

V.P. Ivaschenko, G.G. Shvachych, M.A. Tkach

**SPECIFICS OF CONSTRUCTING OF MAXIMALLY
PARALLEL ALGORITHMIC FORMS OF THE SOLVING OF
THE APPLIED TASKS**

The features of construction of maximally parallel algorithms of thermal conductivity equation's solution with the method of direct tasks of Dirichlet and Neumann are considered. Parallelization of the three-diagonal systems of equations allows to construct absolutely steady algorithms, having a maximal parallel form. It is achieved minimum time period of solving the applied tasks on parallel computing devices.

Keywords: parallel algorithms, net functions, method of lines, conception of discretization.

**PROBLEM STATEMENT AND ANALYSIS OF THE LAST
ARCHIEMENTS IN THIS AREA**

The parallel computation systems develop quickly. When computer clusters came into service, parallel computations became available for many people. Mass processors, standard net technologies and free software are used as a rule to construct clusters. Let's note that the computer cluster is the set of processors united in the framework of a certain network to solve one problem. A small computer cluster with 6 processors may be used efficiently by small departments. In this connection, the problem of efficient software development becomes one of the central problems of parallel computations in the whole now. Creation of parallel computation systems demanded the mathematical conceptions development of parallel algorithm construction, that is, the algorithms adapted to realization on similar computation systems [1 – 7]. On the other hand the development of mathematical modeling leads to the more complex descriptions of the models. To understand them and to develop the analysis principles one has to involve the newest achievements from quite different mathematical fields. Problem discretization results in systems of linear equations with a great number of unknowns. Former methods of their solution are not always suitable from the point of view of accuracy, rate, required memory, algorithm structure and the like. The new ideas

in the field of computational mathematics arise and are realized. In the final analysis, the new methods of numerical experiments realization are created for more perfect mathematical models [8 – 13]. In this work the efficacy of system of linear algebraic equations (SLAE) parallelization of three-diagonal structure using the numerical-and-analytical method of lines is shown in terms of the simplest heat conductivity problem solution.

MATHEMATICAL PROBLEM STATEMENT

Let’s examine the Dirichlet boundary value problem solution for a one-dimensional heat conduction equation

$$\frac{\ddot{a}Y}{\ddot{a}t} = a \frac{\ddot{a}^2 Y}{\ddot{a}\delta^2}, \quad t \in [t_0, T], x \in [x_0, x_L] \tag{1}$$

with the initial condition

$$Y|_{t=t_0} = \phi(\delta) \tag{2}$$

and the boundary condition

$$Y|_{\delta=\delta_0} = YW(t), Y|_{x=x_L} = YL(t), \tag{3}$$

Let’s juxtapose a net domain to a definitional domain of sought function Y(t, x) in (1) – (3) problem

$$\left. \begin{aligned} t_j &= j \times Dt1, j = \overline{1, M}, Dt1 = T / M, M \in Z \\ x_p &= p \times Dx1, p = \overline{0, 2m}, Dx1 = (x_L - x_0) / 2m, m \in Z \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

Let’s introduce new independent variables to normalized units

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_t &= \frac{t - t_{j-1}}{t_j - t_{j-1}} \in [0, 1] \\ \varepsilon_x &= \frac{x - x_p}{x_{p+1} - x_p} \in [-1, 1] \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

here we’ll get:

$$\frac{\partial Y_{p+\varepsilon_x, 1}}{\partial \varepsilon_t} = A \frac{\partial^2 Y_{p+\varepsilon_y, 1}}{\partial \varepsilon_x^2}, \quad A = Dt1 \frac{a}{Dx1^2} \tag{6}$$

where $Y_{p+\varepsilon_x, 1}(\varepsilon_t, \varepsilon_x)$ is sought piecewise-analytic function on spatial variable.

MAIN PART OF RESEARCH

Discretization scheme by method of lines. The conception of (1) – (3) problem discretization by method of lines lies in the following. After the equation (6) finite-difference approximation on a temporary variable

we'll get the second-order system of ordinary differential equations (SODE).

$$Y''_{p+\varepsilon_x,1}(\varepsilon_x) - \frac{1}{A} Y_{p+\varepsilon_x,1}(\varepsilon_x) = -\frac{1}{A} YO_{p+\varepsilon_x,1}(\varepsilon_x), \quad (7)$$

where $YO_{p+\varepsilon_x,1}(\varepsilon_x)$ is known initial function.

