. 56-57.
3. Алгоритм управления Siemens-Реактором производства поликристаллического кремния / Козин К.А., Горюнов А.Г., Левинцев С.Н., и др. // Известия Томского политехнического университета, 2009. №5 /том 315/. с.70 – 74.
4. Бочкарев Э.П., Иванов Л.С., Прокошин В.Д. // Исследования в области полупроводниковых материалов. – М.:ГИРедМет, 1983. с. 104 – 109.
5. Фильчаков П.Ф. Справочник по высшей математике. – Киев, “Наукова думка”, 1974. – 743 с.
6. Коваленко И.Н., Филиппова А.А. Теория вероятностей и математическая статистика. – М:”Высшая школа”, 1973. – 368с.

Д.А. Степаненко

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ СОСТАВА ПЕРВИЧНОГО ШЛАКОВОГО РАСПЛАВА ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ИХ МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО СОСТАВА

Аннотация. Изложен подход к решению задачи прогнозирования состава первичного шлакового расплава в процессе агрегатных и фазовых превращений железорудных окатышей в условиях доменной плавки. Для оперативного контроля качества первичных расплавов в составе АСУ ТП предложены модели с учетом минералогического состава окатышей.

Ключевые слова: прогнозирование, автоматизированная система, окатыши, минералогия, первичный шлаковый расплав.

Актуальность

Учитывая важность влияния процессов шлакообразования на состав и свойства продуктов плавки, эффективность технологического режима, его стабильность, в Институте черной металлургии НАНУ разработана и постоянно совершенствуется система контроля и управления шлаковым режимом «Шлак» [1]. Система реализует научно обоснованные подходы к установлению наиболее рациональных показателей шлакового режима доменной плавки во взаимной согласованности технологических и физико-химических параметров формирующихся в ходе агрегатных и фазовых превращений сырья в процессе плавки.

В процессе агрегатных и фазовых превращений сырья в условиях доменной плавки различают три стадии шлакообразования [2]:

- первичный шлак (первичный расплав) представляет собой смесь компонентов SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , MnO , FeO и других оксидов, находящихся в тесном контакте, которые при нагреве достигли достаточной температуры для сплавления и образования жидкой массы;

- промежуточный шлак является продуктом преобразования первичных шлаков при поступательном повышении температуры, снижении в них содержания FeO и MnO и повышении CaO и MgO с

полным растворением всех оксидов и сернистых соединений, находящихся в составе железосодержащих материалов при сокращении определенной доли SiO_2 , MnO , P_2O_5 и др. за счет восстановления и перехода соответствующих элементов в чугун;

- конечный шлак является продуктом присоединения к промежуточному шлаку золы кокса после растворения в нем серы, измененный в результате окислительных и вторичных восстановительных процессов в фурменной зоне и нижней части металлоприемника.

Характерной особенностью первичных шлаковых расплавов является определенное, иногда значительное, содержание невосстановленного косвенным путем (газообразными восстановителями CO и H_2) железа в виде FeO [3].

Если содержание основных шлакообразующих компонентов (CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , MgO) в первичных шлаках довольно просто вычисляется по составу шихты балансовым методом, то вычисление FeO является проблематичным. Важность определения содержания FeO в первичном шлаке обусловлена существенным его влиянием на физико-химические свойства (вязкость, поверхностное натяжение и др.), которые сказываются на показателях работы печи и ее энергетических затратах (прямое восстановление железа из FeO первичного шлакового расплава).

Изучению свойств первичных доменных шлаков посвящены работы ряда авторов [3-5]. При этом, несмотря на различие составов исследованных групп шлаков (высокоглиноземистых, магнезиальных, кислых, основных и т.д.), практически однозначным во всех исследованиях является вывод о значительном разжижающем влиянии FeO . Так, в работе [4] при изучении вязкости шлаков в системе $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ с добавками FeO показано, что при различных содержаниях Al_2O_3 и MgO , различной основности и различных температурах с увеличением содержания FeO в шлаках от 0 до 12% вязкость этих шлаков уменьшается в 1,5 – 5 раз.

Из выше отмеченного следует, что при оценке свойств первичных шлаковых расплавов и энергетических затрат доменной плавки на прямое восстановление железа лимитирующим звеном является определение количества FeO в первичных шлаках.

Цель

Разработка прогнозных моделей для оценки состава первичных шлаковых расплавов, образующихся в процессе агрегатных и фазовых превращений железорудных окатышей в условиях доменной плавки.

Изложение основных материалов исследования

В настоящее время в шихте доменной печи используется несколько видов подготовленного сырья с разными металлургическими свойствами, что усложняет условия доменной плавки, приводя к увеличению протяженности зоны вязко-пластичного состояния материалов. В связи с этим представляется необходимым, рассматривать вопрос первичного шлакообразования с позиции анализа минералогического состава и структуры, отдельно взятых железорудных материалов (окатыш, агломерат) и их поведения в условиях близких к доменной плавке.

В настоящей работе описан подход к прогнозированию состава первичного шлака, образующегося при использовании окатышей в составе доменной шихты.

При производстве окатышей различают два их типа: окатыши естественной основности (неофлюсованные) и офлюсованные окатыши.

Состав силикатной связки неофлюсованных окатышей характеризуется следующим химическим составом:

Таблица 1

Силикатные связи неофлюсованных окатышей по данным [6]*

Компонент	Содержание (%) при температуре обжига, °С			
	1150	1200	1250	1300-1350
Fe _{общ.}	15,4±1,4	11,2±0,5	11,2±0,5	11,4±0,4
SiO ₂	65,0±3,0	70,0±2,0	70,0±2,0	72,0±2,0
MgO	4,7±1,7	4,2±0,7	4,2±0,7	1,0±0,3
K ₂ O	9,0±1,0	9,8±0,8	9,2±0,8	9,7±0,7

*- По данным рентгеноспектрального микрозондирования.

Офлюсованные железорудные окатыши по сравнению с неофлюсованными представляют собой более сложную систему. Если в окатышах естественной основности направление минералообразования и конечный состав окатышей заложены в вещественном составе

концентрата, то в офлюсованных направлении минералообразования и конечный состав окатышей зависят от ряда переменных, таких, как фазовый состав концентрата, состав флюса и степень офлюсования окатышей (CaO/SiO_2).

Конечный состав силикатного расплава офлюсованных окатышей формируется в узком интервале температур 1250...1270 °C [6]. При этих температурах офлюсованные окатыши представляют собой двухфазную систему, где гематит находится в твердом (пластическом), а силикатный расплав в жидком состояниях. На этом этапе силикатный расплав представляет собой трехкомпонентный шлак. В его состав переходит весь кремний минералов вмещающих пород, кальций флюса и частично железо концентрата.

Для офлюсованных известняком окатышей, получаемых окислительным обжигом, характерно отсутствие шлаковых компонентов в решетке гематита. Поэтому все шлаковые компоненты CaO , SiO_2 и др., находящиеся при максимальных температурах обжига в расплаве, остаются в силикатной связке, которая образуется в момент охлаждения окатышей. Такой избирательный механизм минералообразования, когда основная рудная фаза не растворяет в своей решетке шлаковых компонентов, являясь как бы инертной по отношению к силикатному расплаву, а все шлаковые компоненты переходят сначала в расплав, а при охлаждении целиком в силикатную связку, свойствен окатышам, офлюсованным известняком. Связки офлюсованных окатышей из руд магнетитовых кварцитов располагаются в обширном поле кристаллизации волластонита системы $\text{CaO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ [6].

С целью количественной оценки содержания железа в силикатной связке проанализирована связь основности различных окатышей из концентратов железистых кварцитов (МихГок, ДГОК и ЛебГОК(1)) по данным [6] (рис. 1).

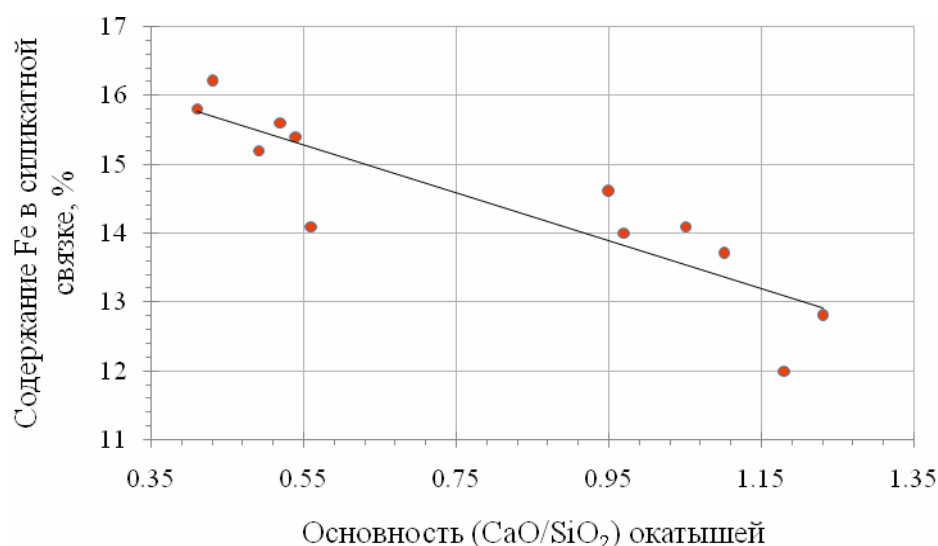


Рисунок 1 - Связь основности (CaO/SiO₂) окатышей с содержанием железа (Fe) в силикатной связке по данным [6]

Из анализа данных следует (рис. 1), что повышение основности силикатной связки и, соответственно окатышей в интервале значений CaO/SiO₂, способствует снижению содержания железа в связке.

Из установленной связи вытекает следующая зависимость:

$$Fe = -3,4811 \cdot \left(\frac{CaO}{SiO_2} \right) + 17,194, \quad R^2 = 0,7784, \quad (1)$$

где: Fe – содержание железа в силикатной связке офлюсованных окатышей, %; CaO/SiO₂ – основность окатышей.

По данным работы [6] количество силикатной связки в окатышах определяется их основностью и химическим составом железорудного концентрата (табл. 2)

Таблица 2

Количество силикатной связки в окатышах из концентратов Лебединского ГОКа

Содержание в концентрате, %		Количество связки, % при основности					
Fe	SiO ₂	0,1	0,3	0,5	1	1,2	1,5
65,3	7,8	4	13,2	14,6	18	19	21,7
68	4,7	3	9	9,8	13,4	15	17
69,4	2,8	2	5,8	6,4	7,9	9,2	10
70,4	1,8	1,5	4	4,3	5,1	5,7	6,6

Из анализа данных табл. 2 следует, что повышение основности окатышей и содержания в концентрате SiO_2 способствует повышению содержания силикатной связки в окатыше, данная взаимосвязь описывается уравнением:

$$m = -3,21831 + 1,748455 \cdot \text{SiO}_2 + 6,74174 \cdot \left(\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2} \right), R^2 = 0,85 \quad (2)$$

где m – количество силикатной связки в окатыше, %; SiO_2 – содержание оксида кремния в окатышах, %; CaO/SiO_2 – основность окатышей.

Полученные модели реализованы в алгоритмических и программных средствах автоматизированной системы контроля и управления шлаковым режимом доменной плавки «Шлак» (рис.1).

Print Preview

Печь №2

Наименование расчета:

Химический состав загружаемой шихты (%):

Наименование	Вес, тн	SiO2	Al2O3	CaO	MgO	MnO	S	Fe	FeO	Feмет	Влага	Вынос
КОКС	7.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.150	0.00	0.00	0.00	5.1	0.0
2 КОКСА	0.76	45.90	22.85	3.65	1.58	0.09	0.640	13.40	0.00	0.00	0.0	0.0
ОКАТЫШИ ЦГОК	3.00	4.13	2.56	1.24	2.42	0.23	0.029	60.20	3.60	0.00	0.0	0.0
ЖЕЛЕЗНАЯ РУДА	2.00	19.20	0.48	0.90	0.22	0.04	0.023	54.00	2.40	0.00	0.0	0.0
АГЛОМЕРАТ	19.00	8.86	0.79	11.35	0.90	0.10	0.040	54.46	13.50	0.00	2.6	0.0
ИЗВЕСТЯК	0.38	0.30	0.27	54.02	0.81	0.00	0.090	0.76	0.00	0.00	0.0	0.0
Всего (тонн):	TPod	2.50	0.41	2.39	0.26	0.03	0.09	13.07	2.65	0.00		
Всего (%):		10.40	1.70	9.93	1.08	0.11	0.36	54.32	11.03	0.00		

2 КОКСА, % = 11.50 Проба кокса: M25 = 87.5 ; M10 = 7.6 Кол-во подач: 8. Из них промывочных: 0.