General solution of equation (7) defines in the final form:

$$Y_{p+\varepsilon_x,1}(\varepsilon_x) = Y_{p+\varepsilon_x,1}^*(\varepsilon_x) + C_p C \eta \beta(\varepsilon_x) + D_p S \eta \beta(\varepsilon_x), \quad (8)$$

where C_p, D_p are the constants of integration;

$Y_{p+\varepsilon_x,1}(\varepsilon_x)$ – specific solution of heterogeneous equation (7);

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{A}} \quad \text{eigen-values of characteristic equation}$$

$$\beta^2 - \frac{1}{A} = \Delta. \quad (9)$$

With differentiating solution (8) on ε_x , we get

$$Y_{p+\varepsilon_x,2}(\varepsilon_x) = Y_{p+\varepsilon_x,2}^*(\varepsilon_x) + \beta [C_p C \eta \beta(\varepsilon_x) + D_p S \eta \beta(\varepsilon_x)], \quad (10)$$

where $Y_{p+\varepsilon_x,2}(\varepsilon_x) = Dx \left. \frac{\partial Y_{p+\varepsilon_x,1}}{\partial x} \right|_{t=t_j}$ is an unknown gradient function.

Determine constants of integration in ratios (8), (10) from the conditions when

$$\varepsilon_x = \pm 1:$$

$$Y_{p+\varepsilon_x,1(2)}(\varepsilon_x)|_{\varepsilon_x=\pm 1} = Y_{p\pm 1,1(2)}. \quad (11)$$

get

$$Y_{\zeta+\varepsilon_x,1}(\varepsilon_x) = \left\{ \begin{aligned} & Y_{\zeta+\varepsilon_x,1}^*(\varepsilon_x) + \frac{S \eta \beta(1+\varepsilon_x)}{S \eta \beta(2)} [Y_{p+1,1} - Y_{p+1,1}^*] + \\ & + \frac{S \eta \beta(1-\varepsilon_x)}{S \eta \beta(2)} [Y_{p-1,1} - Y_{p-1,1}^*] \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$$Y_{3+\varepsilon_x,2}(\varepsilon_x) = \left\{ \begin{aligned} & Y_{3+\varepsilon_x,2}^*(\varepsilon_x) + \frac{S \eta \beta(1+\varepsilon_x)}{S \eta \beta(2)} [Y_{p+1,2} - Y_{p+1,2}^*] + \\ & + \frac{S \eta \beta(1-\varepsilon_x)}{S \eta \beta(2)} [Y_{p-1,2} - Y_{p-1,2}^*] \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Having put $\varepsilon_x = 0$, let's transform solution (12), (13) to their discrete analogues in the form of SLAE:

$$C_p \begin{Bmatrix} Y_{p+1,1} \\ Y_{p+1,2} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} Y_{p,1} \\ Y_{p,2} \end{Bmatrix} + D_p \begin{Bmatrix} Y_{p-1,1} \\ Y_{p-1,2} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_{p,1} \\ f_{p,2} \end{Bmatrix} \quad (14)$$

where

$$\left. \begin{aligned} C_p &= \frac{S\eta\beta(1)}{S\eta\beta(2)}, & D_p &= \frac{Su\beta(1)}{Su\beta(2)} \\ \begin{Bmatrix} f_{p,1} \\ f_{p,2} \end{Bmatrix} &= C_p \begin{Bmatrix} Y_{p+1,1}^* \\ Y_{p+1,2}^* \end{Bmatrix} - Y_{p,1(2)}^* + D_p \begin{Bmatrix} Y_{p,1}^* \\ Y_{p,2}^* \end{Bmatrix}, & p &= \overline{1, 2m-1}. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

SLAEs (14) are invariant relative to net functions $Y_{p,1}$ and $Y_{p,2}$ and have three-diagonal structure where boundary elements $Y_{0,1}$, $Y_{2m,1}$ for the problem (1)–(3) are identical to the values of boundary functions (3):

$$Y_{0,1} = YW(t_j), \quad Y_{2m,1} = WL(t_j) \quad (16)$$

Identically, $Y_{0,2}$, $Y_{2m,2}$ elements on the domain boundary in SLAE (14) take the following values:

$$\left. \begin{aligned} Y_{0,2} &= Dx1 \times \left. \frac{\partial Y}{\partial x} \right|_{\substack{x=x_0 \\ t=t_{0j}}} \\ Y_{2m,2} &= Dx1 \times \left. \frac{\partial Y}{\partial x} \right|_{\substack{x=x_L \\ t=t_j}} \end{aligned} \right\}, \quad (17)$$

which in Neumann's problems correspond to second-order boundary data.

Thus, the mathematical model invariance in the form of SLAE (14) relative to $Y_{p,1}$, $Y_{p,2}$ net functions apparently reflects deeper group-theoretical features of input equation (1) relative to Coshi's data as well. In light of noted, the differential manifold and Dirichlet's and Neumann's problems group classification being carried out on Coshi's data in SLAE permits to continue the analysis on the pattern of only one group of decision variables $Y_{p,1}$ examination.

SWEEP METHOD ANALYSIS

Let's describe a simple and ordinary solving method of SLAE (14) named the sweep method. Let's postulate the existence of such two vectors E and G that for whatever

$Y_{p,1}$ ($p = \overline{1, 2m-1}$) the following equality is executed:

$$Y_{p,1} = E_p Y_{p+1,1} + G_p \quad (18)$$

Having reduced into (18) index p by a unit, we get

$$Y_{p-1,1} = E_{p-1}Y_{p,1} + G_{p-1} \quad (19)$$

After ratio (19) substitution to SLAE (14) we'll find

$$Y_{p,1} = \frac{C_p}{1 - D_p E_{p-1}} Y_{p+1,1} + \frac{D_p G_{p-1} - f_{p,1}}{1 - D_p E_{p-1}} \quad (20)$$

When comparing equations (18) and (20) and noting that both of the equations being equitable for all the $p = \overline{1, 2m-1}$ indices get the recurrent ratios:

$$E_p = \frac{C_p}{1 - D_p E_{p-1}}, \quad G_p = \frac{D_p G_{p-1} - f_{p,1}}{1 - D_p E_{p-1}} \quad (21)$$

realizing the algorithm of direct sweep. In fact, the following goes from the conditions on the left boundary (3):

$$E_0 = 0, \quad G_0 = Y_{0,1} = YW(t_j) \quad (22)$$

Further E_p , G_p elements are calculated in all the points in increment direction $p = \overline{1, 2m-1}$ on the recurrent formulae (21). Then it goes from the right boundary condition (3) that $Y_{2m,1} = YL(t_j)$. This provides for start of reverse sweep on the recurrent formula (19) in decrease p from $p=2m-1$ up $=1$.

If a sweep algorithm on formulae (20), (18) has the right orientation, it is obvious that it is possible to organize a sweep algorithm of the opposite left orientation as well. Let's assume the existence of such E and G vectors that for all the $Y_{p,1}$ the following equality is executed:

$$Y_{p,1} = E_p Y_{p-1,1} + G_p \quad (22)$$

Having changed in (22) index p by increasing per a unit, we get

$$Y_{p+1,1} = E_{p+1} Y_{p,1} + G_{p+1}. \quad (23)$$

Then after elimination from SLAE (14) $Y_{p+1,1}$ variables by substitution on formulae (23), it seems possible to develop the following recurrent dependencies:

$$E_p = \frac{D_p}{1 - C_p E_{p+1}}, \quad G_p = \frac{C_p G_{p+1} - f_{p,1}}{1 - C_p E_{p+1}} \quad (24)$$

corresponding to the right sweep algorithm in index p from $p=2m-1$ up $p=1$ decrease direction. Here the reverse sweep is realized on the recurrent ratios (22) in increment direction of $p = \overline{1, 2m-1}$ index, which was to be proved.

Let's note that to calculate one using sweep method the system

solution (14), consisting of $(2m+1)$ equations, it's necessary to carry through arithmetical operations in the quantity being only by finite number times bigger than unknown quantity. To solve equations with N unknown quantities of arbitrary linear system N using method of exclusion one usually has to use up arithmetic operations in N^3 quantity. They managed to attain such a reduction of arithmetic operations number when system (14) solving by sweep method while successfully using the specific character of this system.

CONCLUSION

Three-diagonal SLAE parallelization based on numerical-and-analytical method of lines allows to construct absolutely steady algorithms, having a maximal parallel form and, thereby, to achieve minimum time period of its implementation on parallel computing devices. Noteworthy it is also the fact that input data computing errors separated from round-off ones inherent in real personal electronic computers. The algorithm is illustrated on the pattern of initial-boundary-value Dirichlet problem solution for thermal conduction equation. However, it turns out to be an invariant one for class of problems of Neumann. That's why all the input functions are replaced by input data of Naumann's problem $Y_{p,2}, Y_{p+\varepsilon_x,2}^*(\varepsilon_x)$ in the solving of Dirichlet problem. This fact obviously also reflects deeper group-theoretic properties of parabolic type equations relatively to Coshi's data.