Показатели шихты: De = -3.427 Коэффициент газ: Дутье: Содержание O2 (%) = 22.5
 Fe2O3 = 65.401 Ro = 0.750 Давление (атм) = 1.41 Расход пр. газа (м3/мин) = 162.4
 Feобщ. = 54.32 Dde = -1.011 CO2 (%) = 16.03 Расход дутья (м3/мин) = 2674
 CaO/SiO2 = 0.955 M2S = 87.500 CO (%) = 24.34 Температура дутья (°C) = 1147
 (CaO+MgO)/SiO2 = 1.058 Температура (°C) = 110.0 Давление дутья (атм) = 2.50
 Влажность дутья (г/м3) = 8.16

Расчетные показатели технологии:
 Степень испол. газа (доли) = 0.397
 Расход топлива на 1кг СФ = 0.283
 Длина фурменной зоны (м) = 1.509
 Рудная нагрузка = 3.483
 Температура горения = 2103

Доли перехода в шлак:
 LSi = 0.91632 LМn = 0.23491 LS = 0.96607 LFe = 0.00062

Химический состав чугуна (%):

Вес, тн	Si	Mn	S	P	C	Fe
13.817	0.708	0.115	0.021	0.082	4.540	94.534

Химический состав шлака (%):

Вес, тн	SiO2	Al2O3	CaO	MgO	MnO	FeO	S
6.792	31.670	3.440	34.761	3.631	0.386	24.909	1.202
Конечный:	5.448	42.074	7.492	43.845	4.748	0.116	1.534
Выход шлака:	394.313	кг/тн					

Расчетные свойства шлака

Наименование	Размер-ти	Первичный	Конечный
1. CaO/SiO2		1.098	1.042
2. (CaO+MgO)/SiO2		1.212	1.155
3. Al2O3/MgO		0.947	1.578
4. Коэфф. распр. серы Lсфакт.			73.048
5. Коэфф. распр. серы Lсравн.			31.252
6. Степень достижения равновесия	%		233.734
7. Серопоглощающая способность шлака			9.150
8. Физико-химический эквивалент шлака		-3.178	-2.364
9. Стехиометрия шлака		0.749	0.696
10. Температура начала фильтрации	°C	1347.327	
11. Температура максимальной фильтрации	°C	1494.192	
12. Вязкость шлака при 1300°C	па,сек	0.409	
13. Вязкость шлака при 1450°C	па,сек		0.352
14. Вязкость шлака при 1500°C	па,сек		0.247
15. Вязкость шлака при 1550°C	па,сек		0.177
16. Поверхностное натяжение при 1300°C	мН/м	349.808	
17. Поверхностное натяжение при 1500°C	мН/м		420.719
18. Энтальпия	кДж/кг		1827.504
19. Температура начала плавления	град°C	1198.823	1218.276
20. Температура начала кристаллизации	град°C		1312.694

Page 1 of 1

Рисунок 2 - Печатная форма результата расчета системы контроля и управления шлаковым режимом доменной плавки «Шлак»

Выводы:

1. Показана важность учета минералогического состава железорудных материалов, в частности окатышей, при описании процесса формирования первичного шлакового расплава в условиях доменной плавки;

2. Установлена связь основности окатышей с содержанием в составе их силикатной связки железа, которое в условиях доменной плавки входит в состав шлаковой связки представленной в виде трехкомпонентной системы $\text{CaO-Fe}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$. Предложена соответствующая прогнозная модель;

3. Из анализа минералогического и фазового состава окатышей установлены связи количества силикатной фазы в окатышах от содержания в них кремнезема и основности и предложена соответствующая прогнозная модель;

4. Полученные модели реализованы в алгоритмических и программных средствах автоматизированной системы контроля и управления шлаковым режимом доменной плавки «Шлак».

ЛИТЕРАТУРА

1. Физико-химические основы создания системы контроля и управления шлаковым режимом доменной печи в изменяющихся шихтовых и технологических условиях / Д.Н. Тогобицкая, А.Ф. Хамхотко, А.И. Белькова, П.И. Оторвин // Теория и практика производства чугуна: Тр. МНТК. – Кривой Рог, 2004г. – С. 504- 508.
2. Жило Н.Л. Формирование и свойства доменных шлаков. - М.: Metallurgia, 1974. - 120 с.
3. Гиммельфарб А. А.К вопросу о выборе оптимального состава первичного шлака доменной плавки / А. А. Гиммельфарб // Сб. "Шлаковый режим доменных печей". -М.: Metallurgia. -1967. -С.84-98.
4. Физико-химические и металлургические свойства доменных шлаков в четвертной системе $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ с добавками FeO / Т.И. Кухтин, Н.Е. Дунаев, Ж.Е. Слепцов [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. -1985. -№8. -С.17-21.
5. Гиммельфарб А.А. Вязкость шлаков четырехкомпонентной системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-FeO-Al}_2\text{O}_3$ / А.А. Гиммельфарб //Металлы. -1968. -№2. -С.59-70.
6. Петрография и минералогия железорудного сырья: Учебное пособие для вузов / Малышева Т.Я., Долицкая О.А. - М.: МИСИС, 2004. - 424 с.

В.В. Гнатушенко, О.І. Михальов

ОПТИМІЗАЦІЯ ТОПОЛОГІЇ БЕЗДРОТОВОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ

Анотація. Математично формалізовано задачу оптимального вибору найкращої топології бездротової сенсорної мережі при заданій множині покриттів для максимізації області покриття та визначення місцезнаходження кластерних центрів.

Ключові слова: бездротова сенсорна мережа, кластер, топологія, модель.

Постановка проблеми

Великий інтерес до вивчення бездротових сенсорних мереж (БСМ) обумовлений широкими можливостями їх застосування: моніторинг навколишнього середовища, автоматизація виробництва, пожежна безпека, військова розвідка, медицина і т.д. Використання в цих галузях традиційних провідних мереж не завжди ефективно через високу вартість монтажних і пуско-налагоджувальних робіт, а також технічного обслуговування. Крім того, у деяких ситуаціях взагалі неможлива прокладка кабелів по технологічних або організаційним причинам, тому все більше застосування знаходять БСМ.

Як наслідок, встають проблеми обмеженої пропускної здатності вузлів, надійності доставки інформаційних повідомлень, а також вартості розгортання й обслуговування БСМ. Вирішення цих проблем може бути забезпечене вибором топології мережі, що є актуальним завданням. Це дозволить скоротити трафік і знизити енергоспоживання на вузлах, що, у свою чергу, збільшить час безвідмовної роботи мережі й знизить загальні витрати на її обслуговування, що полягають у заміні встаткування й/або елементів живлення.

Аналіз останніх досліджень

Завданню побудови оптимальної топології БСМ присвячена велика кількість робіт [1-3]. У роботах використані різні стратегії вибо-

ру вузлів ретрансляторів, визначається оптимальний ступінь зв'язності вузлів мережі. Однак більшість досліджень не розглядають цільовою функцією радіус охопту й вибір центрів кластерів, а пропонують окремі правила побудови топології, яка буде мати ті або інші властивості.

Формулювання цілей статті (постановка завдання)

Метою роботи є зниження ресурсних витрат при проектуванні, розгортанні й експлуатації БСМ за допомогою алгоритмічної реалізації розрахунків топології мережі з урахуванням можливості її практичного відтворення.

Основна частина

Основною функцією бездротової сенсорної мережі є моніторинг, і об'єкт (точка області) вважається покритим, якщо він перебуває в зоні бачення хоча б одного сенсора. Підмножину сенсорів, що виконує функції мережі, називають покриттям. Хоча той самий сенсор може входити в різні покриття, загальний час функціонування сенсора обмежене його ресурсом. Залежно від додатка, мети мережі можуть різнитися. У деяких випадках потрібно покрити задану область або її частину, в інших – безліч об'єктів. Часто на покриття накладаються додаткові обмеження (зв'язність [4], наявність певної структури [5, 6] і ін.).

Розглянемо БСМ з N вузлами сенсорів, які спочатку хаотично розподілені в евклідовому двовимірному просторі. Однак, вузли рухаються, і їх розташування змінюється відповідно до безперервного часу. Відбувається безупинно стохастический процес. Для простоти розглядаємо тільки квадратне поле сенсорів $R \subseteq R^2$, але ця ж модель може бути використана, якщо $R \subseteq R^3$. Нехай $\mathbb{N} = \{1, 2, \dots, N\}$ – безліч вузлів сенсорів і кожний вузол у мережі використовує однаковий кінцевий діапазон передачі r (метрів). Крім того, існує кінцеве число точок в R , які претендують на центри кластерів. Нехай $K = \{1, 2, \dots, K\}$ – набір міток потенційних місць центрів кластерів. Для більшості n ($n \leq K$), K може бути обране в якості потенційного місця розташування кластерних центрів.

Планування складається з T ($T < \infty$) періодів однакової тривалості, тобто кінцева множина $\Upsilon = \{1, 2, \dots, T\}$, де кожний елемент Υ являє собою рішення. Під час кожного періоду $t \in \Upsilon$, сенсор вузла

$j \in \mathbb{N}$ генерує детерміновану d_j вимогу, яка повинна бути виконана його кластерним центром. Наприклад, ця вимога може представляти зведення даних, про які необхідно повідомити на центр кластера (наприклад, середнє значення тиску, спостережуваного під час періоду). Якщо вузол датчика перебуває в межах діапазону, принаймні, одного кластерного центру, задовольняючого вимогам, то вузол покритий. Передбачається, що сенсори тільки передають дані центрам кластерів. У данному випадку не розглядається маршрутизація: жоден сенсор не працює як передавальна станція для інших сенсорів у цій моделі. Наступні позначення використовуються в основній моделі:

d_j – вимога періода, яка сгенерована датчиком $j \in \mathbb{N}$;

p – імовірність відмови зв'язку між будь-яким кластерним центром і датчиком ($0 < p < 1$);

C – вартість одиниці розміщення одного центру кластера або вартість переналагодження;

Z_{ijt} – випадкова змінна, яка вказує близькість центру кластера i до сенсора j у період t ;

$$Z_{ijt} = \begin{cases} 1, & \text{якщо центр кластера } i \text{ розташований у} \\ & \text{межах досяжності датчика } j \text{ у період } t, \\ 0, & \text{інакше.} \end{cases}$$

Ціль моделі полягає в тому, щоб визначити місцезнаходження й перемістити туди центри кластерів, перевизначити сенсори для центрів кластерів кожного періоду. Тому, введемо наступні змінні:

x_{it} – бінарна змінна для визначення місця розташування передбачуваного центру кластера,

$$x_{it} = \begin{cases} 1, & \text{якщо центр кластера поміщений у місце} \\ & \text{розташування } i \text{ у період } t, \\ 0, & \text{інакше;} \end{cases}$$

v_{jkt} – бінарна змінна, що вказує охват сенсора принаймні k кластерами в період t ,

$$v_{jkt} = \begin{cases} 1, \text{ якщо сенсор } j \text{ покритий принаймні } k \\ \text{кластерними центрами в період } t, \\ 0, \text{ інакше;} \end{cases}$$

w_{it} - бінарна змінна, що описує чи очолює даний сенсор кластер i у періоді t ,

$$w_{it} = \begin{cases} 1, \text{ якщо центр кластера розташований в } i \\ \text{період } t - 1, \text{ але не в період } t, \\ 1, \text{ якщо центр кластера розташований в } i \\ \text{період } t, \text{ але не в період } t - 1, \\ 0, \text{ інакше.} \end{cases}$$

Пропонується наступна математична модель, щоб максимізувати область охопту й звести до мінімуму витрати на визначення місцезнаходження й переміщення кластерних центрів, що дозволить оптимізувати топологію БСМ.

$$\max \sum_{t \in \Upsilon} \sum_{j \in \mathbb{N}} \sum_{k=1}^K (1-p)p^{k-1} d_j v_{jkt} - C \sum_{i \in K} \sum_{t \in \Upsilon} w_{it} \quad (1)$$

$$P\left(\sum_{k=1}^K v_{jkt} - \sum_{i \in K} z_{ijt} x_{it > \psi}\right) \leq k \quad j \in \mathbb{N}, t \in \Upsilon \quad (2)$$

$$\sum_{i \in K} x_{it \leq n} \quad t \in \Upsilon \quad (3)$$

$$w_{it} \geq x_{it-1} - x_{it} \quad i \in K, t \in \Upsilon \setminus \{1\} \quad (4)$$

$$w_{it} \geq x_{it} - x_{it-1} \quad i \in K, t \in \Upsilon \setminus \{1\} \quad (5)$$

$$w_{it} \geq 0, x_{it} \in \{0, 1\} \quad i \in K, t \in \Upsilon \quad (6)$$

$$v_{jkt} \in \{0, 1\} \quad j \in \mathbb{N}, k \in K, t \in \Upsilon \quad (7)$$

Цільова функція (1) представляє собою очікувану вимогу покриття центрами кластерів мінус повна вартість переміщення сенсорів. Компонент $\sum_{k=1}^K (1-p)p^{k-1} d_j v_{jkt}$ є очікуване покриття сенсора j у період t , враховуючи якість зв'язку. Обмеження (2) гарантує, що якщо сенсор j покритий k ' кластерами в момент часу t , то кожна зі змінних $v_{j1t}, v_{j2t}, \dots, v_{jk't}$ приймає значення 1, оскільки цільова функція містить компонент v_{jkt} . Відзначимо, що в обмеженні (2) z_{ijt}

є випадковою величиною, яка описує забезпечення зв'язку центру кластера i і датчика j під час t . Тут ψ ($\psi > 0$) розглядається як «мала» сума неприпустимості й k ($0 < k < 1$) введена користувачем імовірність. Більші значення k можуть розв'язати проблему, але це будуть не високоякісні рішення. З іншого боку, коли $p=0$, то не існує жодного шансу порушення обмежень і одержуємо консервативне рішення. Обмеження (3) гарантує, що максимальне число кластерних центрів не може перевищити n під час будь-якого періоду. Обмеження (4) і (5) визначають переміщення центрів кластерів і змушують прийняти w_i рівної 1, якщо є зміна місця розташування центру кластера i з погляду кластерного визначення в момент часу t . Припустимі значення змінних гарантуються обмеженнями (6) та (7).

Математичне формулювання можна розглядати як узагальнення моделі, представленої в [7]. Зокрема, розглядається стохастична еволюція розташування датчиків із часом, а не припускається, що позиції їх відомо в будь який час. Таким чином, замість вказівки детермінованих обмежень для забезпечення зв'язку сенсорів і кластерних центрів, використовується імовірнісне обмеження (2). Якщо на початку кожного періоду часу при проведенні експеримента розташування сенсорів відомі, то (2) стає детермінованим обмеженням, роблячи завдання оптимізації моделі еквівалентним запропонованому в [7].

Висновки та перспективи подальших досліджень

У результаті досліджень одержав подальший розвиток підхід до розв'язку оптимізації топології БСМ на основі кластеризації. Математично формалізовано задачу оптимального вибору найкращої топології бездротової сенсорної мережі при заданій безлічі покриттів для максимізації області покриття й відомості до мінімуму витрат на визначення місцезнаходження й переміщення кластерних центрів. Подальші дослідження будуть присвячені порівняльному аналізу обраних топологій реальних БСМ з визначенням кількісних показників, зокрема QoS.

ЛІТЕРАТУРА

1. Kumar, V. Energy efficient clustering algorithms in wireless sensor networks. / V. Kumar, S. Jain, and S. Tiwari// International Journal of Computer Science Issues.– 2011.– vol.8.– P.259-268
2. Liu, X. Clustering routing algorithms in wireless sensor networks. / X. Liu, J. Shi // KSII Transactions on Internet and Information Systems.–2012.–vol. 6.–P.1735-1755.
3. Younis, O. Node clustering in wireless sensor networks. /O. Younis, M. Krunz, S. Ramasubramanian // Recent developments and deployment challenges. IEEE Network.–2006.–vol.20.–P.20-25.
4. Inancm. Power optimal connectivity and coverage in wireless sensor networks / Inancm., Magdon-ismailm., Yenerb // Department of Computer Science, Rensselaer Polytechnic Institute.– NY.– 2003.– 534 p.
5. Астраков, С.Н. Сенсорні мережі й покриття площини колами / С.Н.Астраков, И.Ерзина, В.Залюбовский// Дискрет. аналіз і дослід. операцій.– 2009.– Т. 16.– № 3. – С. 3-19.
6. Segalm. Improving lifetime of wireless sensor networks //Netw. Protocols Algorithms. – 2009. – Vol. 1.– N 2. – P 48-60.
7. Patel, D. J. Clustering sensors in wireless ad hoc networks operating in a threat environment./ D. J. Patel, R. Batta, R. Nagi // Operations Research.– 2005. – vol. 53.– P.432-442.

В.П. Малайчук, И.И. Деревянко

**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ В ЗАДАЧАХ
ОЦЕНКИ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СВОЙСТВ СЛОЖНЫХ
НЕСТАЦИОНАРНЫХ ДИСКРЕТНЫХ СИГНАЛОВ**

Аннотация. Исследованы зависимости ошибок определения корреляционных коэффициентов модели α_1 и α_2 от длины выборки и времени корреляции модели. Построены графики минимальных, максимальных, средних оценок корреляционных коэффициентов модели и разбросы оценок.

Ключевые слова: модель измерений, корреляционные коэффициенты, длина выборки, кривые зависимостей, среднее, разбросы.

Постановка задачи

Не только дефектоскопия исследуемого объекта, но и оценка его качества является важной составляющей неразрушающего контроля. Корреляционные свойства сигнала являются характеристикой, которая описывает качественное состояние исследуемого объекта.

Измерения независимо от метода контроля можно представить в виде модели

$$x(k) = m(k)[S_0(k) + \Delta S(k) + A(k)] + n(k), \quad (1)$$

где $x(k)$ – выборка экспериментальных измерений; $S_0(k)$ – низкочастотный медленноменяющийся тренд, описывающий влияния внешней среды на качество; $\Delta S(k)$ – высокочастотный сигнал, описывающий влияние технологии изготовления на качество; $A(k)$ – аномальный дефектный участок; $m(k)$ – контактная модулирующая помеха; $n(k)$ – измерительный шум с плотностью распределения вероятностей Гаусса; k – порядковый номер измерения.

Каждая из составляющих несет информацию о состоянии объекта, при этом отличается одна от другой частотами, мощностями и корреляционными свойствами. Для получения подлинной информа-

ции о качестве объекта необходимо точно оценивать каждую из них, но использование метода определения функций корреляции приводит к ошибкам разной величины для каждой из составляющей.

Следовательно, возникает задача оценки точности определения корреляционной функции в условиях размерной, частотной и шумовой неопределенностей, для решения которой необходимо, путем компьютерного моделирования, разработать алгоритмы формирования этих последовательностей и провести вычислительные эксперименты.

Цель исследования - оценка точности определения корреляционной функции.

Алгоритм формирования стохастических случайных дискретных величин

Моделью коррелированных случайных сигналов, таких как $S_0(k)$ и $\Delta S(k)$, может служить последовательность Юла $U(k)$. Она формируется путем преобразования дискретного белого шума рекурсивным цифровым фильтром второго порядка [1]

$$U(k) = \alpha_1 U(k-1) - \alpha_2 U(k-2) + \beta \xi(k), \quad (2)$$

где $\xi(k)$ - дискретный белый шум; β - коэффициент усиления; α_1 и α_2 - корреляционные коэффициенты порядка.

Цифровая модель является аналогом описания непрерывных сигналов дифференцированными уравнениями второго порядка

$$\frac{\partial^2 U(t)}{\partial t^2} + a_1 \frac{\partial U(t)}{\partial t} + a_2 U(t) = \beta \xi(t), \quad a_1 = 2\delta\omega_0, \quad a_2 = \omega_0^2, \quad (3)$$

где δ - коэффициент затухания; $\omega_0 = 2\pi f_0$ - резонансная частота фильтра второго порядка; f_0 - частота сигнала.

Если из сигнала $U(t)$ после аналогово-цифрового преобразования формируется дискретный сигнал $U(k)$, то

$$\alpha_1 = 2e^{-\delta\omega_0\Delta t} \cos(\sqrt{1-\delta^2}\omega_0\Delta t), \quad \alpha_2 = e^{-2\delta\omega_0\Delta t}. \quad (4)$$

где Δt - шаг дискретизации измерений сигнала (параметр АЦП).

Автокорреляционная функция последовательности (2) описывается разностным уравнением

$$r(k) = \alpha_1 r(k-1) - \alpha_2 r(k-2), \quad (5)$$

где коэффициенты корреляции $r(1) = r_1$ и $r(2) = r_2$ равны

$$r_1 = \frac{\alpha_1}{1 - \alpha_2}, \quad r_2 = \frac{\alpha_1^2 - \alpha_2(1 + \alpha_2)}{1 + \alpha_2}, \quad (6)$$

и связаны с корреляционными коэффициентами порядка α_1 и α_2 зависимостями Юла-Уокера

$$\alpha_1 = \frac{r_1(1 - r_2)}{1 - (r_1)^2}, \quad \alpha_2 = \frac{r_2 - (r_1)^2}{1 - (r_1)^2}. \quad [2] \quad (7)$$

Рассмотрим примеры случайных дискретных величин, сформированных по данному алгоритму. На рисунке 1 изображены выборки сигналов Юла $U(k)$ с частотами $f1 = 100$ Гц, $f2 = 50$ Гц и $f3 = 25$ Гц, при этом шаг дискретизации $\Delta t = 0,0005$. Коэффициенты усиления β для различных частот выбирается так, чтоб амплитуды сигналов имели одинаковый масштаб.

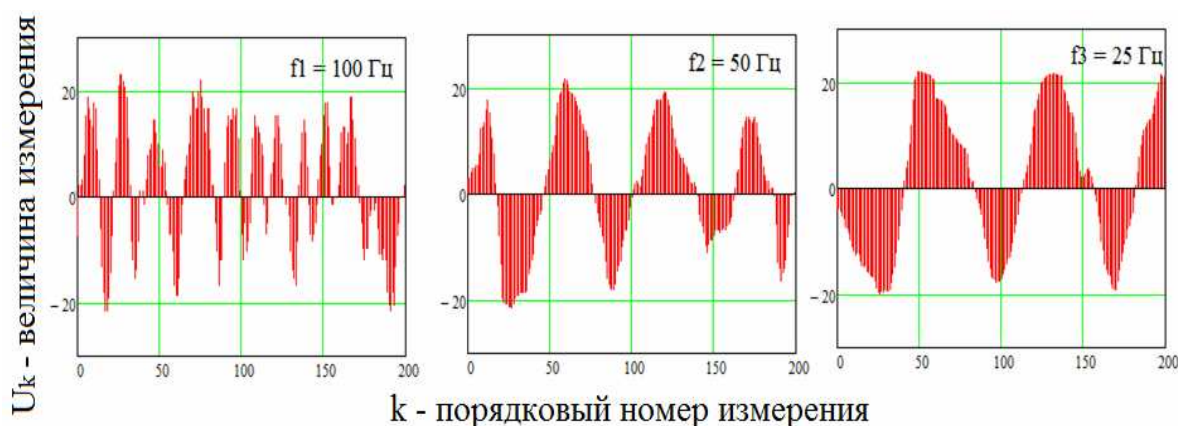


Рисунок 1 - Примеры исследуемых сигналов
при частотах 100, 50, 25 Гц

Результаты вычислительных экспериментов и их анализ

Предполагается, что при достижении участком определенной длины выборки n его корреляционные свойства и информативные параметры будут близки к свойствам и параметрам общей выборки

измерений. Это дает возможность определить имело ли место изменение свойств сигнала в заданном интервале времени. Возникает первая задача – исследование влияния размера выборки n на эффективность оценивания параметров модели α_1 и α_2 .

Теоретические результаты исследований и эффективность оценивания параметров определялись путём проведения вычислительных экспериментов. Для этого были сгенерированы выборки размерами n от 5 до 1000 измерений с частотой $f_1=100$ Гц и заданными коэффициентами α_1 и α_2 , затем данные коэффициенты оценивались. Количество повторений экспериментов по оцениванию параметров для выборок всех размерностей составляло 1000, затем результаты усреднялись.

Приведем таблицу зависимости точности определения коэффициентов α_1 и α_2 от количества измерений в исследуемой выборке. В таблице представлены теоретические значения коэффициентов α_1 и α_2 , их минимальные, максимальные, средние оценки и разбросы оценок при 1000 повторений экспериментов.

Таблица 1

Зависимость точности определения коэффициентов α_1 и α_2 от количества измерений в исследуемой выборке

α_1	α_2	n	$\min(\alpha_1^*)$	$\overline{\alpha_1^*}$	$\max(\alpha_1^*)$	$\sqrt{D(\alpha_1^*)}$	$\min(\alpha_2^*)$	$\overline{\alpha_2^*}$	$\max(\alpha_2^*)$	$\sqrt{D(\alpha_2^*)}$
1,562	0,641	5	0,058	0,831	1,562	0,847	0,043	0,641	1,262	0,298
		10	0,119	1,013	2,379	0,709	0,028	0,569	1,734	0,360
		25	0,760	1,426	2,535	0,390	0,069	0,657	1,968	0,369
		50	0,938	1,500	2,212	0,269	0,189	0,650	1,431	0,238
		75	1,118	1,541	1,978	0,208	0,239	0,652	1,222	0,193
		100	1,146	1,575	1,943	0,152	0,301	0,664	1,093	0,145
		150	1,252	1,566	1,815	0,123	0,326	0,630	0,857	0,109
		200	1,347	1,556	1,768	0,081	0,446	0,637	0,794	0,083
		250	1,234	1,560	1,734	0,080	0,424	0,636	0,782	0,075
		300	1,361	1,552	1,714	0,068	0,520	0,649	0,777	0,052
		400	1,415	1,566	1,670	0,048	0,526	0,637	0,740	0,047
		500	1,429	1,557	1,641	0,045	0,541	0,645	0,720	0,041
		750	1,436	1,562	1,634	0,042	0,551	0,644	0,701	0,038
		1000	1,441	1,559	1,621	0,040	0,569	0,639	0,694	0,036

Применим визуально-аналитический метод для анализа полученных результатов, представив данные из таблицы 1 в виде графиков.

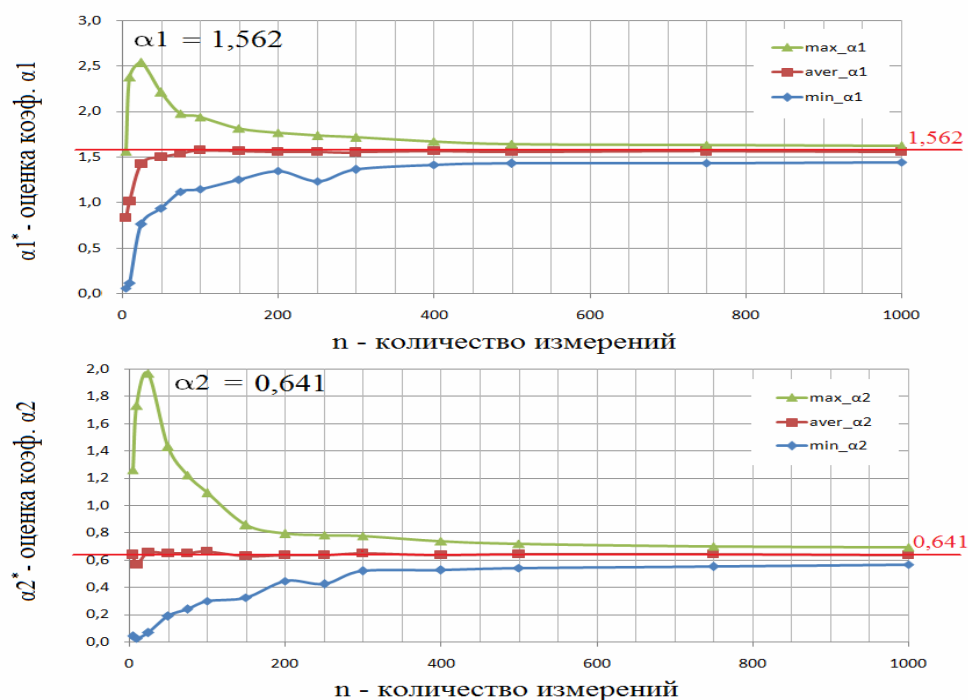


Рисунок 2 - Графики зависимостей нормированных коэффициентов модели от величины длины выборки

Из графики на рисунке 2 видно, что оптимальным количеством измерений входящих в исследуемый участок является $n=200$, так как дальнейшее увеличение количества измерений не приводит к существенному снижению ошибки метода. Также приведем график зависимости оценок дисперсии от количества измерений, входящих в исследуемый участок.