LITERATURE

1. Корнеев В.В. Параллельные вычислительные системы / В.В. Корнеев. – М.: Нолидж, 1999. – 320 с.
2. Shvachych G.G. Prospects of construction highly-productive computers systems on the base of standard technologies / G.G. Shvachych // IV International Conference [“Strategy of Quality in Industry and Education”]; May 30 – June 6, 2008; Varna; Bulgaria. – Proceedings. – V. 2. – P. 815 – 819.
3. Баканов В.М. Персональный вычислительный кластер как недостающее звено в технологии проведения сложных технологических расчетов/В.М. Баканов // Метизы. – 2006. – 2 (12). – С. 33 – 36.
4. Воеводин Вл.В. Вычислительное дело и кластерные системы / Вл.В. Воеводин, С.А. Жуматий. – М.: Изд-во Московского университета, 2007. – 150 с.
5. Иващенко В.П. Персональный вычислительный кластер для моделирования многомерных нестационарных задач / В.П. Иващенко, Г.Г. Швачич // Материалы XVI международной научно-

- технической конференции «Прикладные задачи математики и механики». – Севастополь, 2008. – С. 235 – 238.
6. Башков Є.О. Високопродуктивна багатопроцесорна система на базі персонального обчислювального кластера / Є.О. Башков, В.П. Іващенко, Г.Г. Швачич // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія “Проблеми моделювання та автоматизації проектування”. – Вип. 9 (179). – Донецьк: ДонНТУ, 2011. – С. 312 – 324.
7. Пат. 61944 Україна, МПК С21D 1/26, G06F 15/16 (2011.01). Модуль високоєфективної багатопроцесорної системи підвищеної готовності / Іващенко В.П., Башков Є.О., Швачич Г.Г., Ткач М.О.; власники: Національна металургійна академія України, Донецький національний технічний університет. – № и 2010 09341; заявл. 26.07.2010; опубл. 10.03.2011, Бюл. № 5.
8. Воеводин В.В. Параллельные вычисления / В. В. Воеводин, Вл. В. Воеводин. – С.Пб.: ВHV-Петербург, 2002. – 608 с.
9. Немнюгин С. Параллельное программирование для многопроцессорных вычислительных систем / С. Немнюгин, О. Стесик. – С.Пб.: БХВ – Петербург, 2002. – 396 с.
10. Іващенко В.П. Некоторые аспекты проблемы математического моделирования задач металлургической теплофизики на основе применения параллельных вычислительных систем кластерного типа / В.П. Іващенко, Г.Г. Швачич, А.А. Шмукин // Сучасні проблеми металургії. Наук. пр. – Т. 7. – Дніпропетровськ: Системні технології, 2005. – С. 23 – 30.
11. Швачич Г.Г. О параллельных компьютерных технологиях кластерного типа решения многомерных нестационарных задач / Г.Г. Швачич // Materiály IV mezinárodní vědecko - praktická konference [«Vědecká potenciál světa – 2007»]. – D. 7. – Technická vědy. Matematika. Fyzika. Moderní informační technologie. Věstavba a architektura. Praha: Publishing House «Education and Science» s.r.o. – S. 35 – 41.
12. Швачич Г.Г. Об алгебраическом подходе в концепции распределенного моделирования многомерных систем / Г.Г. Швачич // Теория и практика металлургии. Общегосударственный научно-технический журнал. – 2007. – № 6 (61). – С. 73 – 78.
13. Швачич Г.Г. Математическое моделирование одного класса задач металлургической теплофизики на основе многопроцессорных параллельных вычислительных систем / Г.Г. Швачич // Математичне моделювання. – 2008. – № 1 (18). – С. 60 – 65.

УДК 621.3.076

Б.И. Кузнецов, Т.Б. Никитина, М.О. Татарченко, В.В. Хоменко

**МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ СИНТЕЗ
МНОГОМАССОВЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
НА ОСНОВЕ СТОХАСТИЧЕСКИХ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ
АЛГОРИТМОВ ОПТИМИЗАЦИИ РОЕМ ЧАСТИЦ**

Аннотация. Разработан метод многокритериального синтеза анизотропийного регулятора комбинированного робастного управления многомассовой электромеханической системой на основе стохастических мультиагентных алгоритмов оптимизации роем частиц. Приведены примеры сравнения динамических характеристик многомассовых систем с синтезированными при многокритериальном подходе анизотропийных регуляторов и с типовыми регуляторами.