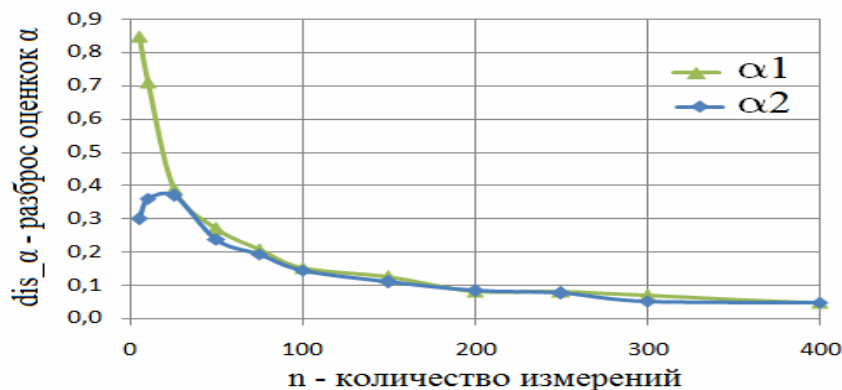


Рисунок 3 - Зависимость оценок дисперсии от количества измерений

Полученные значения дисперсий также указывают на то, что при количестве измерений $n = 200$ дисперсия оценок α_1^* и α_2^* достигает минимального значения, что позволяет установить оптимальную длину выборки.

Для визуализации полученных результатов, на рисунке 4 приведем сравнительные гистограммы оценок α_1^* при выборках разной длины, при этом предварительно нормируем полученные результаты по теоретическому значению α_1 . Для значений коэффициентов α_2 получаем аналогичные зависимости.

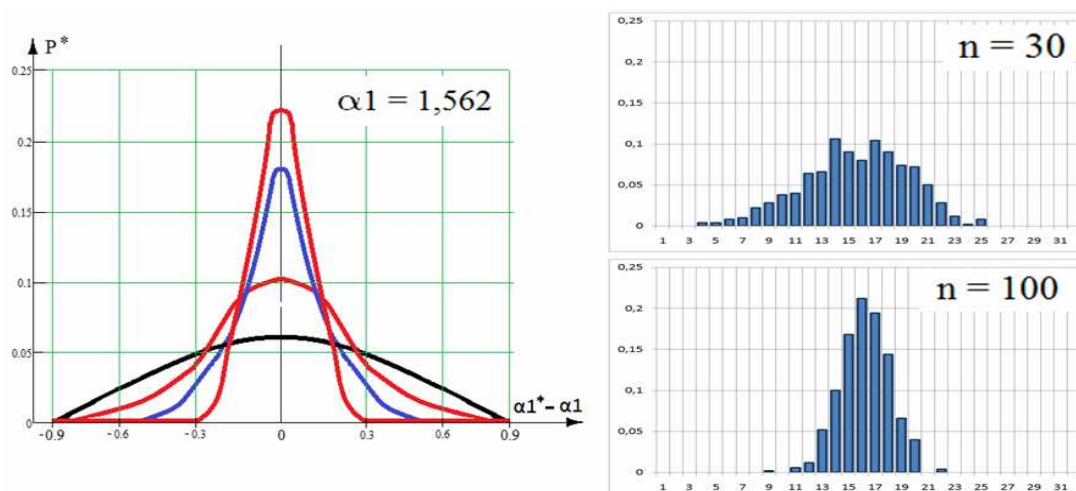


Рисунок 4 - Сравнительные гистограммы оценок α_1^* (нормированные по значению α_1)

при исследовании выборок разной длины $n=10, 30, 50, 100$

Также на рисунке 5 приведем проекции трехмерной гистограммы оценок α_1 от длины исследуемой выборки.

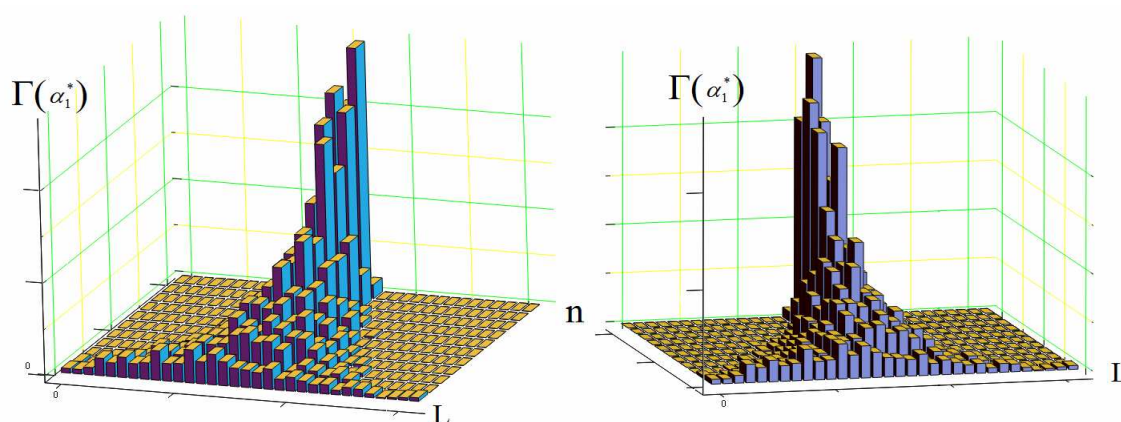


Рисунок 5 - Проекция трехмерной гистограммы оценок α_1^* от длины исследуемой выборки, где L – номер гистограммного интервала

Полагая, что составляющие модели (1) $S_0(k)$ и $\Delta S(k)$ имеют разные частотные характеристики, соответственно, для каждой из них необходимо оценивать корреляционные коэффициенты модели с минимальной ошибкой. Исходя из этого, возникает вторая задача – исследование точности определения коэффициентов модели α_1 и α_2 в зависимости от времени корреляции $\tau_0 = 1/f_0$.

Проведем вычислительный эксперимент, результатом которого будет оценка влияния частоты сигнала на точность определения информативных параметров. Для этого сгенерируем выборку измерений $n=200$ с заданными коэффициентами α_1 и α_2 , затем последовательно определим их значения при различных частотах f_0 от 1 до 200 Гц исследуемых сигналов.

Приведем таблицу зависимости точности определения коэффициентов α_1 и α_2 от частоты сигнала. В таблице представлены теоретические значения коэффициентов α_1 и α_2 , их минимальные, максимальные, средние оценки и разбросы оценок при 1000 повторений экспериментов.

Таблица 2

Зависимость точности определения коэффициентов
 α_1 и α_2 в зависимости от частоты исследуемой выборки

α_1	α_2	f_0	$\min(\alpha_1^*)$	$\overline{\alpha_1^*}$	$\max(\alpha_1^*)$	$\sqrt{D(\alpha_1^*)}$	$\min(\alpha_2^*)$	$\overline{\alpha_2^*}$	$\max(\alpha_2^*)$	$\sqrt{D(\alpha_2^*)}$
1,996	0,996	1	0,459	1,036	2,586	0,982	0,003	0,044	0,996	0,957
1,978	0,978	5	0,473	1,132	2,393	0,896	0,006	0,221	1,288	0,824
1,956	0,957	10	0,162	1,273	3,235	0,841	0,026	0,541	3,399	0,762
1,889	0,895	25	0,209	1,901	3,756	0,642	0,131	0,991	3,912	0,629
1,779	0,801	50	1,258	1,793	2,537	0,279	0,214	0,938	3,639	0,441
1,670	0,717	75	1,312	1,649	1,940	0,142	0,353	0,730	1,099	0,147
1,562	0,641	100	1,343	1,539	1,756	0,092	0,408	0,637	0,818	0,086
1,457	0,574	125	1,216	1,442	1,736	0,086	0,408	0,566	0,744	0,070
1,354	0,514	150	1,203	1,344	1,484	0,072	0,353	0,518	0,686	0,065
1,255	0,460	175	1,072	1,249	1,408	0,070	0,305	0,464	0,664	0,065
1,158	0,411	200	0,973	1,143	1,274	0,068	0,230	0,411	0,575	0,066

Применим визуально-аналитический метод, для визуализации полученных результатов, представив данные из таблицы 2 в виде графиков.

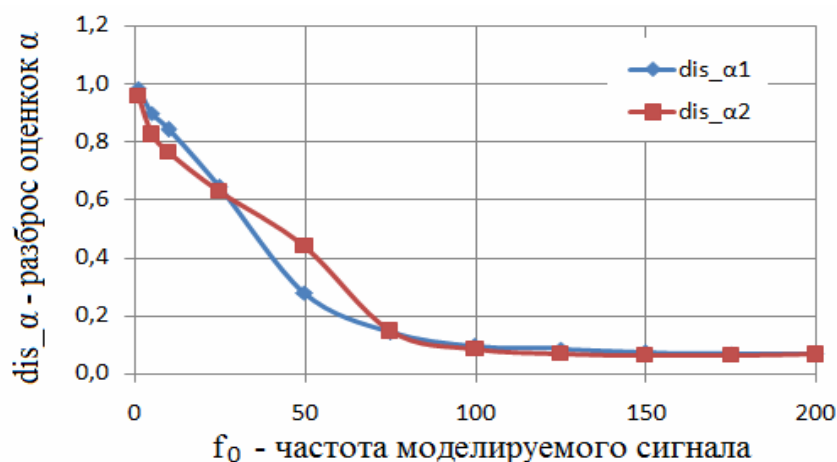


Рисунок 6 - Зависимость разброса оценок α_1^* и α_2^* от частоты моделируемого сигнала

Проанализировав график, представленный выше, можно сделать вывод, что оценки α_1^* и α_2^* наиболее точно можно определить при частотах от 75 Гц. Это объясняется тем, что при увеличении частоты исследуемого сигнала в заданный интервал времени попадает большее количество колебаний, что позволяет провести более точный статистический анализ.

Проведем следующий вычислительный эксперимент, результатом которого будет сравнение работоспособности метода определения коэффициентов α_1 и α_2 при частотах $f_1=100$ Гц, $f_2=50$ Гц и $f_3=25$ Гц с учетом количества измерений в выборке. Полученные результаты представим в виде визуально-аналитического графика, представленного на рисунке 7. Поскольку на рисунке проводятся нормированные данные по теоретическим значениям корреляционных коэффициентов модели, то наиболее точной оценкой найденных коэффициентов модели будет та, которая располагается в 0. На рисунке приведены результаты по коэффициенту α_1 , результаты по коэффициенту α_2 - аналогичны.

На рисунке хорошо видно, что точность определения коэффициентов модели зависит как от частоты генерируемого сигнала, так и от количества измерений в выборке. Чем выше частота сигнала и

больше число измерений, тем точнее полученная оценка информативных параметров.

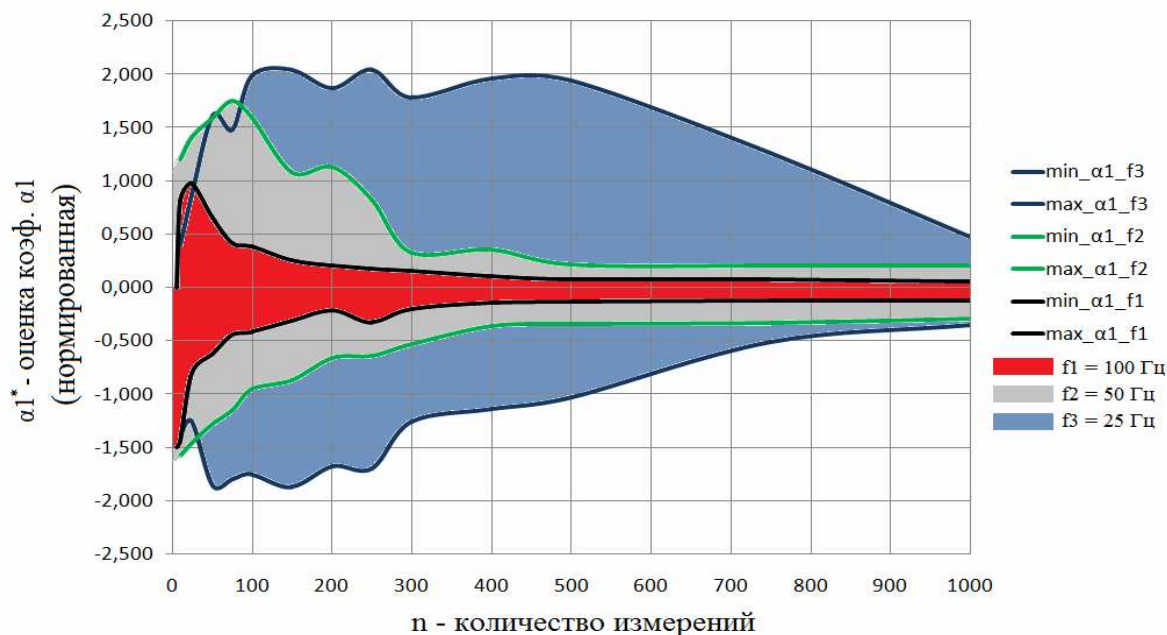


Рисунок 7 – График зависимости ошибок определения корреляционного коэффициента модели α_1 в зависимости от длины выборки и времени корреляции

Выводы

По результатам визуально-аналитического анализа графиков и гистограмм оценок измеряемых параметров и их статистических характеристик (средних значений и нормированных разбросов) можно сделать следующие выводы и рекомендации:

1) точность определения корреляционных коэффициентов модели сильно зависит от размерности исследуемого участка и частоты сигнала, причем, чем их значения выше – тем точнее полученные оценки информационных параметров.

2) рекомендуется выбирать размерность исследуемого участка $n = 200$ при $f_1 = 100$ Гц, $n = 300$ при $f_2 = 50$ Гц, $n = 1000$ при $f_3 = 25$ Гц, при шаге дискретизации $\Delta t = 0,0005$, так как при таком количестве измерений стохастические закономерности сохраняют свои корреляционные свойства и информационные параметры. Дальнейшее увеличение длины выборки – нецелесообразно.

3) исследования по определению коэффициентов α_1 и α_2 в условиях частотной неопределенности показали, что информативные параметры могут быть найдены с высокой точностью при условии, что частота исследуемого сигнала превышает или равна значению $f_0 = 75$ Гц без привлечения большого количества измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабак В.П. Стохастические сигналы и спектры / В.П. Бабак, А.Я. Белецкий, А.В. Приставка // Учебное пособие – К.: КИТ, 2004. – 290 с.
2. Малайчук В.П. Математическая дефектоскопия / В.П. Малайчук, А.В. Мозговой // Монография – Днепропетровск: Системные технологии, 2005. – 180 с.

ДОСЛІДЖЕННЯ ШВИДКОДІЇ РЕАЛІЗАЦІЇ КЛІТИННО-АВТОМАТНИХ ОБЧИСЛЕНЬ

Анотація. Розглядається залежність швидкодії «класичної» та «фронтальної» реалізації клітинних автоматів від активності клітинних автоматів в області моделювання, та її розмірів.

Ключові слова: Клітинний автомат, фронтальний клітинний автомат, алгоритм, швидкодія.

Постановка проблеми. Одним з ефективних математичних апаратів розв'язання динамічних польових задач з розподіленими параметрами є клітинні автомати [1, 2]. Недоліком даного способу моделювання є велика кількість обчислень, що призводить до зниження швидкодії алгоритму.

Аналіз останніх публікацій. Як відомо, головним елементом алгоритму клітинних автоматів є визначення стану клітини за допомогою так званих правил переходу [3]. Ці правила описують стан осередків у наступному кроці на підставі визначення стану осередків у його сусідстві (поточний стан клітини часто не враховується). Класичний алгоритм клітинних автоматів використовує це правило безпосередньо, тобто осередок збирає інформацію (рисунок 1). Для комірки в середині рисунка перевіряються правила переходу і вона отримує інформацію, досліджуючи стан своїх сусідів (наприклад в оточенні Дж. фон Неймана). Тому для реалізації обчислень в одному кроці необхідно дослідити весь клітинний простір (стрілка у верхній частині малюнка), перевіряючи правила переходу для кожного осередку і стан всіх сусідів для кожного осередку просторі. У фронтальних клітинних автоматах напрямок передачі інформації змінюється на протилежне, як це показано на рисунку 2. Це перший крок, який не дає будь-яких видимих переваг тому, що і в цьому випадку доводиться досліджувати весь клітинний простір і немає істотної різниці чи

буде осередок отримувати або відправляти інформацію до всіх своїх сусідів.

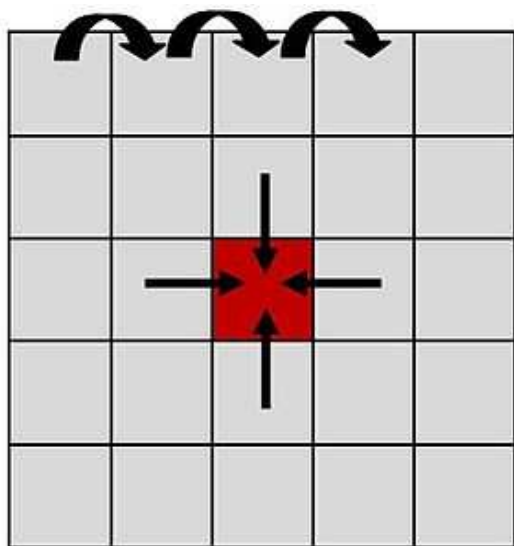


Рисунок 1 - Алгоритм класичного клітинного автомата

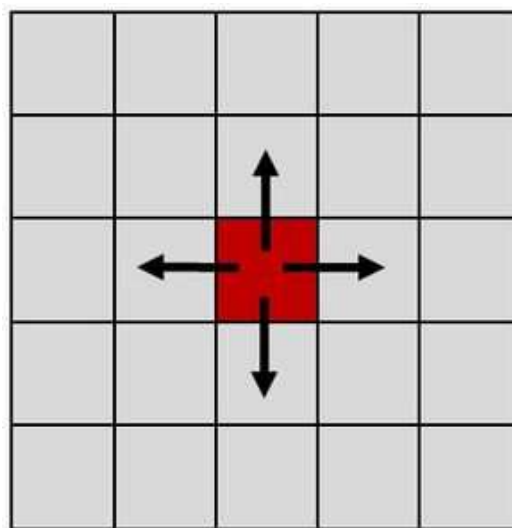


Рисунок 2 - Напрямок передачі інформації фронтального клітинного автомата

Різниця між класичним та фронтальним алгоритмами з'являється, якщо розглядаються переходи та стабільні стани. Якщо в сусідстві осередку не відбуваються зміни, він залишається в тому ж стані, і можна сказати, що він знаходиться в стійкому сталому стані. І навпаки, якщо відбуваються зміни в сусідстві, він може змінити свій стан, тобто буде в перехідному стані. Вже на цьому етапі проявляються відмінності між двома алгоритмами, так як збір інформації від сусідів не створює будь-яких передумов, які вказували б, чи слід збирати таку інформацію, чи ні. Однак, при поширенні (розсилці) інформації від осередку до сусідів рішення може бути прийняте на підставі знання, чи змінився стан цього осередку чи ні. Осередок, який не змінює свого стану, не посилатиме інформацію до свого оточення, однак, якщо зміни в його стані відбулися, осередки в усьому його оточенні отримають повідомлення, і на підставі цієї інформації справлять перевірку правил переходу, без вивчення свого сусідства. Це другий крок, друга відмінність.

Третій і останній крок полягає у використанні для розрахунку тільки осередків у перехідному стані. Якщо сутністю другого кроку була розсилка сигналів тільки від осередків в перехідному стані і не-

змінним дослідженням всього клітинного простору, то головним елементом третього етапу модернізації алгоритму є обмеження дослідження осередків тільки тими з них, які знаходяться в перехідному стані.

Як приклад ефективного застосування може бути показаний процес зростання кристала. Частковий простору з зростаючим кристалом показаний на рисунку 3. У будь-якому процесі росту кристалу або зерна, можна виділити три зони. У першій зоні (а) не відбулося ніяких змін вихідного стану. У другій зоні (b) такі зміни закінчилися, і подальші зміни більше відбуватися не будуть. Нарешті, в третій зоні (с) зміни відбуваються в даний момент часу і, отже, тільки осередки з третьої зони використовуються в розрахунках. І перша, і друга зони повинні бути виключені з розрахунків в поточному кроці, оскільки зміни в осередках цих зон не очікуються і не відбудуться. Для вибраної комірки на рисунку 3 в перехідному стані показано стрілками напрямком передачі інформації, суттєвої для сусідів. Таким чином, в поточному кроці тільки шість осередків у зоні (с) будуть брати участь у розрахунку.

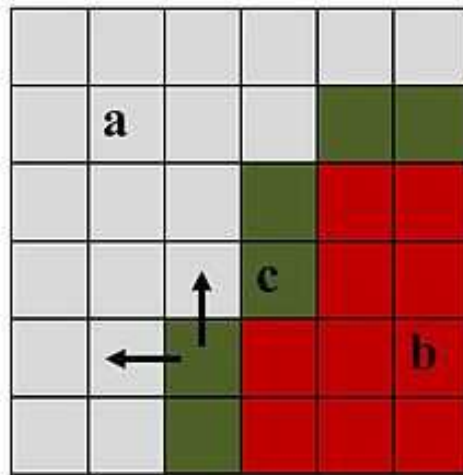


Рисунок 3 - Алгоритм фронтального клітинного автомата

Використання фронтального клітинного автомата, замість звичайних клітинних автоматів, дозволяє знизити обчислювальні витрати в двовимірних (2D) моделях, але особливо істотно в тривимірних (3D), тому що значні області простору виключаються з розрахунку в кожному кроці за часом, і лише тонкий шар бере участь у розрахунку. У класичних клітинних автоматах практично кожен крок вима-

гає таких же витрат і час його обчислення протягом всього процесу моделювання залишається незмінною. Час же розрахунку одного кроку фронтального клітинного автомата залежить від кількості клітин, що беруть участь у розрахунку, і змінюється в широких межах, залишаючись завжди лише малою частиною порівняно з часом обчислень одного кроку в класичних клітинних автоматах. Кожна комірочка фронтального клітинного автомата насправді бере участь у розрахунках тільки один раз протягом усього процесу розрахунку, в той час, як у класичному алгоритмі, на кожному кроці обчислень. Тобто, основна різниця між фронтальним і класичним клітинним автоматом полягає в способі обчислення станів клітин на кожному кроці.

Постановка задачі. Актуальною задачею є визначення меж ефективного застосування фронтальних клітинних автоматів у порівнянні з їх класичною реалізацією.

Результати досліджень

Дослідження швидкодії роботи клітинно-автоматних алгоритмів проводилось на прикладі хвильової клітинно-автоматної моделі Вінера-Розенблюта [4]. Вихідними даними для проведення серії обчислювальних експериментів були наступні: розмір поля 100*100 клітин, кількість ітерацій 120. Загалом, було проведено серію з трьох обчислювальних експериментів при варіації початкового заповнення області моделювання.

Як відомо, в алгоритмі фронтального КА додається умова перерахунку стану клітини за правилами. Якщо хоч один сусід змінив свій стан, то наступний стан для центральної клітини буде перерахований за правилами, інакше - стан незмінний.

В коді алгоритму це змінилось наступним чином:

1) для кожної клітини ввели маркер, що фіксує зміну її стану «is_changed»;

2) з'явилась нова функція що повертає для кожної клітини значення параметру зміни після кожного кроку;

3) з'явилась умова перерахунку стану клітини за правилами

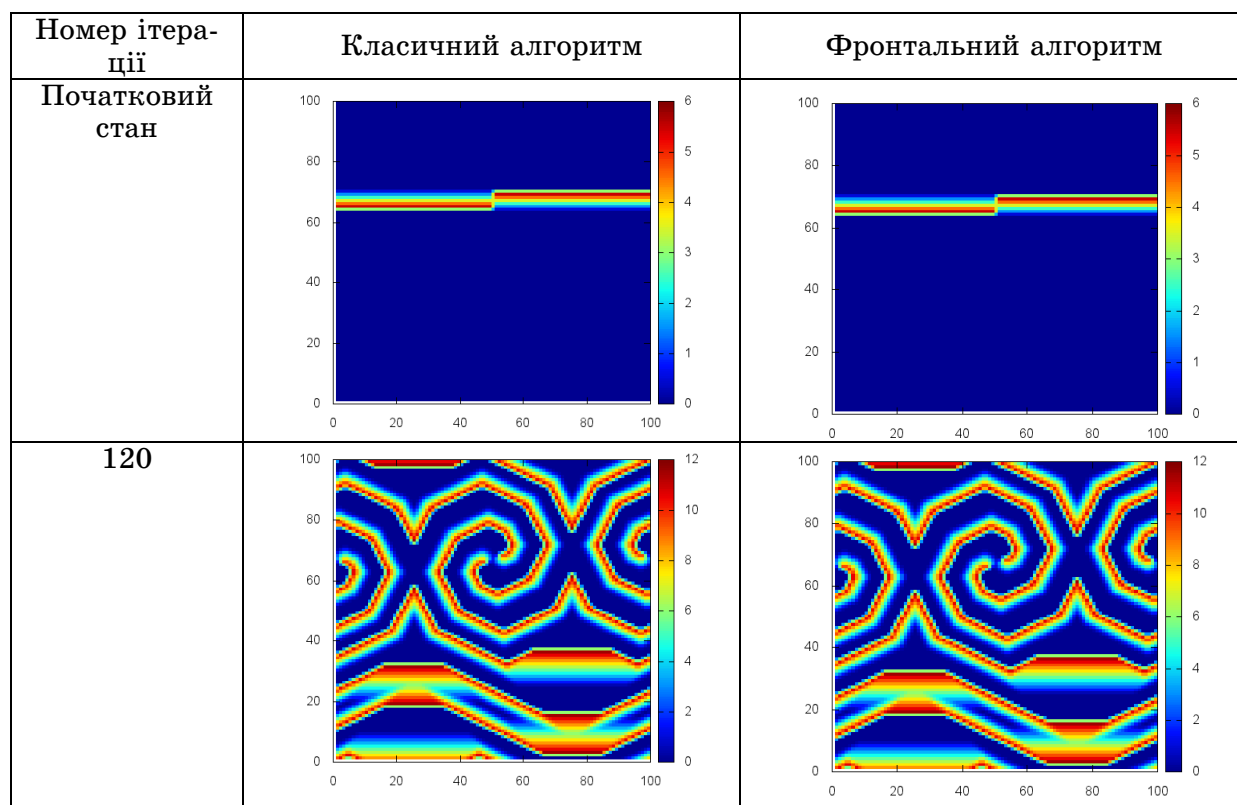
За рахунок того, що в алгоритмі фронтального автомата стан не всіх клітин перераховується за правилами, очікується різниця в швидкодії двох алгоритмів.

Данні наведені в таблицях 1, 3, 5 свідчать про те, що результати розв'язку польової задачі тотожні, як для класичної так і для

фронтальної реалізації клітинних автоматів, проте істотна різниця в швидкодії, що визначається кількістю клітин, що змінили свій стан в процесі обчислення. Данні наведені в таблицях 2, 4, 6 свідчать про те, що в процесі обчислення класична реалізація клітинних автоматів призначає нове значення абсолютно всім коміркам області обчислення на відмінно від фронтального клітинного автомата (КА).

Таблиця 1

Хвильовий процес. Обчислювальний експеримент 1



Таблиця 2

Кількість клітин, що змінила стан за правилами КА в процесі моделювання (рисунок 4). Обчислювальний експеримент 1

Номер ітерації	Кількість клітин, що змінили стан за правилами	
	Класичний КА	Фронтальний КА
1	10000	800
10	10000	1816
25	10000	3236
53	10000	6136
78	10000	8792
120	10000	10000
150	10000	10000

Аналіз результатів першого обчислювального експерименту показав, що кількість клітин, що перерахували стан за правилами КА за весь період моделювання (120 кроків) для класичного КА становить – 1500000, для фронтального КА – 1075728. Час виконання всіх ітерацій для класичного КА – 37 с, для фронтального КА – 49 с.