Ключевые слова: многомассовая электромеханическая система, многокритериальный синтез, мультиагентный алгоритм оптимизации.

Постановка проблемы, связь с научными и практическими задачами. Создание систем, способных обеспечивать высокую точность управления при интенсивных задающих и возмущающих воздействиях широкого спектра частот, является центральной проблемой современной теории и практики автоматического управления [1].

Анализ последних достижений и публикаций. К проектируемым динамическим системам управления предъявляются разнообразные требования при их работе в различных режимах: качество переходных процессов задается временем первого согласования, временем регулирования, перерегулированием и т.д.: при отработке случайных задающих, либо компенсации случайных возмущающих воздействий задается дисперсия ошибки слежения либо стабилизации [2]. Для таких систем в большинстве практических случаев с помощью типовых ПИД регуляторов не удается выполнить технические требования, предъявляемые к системе, что обуславливает применение более сложных регуляторов и современных методов их синтеза.

Одним из основных требований, предъявляемых к современным системам управления, является требование робастности синтези-

рованной системы, т.е. способность системы сохранять предъявляемые к ней технические требования при изменении в определенных пределах параметров объекта управления и внешних воздействий [3-4]. Одним из интенсивно развивающихся подходов к синтезу робастных систем управления является синтез регуляторов, минимизирующих различные нормы вектора цели управления [5-7]. Для повышения точности управления в робастной системе реализуется комбинированное управление, в котором сочетается управление с обратной связью по выходу объекта управления и управление по разомкнутым циклам как по задающему, так и по возмущающему воздействиям [1, 8]. Эффект комбинированного управления определяется тем, что при синтезе робастного управления используется вся имеющаяся информация о задающем и возмущающем воздействиях [9-10].

Однако при проектировании реальных систем управления не предъявляются требования к нормам вектора цели, да и сам вектор цели робастного управления не задан.

Целью статьи является разработка метода многокритериального синтеза комбинированных многомассовых электромеханических систем стохастического робастного управления, у которых используется информация о задающем и возмущающем воздействиях для минимизации анизотропийной нормы системы на основе стохастических мультиагентных алгоритмов оптимизации рою частиц.

Задачей статьи является многокритериальный синтез и исследование динамических характеристик стохастической робастной системы управления двухмассовой электромеханической системой.

Изложение материала исследования и полученных результатов. Рассмотрим исходную дискретную систему, имеющую n -мерный вектор состояния x , m -мерный вектор входа ω и p -мерный вектор цели z , заданную в пространстве состояний матрицами A , B , C , D , так что

$$x_{k+1} = Ax_k + B\omega_k, z_k = Cx_k + D\omega_k, \quad (1)$$

Средняя анизотопия этой системы равна

$$\bar{A}(G) = -\frac{1}{2} \ln \det \left(\frac{m \Sigma}{\text{Trace}(LPL^T + \Sigma)} \right), \quad (2)$$

где матрица $P \in R^{n \times n}$ есть грамиан управляемости G , удовлетворяющий уравнению Ляпунова, а матрицы L и Σ соответствуют решению

R уравнения Риккати [6]. Решение задачи синтеза анизотропийных регуляторов во временной области в виде матриц A , B , C , D реализации, с помощью которых минимизируется средняя анизотропия системы (2), сводится к вычислению трех алгебраических уравнений Риккати, уравнения Ляпунова и уравнения специального вида для вычисления уровня анизотропии входного сигнала [7].

Если величина анизотропии входной дискретной последовательности системы находятся в диапазоне $0 < a < \infty$, то значение анизотропийной нормы системы $\|w\|_a$ ограничено значениями H_2 и H_∞ нормами системы. Причем, при нулевой средней анизотропии синтез оптимального регулятора, минимизирующего анизотропийную норму, сводится к решению двух уравнений Риккати и такой оптимальный анизотропийный регулятор соответствует оптимальному стохастическому регулятору, минимизирующему дисперсию выходного сигнала – H_2 норму. При бесконечной средней анизотропии входного сигнала, соответствующего полностью определенному детерминированному сигналу, анизотропийный регулятор является оптимальным детерминированным робастным регулятором, минимизирующим H_∞ норму. При значениях средней анизотропии входного сигнала в диапазоне $0 < a < \infty$, анизотропийный регулятор занимает промежуточное положение между регуляторами, минимизирующими H_2 и H_∞ нормы. В настоящее время практически полностью разработана теория детерминированного робастного управления, основанная на решениях уравнений Риккати для синтеза во временной области робастного регулятора и робастного наблюдателя. При этом можно синтезировать регулятор, минимизирующий смешанный критерий, основанный на минимизации H_2 и H_∞ норм, взятых с определенными весовыми множителями. При этом, роль такого весового множителя фактически играет параметр толерантности γ .