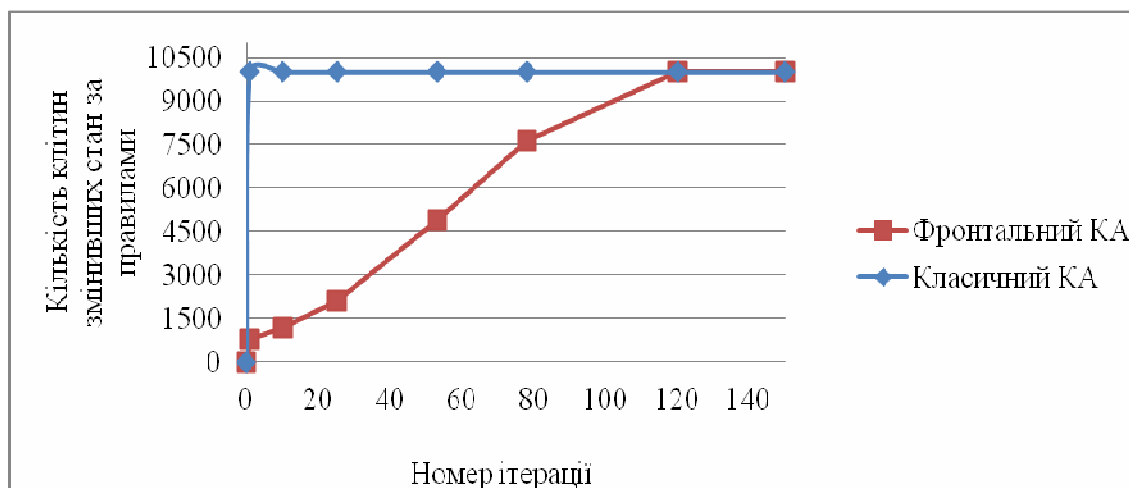


Рисунок 4 – Залежність кількості клітин, стан яких перерахований, від номеру ітерації. Обчислювальний експеримент 1

Таблиця 3

Хвильовий процес. Обчислювальний експеримент 2

Номер ітерації	Класичний алгоритм	Фронтальний алгоритм
Початковий стан		
120		

Таблиця 4

Кількість клітин, що змінила стан за правилами КА на різних в процесі моделювання (рисунок 5). Обчислювальний експеримент 2

Номер ітерації	Кількість клітин, що змінили стан за правилами	
	Класичний КА	Фронтальний КА
1	10000	576
10	10000	1158
25	10000	2118
53	10000	4872
78	10000	7642
120	10000	10000
150	10000	10000

Другий обчислювальний експеримент показав, що кількість клітин, які перерахували, тобто змінили, стан за правилами КА за весь період моделювання для класичного КА – 1500000, для фронтального КА – 974444. Час обчислення 120 ітерацій для класичного КА становив 44 с, для фронтального КА – 55 с.

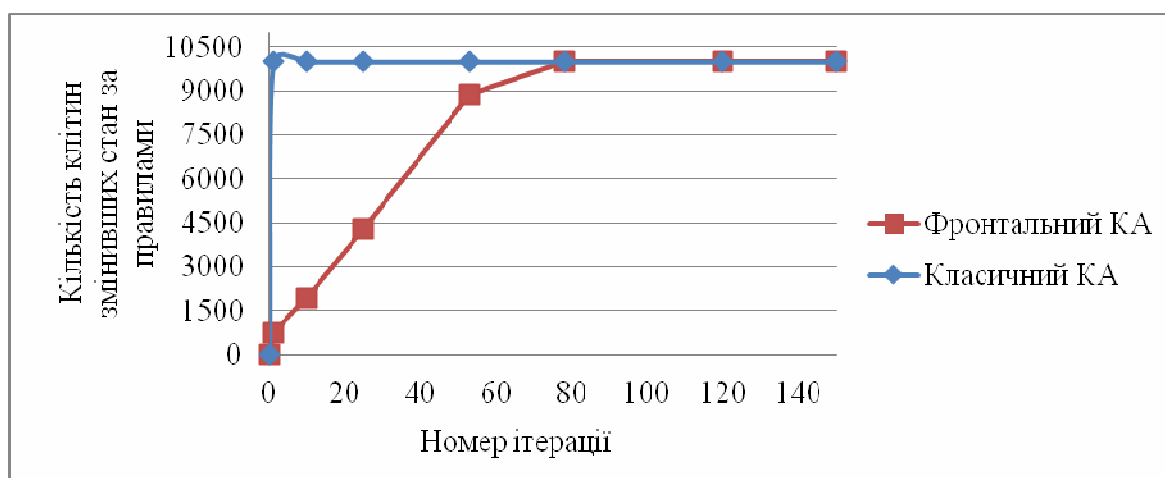
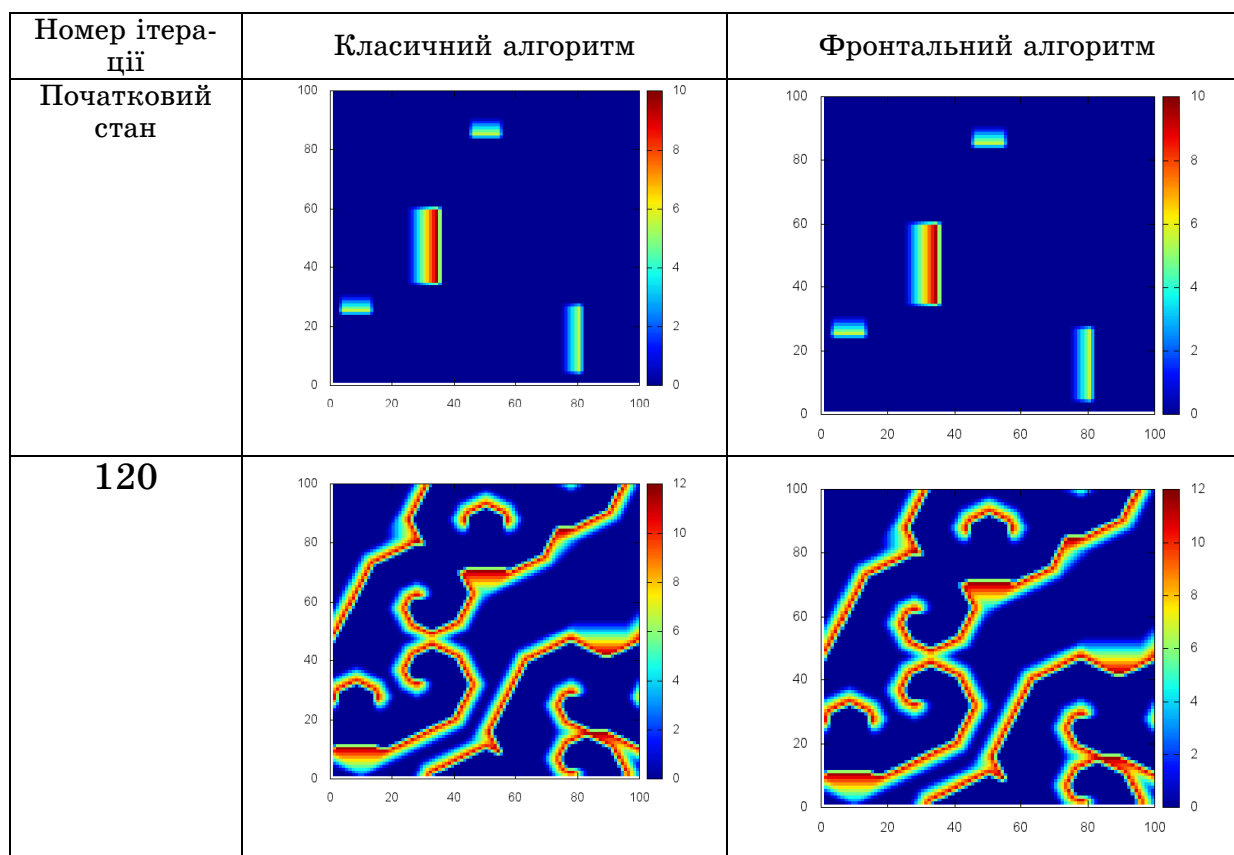


Рисунок 5 – Залежність кількості клітин, стан яких перерахований, від номеру ітерації. Обчислювальний експеримент 2

Третій обчислювальний експеримент, було проведено при більшій щільності збуреннями у області поширення хвиль (таблиця 5).

Таблиця 5

Хвильовий процес. Обчислювальний експеримент 3



Таблиця 6

Кількість клітин, що змінила стан за правилами КА на різних в процесі моделювання (рисунок 6). Обчислювальний експеримент 3

Номер ітерації	Кількість клітин, що змінили стан за правилами	
	Класичний КА	Фронтальний КА
1	10000	728
10	10000	1912
25	10000	4275
53	10000	8884
78	10000	10000
120	10000	10000
150	10000	10000

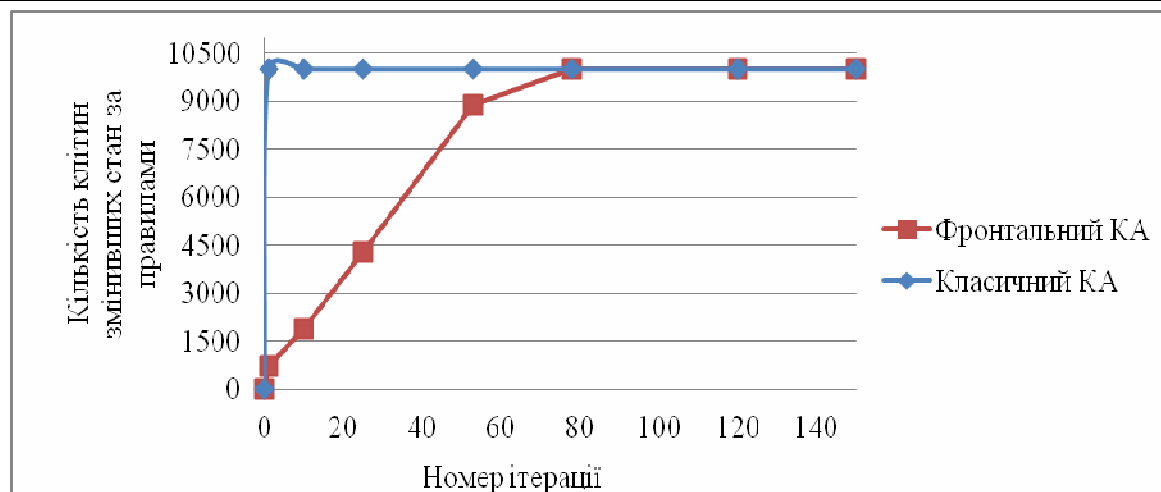


Рисунок 6 – Залежність кількості клітин, стан яких перерахований, від ітерації. Обчислювальний експеримент 3

Аналіз результатів третього обчислювального експерименту показав, що на протязі 120 ітерацій змінили свій стан 1500000 комірок (класичний КА), та 1206098 комірок (фронтальний КА). Час виконання всіх ітерацій для класичного КА становив 43 с, для фронтального КА – 60 с.

Узагальнивши вище наведені результати, можна зробити висновок про те, що загальний час виконання обчислень результати має класичний алгоритм. Але, якщо брати до уваги кількість розрахунків, то, чим менше активності в області моделювання, тим менше розрахунків проводиться фронтальним КА. В той час як для класичного цей показник буде завжди однаковим. Проте, при збільшенні кількості комірок в області моделювання ситуація докорінним чином змінюється – швидкість обчислень фронтальних КА стає меншою у порівнянні з класичним КА (таблиця 7, рисунок 7).

Таблиця 7

Залежність часу виконання алгоритму
від розміру обчислювального поля

Розмір поля	Час виконання алгоритму (проходження всіх ітерацій), с	
	Класичний КА	Фронтальний КА
100*100	37	49
200*200	186	180
300*300	349	344
400*400	655	578
500*500	975	839

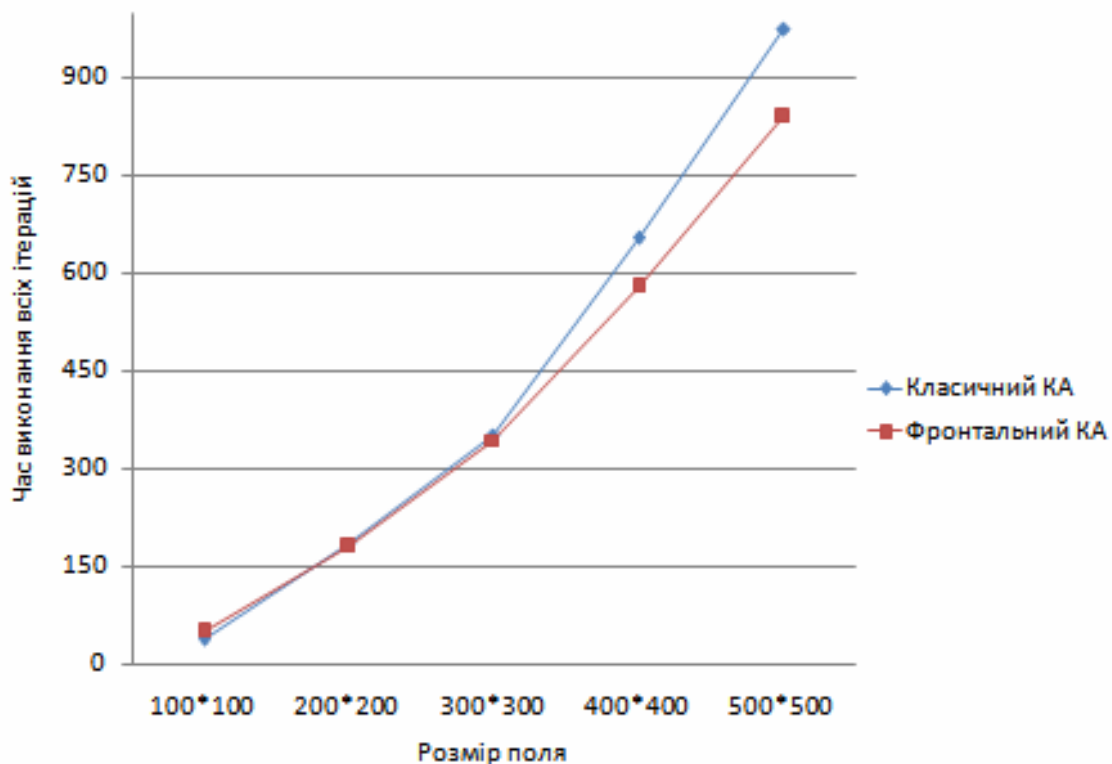


Рисунок 7 – Швидкодія алгоритмів від розмірів обчислювального поля

Висновки

В ході проведення дослідження швидкодії реалізації клітинно-автоматних обчислень було встановлено що:

1) кількість клітин що підлягають перерахунку залежить від активності в області моделювання (чим активність більша, тим більше клітин перераховується за правилами в ході роботи алгоритму),

2) швидкодія фронтального КА перебільшує швидкодію класичного КА лише на малому полі, із зростанням розмірів поля обчислень – фронтальний алгоритм показує кращі показники швидкодії, ніж класичний.

ЛІТЕРАТУРА

1. Тоффоли Т., Марголус Н. Машины клеточных автоматов. М.: Мир, 1991. – 280 с
2. Wolfram S. Cellular automaton Fluids.// J.Stat.Phys. 1986. – Vol. 45. – PP. 471-526.
3. Svyetlichnyy D. "Modelling of the microstructure: From classical cellular automata approach to the frontal one ", Computational Materials Science, t. 50, 2010. – P. 92-97.
4. Лоскутов А. Ю., Михайлов А. С. Введение в синергетику: Учеб. руководство. — М.: Наука, 1990. — 272 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Guda A.I., Mikhalyov A.I. Multi-model methods and parameters estimation approaches on non-linear dynamic system identification.....	3
Кирия Р.В., Бабенко Ю.В. Алгоритм управления системой подземного конвейерного транспорта угольных шахт.....	10
Кучеренко А.Е. Оптимизация топологии стержневых систем и их устойчивость	23
Омельчук А.А., Рудакова А.В. Моделирование пространственных параметров процесса спуска судна на воду с помощью слипа.....	31
Островська К.Ю., Михальов О.І., Прядко Н.С. Програма реалізація методів нейромережевого прогнозування в задачах металургійної динаміки	40
Рагимова К.Э. Промышленное испытание противопригарных свойств формовочных и стержневых смесей с техногенными отходами	49
Чумаков Л.Д. Оптимизация стратегии контроля исправности системы с дублированием на функционирование	56
Зворыкин В.Б., Кукушкин О.Н., Михалев А.И., Станчиц Г.Ю. Оптимизация переходных процессов в системах с запаздыванием в условиях неопределенности	61
Моїсєєнко С.В. Ймовірнісні задачі про вкладені шаблони в області гармонічності ...	64
Syrotkina O.I. The application of specialized data structures for SCADA Diagnostics.	72
Кожанов Т.В. Производство агломерата с использованием доменных и сталеплавильных шламов.....	82
Коряшкіна Л.С., Череватенко А.П. Задача параметричної ідентифікації багатозонних динамічних систем	88
Молчанова М.О. Исследование взаимозависимости между классами в условиях задачи распознавания плоских стационарных объектов с большим количеством бинарных признаков.....	102

Шварцман Л.Я., Троценко Э.А., Баженов Е.В., Баженов П.Е. Оценка способов измерения скорости осаждения кремния, как условия обеспечения адекватности модели для управления Siemens-реактором.....	109
Степаненко Д.А. Алгоритм оценки состава первичного шлакового расплава железорудных окатышей на основе анализа их минералогического состава	121
Гнатушенко В.В., Михальов О.І. Оптимізація топології бездротової сенсорної мережі.....	128
Малайчук В.П., Деревянко И.И. Вычислительные эксперименты в задачах оценки корреляционных свойств сложных нестационарных дискретных сигналов	134
Селівьорстова Т.В. Дослідження швидкодії реалізації клітинно-автоматних обчислень	144

РЕФЕРАТЫ

УДК 681.876.2

Гуда А.И., Михалёв А.И. **Мультимодельные методы и способы оценки параметров при идентификации нелинейных динамических систем** / Гуда А.И., Михалёв А.И. // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 4 (99). - Днепропетровск, 2015. - с.3 - 9.

В статье исследовано 3 метода идентификации нелинейных динамических систем с использованием нескольких моделей. Изучены преимущества и недостатки предложенных методов. Проведено моделирование процессов идентификации тестовой системы с использованием рассмотренных методов.

Библ: 3. илл: 6.

УДК 622.647.2

Кирія Р.В. **Алгоритм управління системою підземного конвеєрного транспорту вугільних шахт** / Р.В. Кирія, Ю.В. Бабенко // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 4 (99). - Днепропетровск, 2015. - с.9 - 22.

Система управління конвеєрним транспортом представлена як дворівнева ієрархічна система, на першому рівні якої оператор задає певні параметри для нижнього рівня управління. Глобальним критерієм ефективності цієї системи є комплексна величина, що характеризує енергоефективність транспортування гірської маси, а локальними критеріями є мінімальні значення середніх об'ємів вантажу в акумулюючих бункерах системи підземного конвеєрного транспорту. Розроблено алгоритм адаптивного управління акумулюючими бункерами і системою підземного конвеєрного транспорту.

Бібл. 7, іл. 3.

УДК 624.04+519.6

Кучеренко О.Є. **Оптимізація топології стержневих систем та їх стійкість** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 4 (99). - Днепропетровск, 2015. - с.23 - 30.

Аналізується проблема загальної стійкості стержневих систем з використанням метода кінцевих елементів в контексті вирішення модифікованої задачі напіввизначеної оптимізації топології стержневих конструкцій. Верифікація отриманого рішення здійснювалася у програмному комплексі ANSYS.

Бібл. 9, іл. 4, табл. 2.

УДК 519.7:626.54

Омельчук А.А., Рудакова А.В. **Моделирование пространственных параметров процесса спуска судна на воду с помощью слипа** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 4 (99). - Днепропетровск, 2015. - с.31 - 39.

В статье рассматривается анализ процессов спуска и подъема судов, осуществляемых с помощью сложной многоприводной системы типа слип. Аналитические зависимости для пространственного изменения параметров процесса спуска/подъема судна предлагаются получать на основе использования функций принадлежности.

Библ. 5.

УДК 681.3.068

Островская К.Ю., Михалев А.И., Прядко Н.С. **Программная реализация методов нейросетевом прогнозирование в задачах металлургической динамики** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 4 (99). - Днепропетровск, 2015. - с.40 - 48.

В работе определен специальный метод построения и оценки модели прогнозирования. Нейронные сети является очень мощным инструментом для работы в прогнозировании, но для освоения этой технологии нужно потратить времени не меньше, чем на освоение технического анализа.

Библ. 3.

УДК 621.742.4(075) + 621.743.4(075)

Рагімова К.Е. **Промислове випробування протипригарних властивостей формувальних і стрижневих сумішей із техногенними відходами** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 4 (99). - Днепропетровск, 2015. - с.49 - 55.

У статті аналізуються результати промислових випробувань протипригарних властивостей формувальних і стрижневих сумішей із техногенними відходами. Представлено властивості протестованих сумішей і проведено аналіз якості технологічних зразків. Експериментальним шляхом доведено, що стрижневі суміші з тестованим шламом перешкоджають проникненню рідкого металу в простір між зернами кварцового піску й утворенню пригару. Водночас при використанні серійної суміші є можливість для проникнення рідкого металу в пори форми й утворення пригару. Формувальні й стрижневі суміші з техногенними відходами рекомендуються для використання при виробництві сталевих виливків не тільки як економічно вигідніші, а й як екологічно доцільніші.

Бібл. 3, іл. 7.

УДК 621.391.175

Чумаков Л.Д. **Оптимизация стратегии контроля исправности системы с дублированием на функционирование** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 4 (99). - Днепропетровск, 2015. - с.56 - 60.

Обсуждаются вопросы нахождения оптимальных длительностей межпроверочных интервалов при проверке исправного состояния технической системы с дублированием на функционирование.

Библ. 5.

УДК 621-83 681.51

Зворыкин В.Б., Кукушкин О.Н., Михалев А.И., Станчиц Г.Ю. **Оптимизация переходных процессов в системах с запаздыванием в условиях неопределенности** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 4 (99). - Днепропетровск, 2015. - с.61 - 63.

В работе решена задача оптимизации в системе с запаздыванием в условиях неопределенности на примере системы заполнения смесителя сыпучим материалом. Построена

модель системы в результате исследования которой определены оптимальны параметры регулятора.

Библ. 1.

УДК 515.2:517.2

Моисеенко С.В. **Вероятностные задачи о вложенных шаблонах в области гармоничности** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 4 (99). - Днепропетровск, 2015. - с.64 - 71.

В статье описаны новые вероятностные задачи о квадратах, случайно вложенных в основной (стандартный) квадрат. Установленные особые свойства переходных вероятностей распространены на случайные блуждания с несколькими стартами в симплексе.

Библ.5, ил.4.

УДК 681.5.09

Сироткина Е.И. **Применение специализированных структур организации данных для диагностики SCADA** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 4 (99). - Днепропетровск, 2015. - с.72 - 81.

Приведена общая характеристика и рассматриваются методы работы со специализированной шаблонной структурой организации данных: m-арными кортежами на основе упорядоченных множеств произвольной мощности. Данная структура была применена при исследовании диагностической модели для формирования области поиска диагноза на классификационном пространстве базы знаний экспертной системы. Подробно рассмотрен метод определения функциональной зависимости между индексом элемента упорядоченного множества, являющегося подмножеством булеана базового множества и m-арными кортежем индексов базового множества. Представлен пример одного из окон интерфейса программного средства для работы с m-арными кортежами. Рассмотрены преимущества работы с данной специализированной структурой для повышения эффективности интеллектуальных операций применительно к диагностике SCADA.

Библ. 9, рис.1, табл. 5.

УДК 669.162.2

Кожанов Т.В. **Виробництво агломерату з використанням доменних та сталеплавильних шламів** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 4 (99). - Днепропетровск, 2015. - с.82 - 87.

За результатами проведених експериментів і розрахунків, запропоновано оптимальне співвідношення основних компонентів агломераційної шихти і максимально допустимий вміст шламів для досягнення максимальної продуктивності аглоустановки і якості агломерату.

Библ. 3.

УДК 519.8

Коряшкина Л.С., Череватенко А.П. **Задача параметрической идентификации многозонных динамических систем** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 4 (99). - Днепропетровск, 2015. - с.88 - 101.

В работе рассмотрен метод идентификации моделей динамики, разработанный на основе сочетания методов решения задач оптимального управления и непрерывных задач оптимального разбиения множеств. Приведен алгоритм решения задач идентификации границ между зонами функционирования многозонных динамических систем и их параметров.

Библ. 4, илл. 2.

УДК 004.8

Молчанова М.О. **Дослідження взаємозалежності між класами в умовах задачі розпізнавання плоских стаціонарних об'єктів із великою кількістю бінарних ознак** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 4 (99). - Днепропетровск, 2015. – с.102 - 108.

Досліджується взаємозалежність у розпізнаванні плоских стаціонарних об'єктів з великою кількістю бінарних ознак на підставі розпізнавання букв латинського алфавіту. В рамках дослідження було показано, що деякі класи мають ряд схожих ознак, через які вони мають низький відсоток розпізнавання нейронною мережею. До таких класів відносяться букви "E", "G", "O", "Q", "S". Букви "E", "G", "S" більш ніж в 65% випадків сплутувалися з класом "B". А букви "O" і "Q" в 67% сплутувалися з класом "D". Також показано, що найкраще мережею запам'ятовується перший вхідний образ. У разі заміни позиції букв "D" і "O", сплутування відбувалося вже не з класом "D", а з класом "O". Дане дослідження показало низьку ефективність застосування нейронної мережі типу когнітрон для ідентифікації класів з поворотами і масштабуванням, з цієї причини даний вид нейронної мережі не справляється повною мірою з завданням розпізнавання плоских стаціонарних об'єктів з великою кількістю бінарних ознак.

Бібл. 5.

УДК 621.315.592.2 : 66.012.1

Шварцман Л.Я., Троценко Е.А., Баженов Є.В., Баженов П.Є. **Оцінка способів вимірювання швидкості садження кремнію як умови забезпечення адекватності моделі для управління Siemens-реактором** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 4 (99). - Днепропетровск, 2015. – с.109 - 120.

Виконаний аналіз параметрів управління процесом водородного відновлення трихлорсілана в «Siemens-Реакторі». Запропонований новий спосіб визначення управляемого параметра, що усуває збільшення абсолютної похибки вимірювання поміри ведення процесу.

Бібл. 6.

УДК 669.162.262.4:681.3

Степаненко Д.О. **Алгоритм оцінки складу первинного шлакового розплаву залізорудних окатишів на основі аналізу їх мінералогічного складу** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 4 (99). - Днепропетровск, 2015. – с.121 - 127.

У роботі проаналізовано мінералогічний склад залізородних окатишів і викладений підхід до вирішення задачі прогнозування складу первинного шлакового розплаву в процесі їх агрегатного та фазового перетворення в умовах доменної плавки. Для оперативного контролю складу первинних шлакових розплавів в умовах функціонуючих АСУТП доменних печей запропоновані моделі з урахуванням мінералогічного складу окатишів.

Бібл. 6, іл. 2, табл. 2.

УДК. 004.7: 004.9

Гнатушенко В.В. **Оптимизация топологии беспроводной сенсорной сети** / В.В. Гнатушенко, А.И. Михалев // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 4 (99). - Днепропетровск, 2015. – с.128 - 133.

Математически формализована задача оптимального выбора лучшей топологии беспроводной сенсорной сети и определения местоположения кластерных центров.

Бібл.7.

УДК 519.24.681

Малайчук В.П., Деревянко І.І. **Обчислювальні експерименти в задачах оцінки кореляційних властивостей складних нестационарных дискретных сигналов** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 4 (99). - Днепропетровск, 2015. – с.134 - 143.

Не тільки дефектоскопія досліджуваного об'єкта, а й оцінка його якості є важливою складовою неруйнівного контролю. Кореляційні властивості сигналу є характеристикою, яка описує якісний стан досліджуваного об'єкта. Для отримання справжньої інформації про якість об'єкта необхідно точно оцінювати функцію кореляції, але використання методу визначення кореляційних коефіцієнтів моделі призводить до помилок різної величини.

У роботі наведені результати оцінки точності визначення кореляційної функції, досліджено залежності помилок визначення кореляційних коефіцієнтів моделі α_1 і α_2 від довжини вибірки і часу кореляції моделі.

Бібл. 2, іл. 7, табл. 2

УДК 004.942

Селиверстова Т.В. **Исследование быстродействия реализаций клеточно-автоматных вычислений** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 4 (99). - Днепропетровск, 2015. – с.144 - 153.

Рассматривается зависимость быстродействия «классической» и «фронтальной» реализации клеточных автоматов от активности клеточных автоматов в области моделирования, и ее размеров.

Рис. 7, табл. 7, лит.4

UDC 681.876.2

Guda A.I., Mikhalyov A.I. **Multi-model methods and parameters estimation approaches on non-linear dynamic system identification** / Guda A.I., Mikhalyov A.I. // System technologies. N 4(99) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.3 - 9.

In this article 3 non-linear system identification methods are investigated. Advantages and drawbacks are studied. Test system identification process simulation with proposed methods are conducted.

Bibl: 3. ill: 6.

UDK 622.647.2

Kiriya R. **Algorithm of control of coal mines underground conveyer transport system** / R. Kiriya, Yu. Babenko // System technologies. N 4(99) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.10 - 22.

The control system of conveyer transport is represented as a two level hieratic system on first level of which an operator sets certain parameters for the lower level of control. A global criterion of efficiency of this system is complex value, which characterizes energy efficiency of transporting coal, and the minimum values of middle volumes of cargo in accumulative hoppers of the underground conveyer transport system are local criteria. We developed the algorithm of adaptive control of accumulative hoppers and underground conveyer transport system.

Refs.7, ill. 3.

UDC 624.04+519.6

Kucherenko A.E. **Truss topology optimization and stability analysis** // System technologies. N 4(99) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.23 - 30.

The paper considers the problem of truss-like structures stability with the finite element method in the context of solving of semidefinite program of topology optimization. A verification of solution has been performed in ANSYS.

Bibl. 9, il. 4, tab. 2.

UDC 519.7: 626.54

Omelchuk A.A., Rudakova A.V. **Modeling the spatial parameters of the processes descent boat in the water with the help of a slip** // System technologies. N 4(99) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.31 - 39.

The article deals with analysis of the processes of descent and ascent for vessels carrying-ted from using complex multidrive systems such as slip. Analytical dependences for the spatial variation of the process parameters ascent / descent vessel-offering is derived using membership functions.

Bible. 5.

UDC 681.3.068

Ostrovskaya K.Y., Mikhalev A.I., Praydtko N.S. **Software implementation of the neural network forecasting methods in problems of metallurgical dynamics** // System technologies. N 4(99) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.40 - 48.

In this paper we define a special method for constructing and evaluating predictive models. Neural networks are a very powerful tool for forecasting, but for the development of this technology, you need to spend time not less than learning technical analysis.

Bible. 3.

UDC 621.742.4(075) + 621.743.4(075)

Ragimova K.E. **Industrial tests nonstick properties of molding and core mixtures with technogenic waste** // System technologies. N 4(99) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.49 - 55.

The article deals with the analysis of the results of industrial tests of the antiadhesiveness properties of molding and core sand mixtures with technogenic wastes, for example, oil-containing bottom deposits and wastes from the sludge accumulator ponds of oil-refinery plants. The aim of testing is determination of their usage appropriateness in comparison with the workshop mixture. The properties of the tested mixtures were represented and the analysis of quality of technological samples was conducted. The possibility and effectiveness of mixture usage with technogenic wastes at manufacturing the steel moldings of small and average weight was established. It was found out experimentally that the rod mixtures with tested sludge prevent penetration of the molten metal in the space between quartz sand granules and formation of burnt-on. At the same time at usage of the serial mixture there are conditions for penetration of the molten metal into the form pores and formation of burnt-on. Form and rod mixtures with technogenic wastes are recommended for usage at production of the steel moldings as economically and ecologically effective.

Ref. 3, fig. 7.

UDC 621.391.175

Chumakov L.D. **Optimizing control strategy serviceability sistmy with duplicate-vaniem the functioning** // System technologies. N 4(99) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.56 - 60.

Questions of a condition of scientific and technical potential of the country and Pridneprovsky region, its attraction to the solve of regional problems, workings out of the automated information system on scientific and technical potential are discussed.

Bibl. 5.

UDC 621-83 681.51

Zworykin V.B., Kukushkin O.N., Mihaliov A.I., Stanchits G.Y. **Optimization of transition processes in-delay systems under uncertainty** // System technologies. N 4(99) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.61 - 63.

In this paper we solve the problem of optimization in systems with delay in a neop-definiteness on the example of the mixer filling of bulk materials. A model of the system as a result of studies which determine the optimum controller parameters.

UDC 515.2:517.2

Moiseenko S.V. **Probability task's about nested patterns in the harmonious field** // System technologies. N 4(99) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.64 - 71.

In article described new probability task about squares, with accidentally embedded in the basic (standard) square. Set specific properties of probabilities distributed at random walk with a few starts in the simplex.

Bibl. 5.

UDC 681.5.09

Syrotkina O.I. **The Application of Specialized Data Structures for SCADA Diagnostics** // System technologies. N 4(99) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.72 - 81.

The general characteristics and working methods relating to the specialized data structure template, such as m-tuples based on the ordered set of arbitrary power are

considered in the paper. This structure has been applied during the diagnostic model research for the diagnosis search area on the classification space of the expert system knowledge base. The method for determining the functional dependency between element index of ordered set that is subset of base set power and m-tuple of base set indexes is examined in detail. The example of the software screenshot designed to the work with m-tuples is given. The advantages of working with this specialized structure to increase the efficiency of intellectual operations for SCADA diagnostics are shown.

Ref. 9, fig. 1, Tab. 5.

UDC 669.162.2

Kozhanov T.V. **Sinter production using blast furnace sludge and steelmaking sludge** // System technologies. N 4(99) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.82 - 87.

The results of the experiments and calculations, it is proposed the optimal ratio of the main components of the sinter mix and the maximum quantity of sludge to achieve maximum productivity of sinter machine and sinter quality.

Ref. 3.

UDC 519.8

Koriashkina L.S., Cherevatenko A.P. **The problem of multi-zone dynamics systems parametric identification** // System technologies. N 4(99) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.88 - 101.

The paper presents a method for dynamics models identification based on synthesis of methods for optimal control problems solving and continuous problems of optimal sets partitioning. An algorithm for restoring of the boundaries between functioning zones of dynamical system and their parameters is given.

Ref. 4, fig. 2.

UDC 004.8

Molchanova M.O. **Research into interrelationship between classes in terms of the problem of recognition of planar stationary objects with a large number of binary features** // System technologies. N 4(99) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.102 - 108.

We investigate interrelationship in recognizing two-dimensional stationary objects with a large number of binary features of recognition on the basis of the Latin alphabet. The study has shown that certain classes have some similar characteristics, because they have a low percentage of neural network recognition. These classes include the letters "E", "G", "O", "Q", "S". Letters "E", "G", "S" in more than 65% of cases have been confused with the class "B". And the letters "O" and "Q" in 67% have been confused with class "D". It is also shown that network remembers the first incoming image at the best. When replacing positions of letters "D" and "O", confusion was not with the class "D", but with the class "O". This study showed a low efficiency of application of cognitron neural network for identifying classes with rotation and scaling, and for this reason, this neural network type cannot cope completely with the task of recognition of planar stationary objects with a large number of binary features.

Ref. 5, fig. 5.

UDC 621.315.592.2:66.012.1

Shvartsman L.Y., Trotsenko E.A., Bazhenov E.V., Bazhenov P.E. **Evaluation of silicon deposition rate measurement method SASA condition for providing the adequacy of**

model for Siemens-reactorcontrol // System technologies. N 4(99) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.109 - 120.

The analysis of control parameters for process of reduction of trichlorosilane by hydrogen in the «Siemens-reactor» is carried out. A new method of definition of the controlled parameter that eliminates increasing the absolute measurement error while process management is proposed.

Ref. 5.

UDC 669.162.262.4:681.3

Stepanenko D. **Estimation algorithm of primary slag melt iron ore pellets on the basis of their mineralogical composition** // System technologies. N 4(99) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.121 - 127.

In this paper we analyzed the mineralogical composition of iron ore pellets and the approach to solving the problem of forecasting of primary slag melt in the process of aggregation and phase transformation in a blast furnace. For operational control of the primary slag melts in the conditions of functioning of automatic control system of blast furnaces proposed model based on the mineralogical composition of the pellets.

Lit. 7, fig. 2, table 2.

UDK 004.7: 004.9

Hnatushenko V. **Topology optimization of wireless sensor network** / V.V. Hnatushenko, O.I. Mihalyov // System technologies. N 4(99) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.128 - 133.

Mathematically formalized the problem of optimal choice of the best topology wireless sensor network and location of cluster centers.

Bibl. 7.

UDC 519.24.681

Malaychuk V.P., Derevianko I.I. **Computational experiments for assessing of correlation properties of complex time-dependent discrete signals** // System technologies. N 4(99) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.134 - 143.

Not only a flaw, but also a quality assessment of technical items is an important component in non-destructive testing. A correlation property of a signal is a characteristic that describes a qualitative state of an item. To obtain authentic information about the quality of such an item it is necessary that accurately assessment of a correlation function should take place. However, use of the known estimator for assessing the correlation coefficients of a model leads to errors of different amount.

The experimental results of the accuracy estimation of the correlation functions were given in this paper. The investigation was carried out depending on the measurement errors of the model correlation coefficients, the length of the sample and the correlation time.

Bibl. 2, ill. 7, tabl. 2

UDC 004.942

Seliverstova T. **Study of performance implementation of cellular automata computations** // System technologies. N 4(99) - Dnipropetrovsk, 2015.- P.144 - 153.

Dependence of speed of "classical" and "front" implementation of cellular automata on activity of cellular automata modeling, and its size is considered.

Fig. 7 Table. 7 lit. 4

АВТОРЫ ВЫПУСКА

Гуда Антон Ігорович – к.т.н, доц. каф ІТС НМетАУ.

Кирия Руслан Виссарионович - к.т.н., ст. научн. сотрудник, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины.

Михалев Александр Ильич - д.т.н, профессор, заведующий кафедры информационных технологий и систем, Национальная металлургическая академия Украины.

Бабенко Юлия Васильевна - ассистент кафедры информационных технологий и систем, Национальная металлургическая академия Украины.

Кучеренко Александр Евгеньевич - Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, г. Днепропетровск, Украина.

Омельчук А.А. - Херсонский национальный технический университет.

Рудакова А.В. - Херсонский национальный технический университет.

Островская Екатерина Юрьевна – к.т.н., доцент кафедры Информационных технологий и систем, НМетАУ.

Прядко Наталья Сергеевна - старший научный сотрудник Института технической механики НАНУ и НКА Украины, к.т.н.

Рагимова Конуль Элбрус кызы - аспирант кафедры литейного и сварочного производства, Азербайджанский технический университет.

Зворыкин Владимир Борисович – к.т.н., доцент, Национальная металлургическая академия Украины.

Кукушкин Олег Николаевич – д.т.н., проф., Национальная металлургическая академия Украины.

Станчиц Георгий Юрьевич – старший преподаватель, Национальная металлургическая академия Украины.

Моїсєєнко Світлана Вікторівна - к.т.н., доцент кафедри вищої математики та математичного моделювання Херсонського національного технічного університету.

Сироткина Елена Игоревна - ассистент кафедры программного обеспечения компьютерных систем, Государственный ВУЗ «Национальный горный университет».

Кожанов Тимур Валерьевич - аспирант кафедры металлургии чугуна, металлургический факультет, НМетАУ.

Коряшкіна Лариса Сергіївна - к. ф. – м. н., завідувач кафедри обчислювальної математики та математичної кібернетики Дніпропетровського національного університету імені Олеся Гончара.

Череватенко Антоніна Павлівна - аспірант кафедри обчислювальної математики та математичної кібернетики Дніпропетровського національного університету імені Олеся Гончара.

Молчанова Марина Алексеевна - аспирант кафедры прикладной математики и социальной информатики Хмельницкого национального университета.

Троценко Эдуард Анатольевич - генеральный директор INFOCOM LTD (Ukrainan Siemens Partner).

Шварцман Леонид Яков - научный руководитель компании SILIDO, к.т.н.

Баженов Евгений Васильевич - к.т.н., технический директор ООО «Солнечные Стандартные Решения».

Степаненко Дмитрий Александрович - к.т.н., научный сотрудник ИЧМ НАНУ.

Гнатушенко Вікторія Володимирівна — к.т.н., доцент, докторант кафедри інформаційних технологій і систем Національної металургійної академії України.

Малайчук Валентин Павлович - заведующий кафедрой РЭА, физико-технический факультет, Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара.

Деревянко Игорь Игоревич - аспирант кафедры РЭА, физико-технический факультет, Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара.

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