Таким образом имеется взаимосвязь различных задач теории стохастического робастного управления с задачей синтеза анизотропийных регуляторов для линейных систем, причем классические H_2 и H_∞ регуляторы являются предельными случаями оптимального анизотропийного регулятора, а оптимальный анизотропийный регу-

лятор минимизирует функционал H_∞ -энтропии замкнутой системы для определенного значения его параметра γ .

Часто к системам управления, кроме требований по точности отработки либо компенсации случайных входных сигналов, предъявляются определенные требования к качеству переходных процессов – времени первого согласования, времени регулирования, перерегулирования и т.д. Таким образом, кроме требований по работе системы при случайных входных сигналах, предъявляются определенные требования по отработке системой детерминированных воздействий – ступенчатых сигналом. Причем, эти требования могут существенно отличаться для переходных процессов при отработке системой «малых» и «больших» воздействий [2].

Кроме того, к системе часто предъявляются определенные требования по отработке гармонических сигналов фиксированных частот, либо заданного диапазона частот, которые также являются детерминированными сигналами. Естественно, что эти требования могут быть удовлетворены при детерминированном подходе синтеза проектируемой системы.

Естественно, что проектируемая система должна одновременно удовлетворять всем требованиям, предъявляемым к работе системы в различных режимах и при различных входных сигналах.

Основной подход к синтезу робастного управления во временной области основан на решении задачи оптимального управления. Однако, в отличие от классического подхода к синтезу систем оптимального управления, при робастном управлении в уравнение состояния исходного объекта управления кроме вектора управления включается также вектор внешних воздействий. Причем вектор внешних воздействий характеризует изменение состояния системы за счет параметрических и структурных изменений модели объекта управления.

Центральная идея синтеза систем робастного управления связана с синтезом системы, минимизирующей критерий качества по норме управления, но максимизирующей этот же критерий по норме вектора внешних воздействий. При этом, за счет введения в функцию Гамильтона нормы вектора внешних воздействий со знаком минус, синтезируемая система минимизирует чувствительность системы к

изменяемым параметрам объекта управления, а следовательно, обеспечивает робастность системы

Такой подход соответствует игровому подходу к задаче оптимизации, когда первый игрок «управление» минимизирует функцию цели, а второй игрок «неопределенные параметры объекта управления» максимизирует эту же функцию цели. Причем, так как исходная система описывается системой дифференциальных уравнений – матричным уравнением состояния, а оба игрока используют одну и ту же функцию цели, то такая игра называется дифференциальной игрой с нулевой суммой.

Исходная система, замкнутая синтезированным анизотропийным регулятором, обладает определенными динамическими характеристиками, которые определяются вектором цели. Возможность решения задачи многокритериального синтеза анизотропийных регуляторов многомассовых электромеханических систем путем соответствующего выбора вектора цели показана на основе концепции функционально множественной принадлежности вектора состояния, что позволяет удовлетворить разнообразным требованиям, которые предъявляются к работе многомассовых электромеханических систем в различных режимах.

Введем вектор искомых параметров $\chi = \{C, D\}$, компонентами которого являются элементы матриц C и D исходной системы (1), с помощью которых формируется вектор цели z стохастического робастного управления (2). Зададим начальное значение вектора χ , синтезируем анизотропийный регулятор и определим следующие показатели качества замкнутой системы в различных режимах: время отработки заданного угла рассогласования – $t_{рег}$; время разгона до номинальной скорости и время торможения до полной остановки – $t_{раз}$, ошибку отработки гармонического сигнала заданной амплитуды и частоты $\varepsilon_{гар}$, ошибку стабилизации случайного изменения момента нагрузки $\varepsilon_{сл}$, максимальную скорость наведения ω_{max} , минимальную скорость наведения ω_{min} , неплавность наведения при минимальной скорости $\Delta\omega_{min}$, переменные состояния и управления, которые требуется ограничивать. Пронормируем эти частные критерии y_i , так чтобы они находились в диапазоне $0 \leq y_i \leq 1$. Приближение нормирован-

ного значения i -го частного критерия к единице соответствует напряженной ситуации, а если величина нормированного значения частного критерия приближается к нулю, то это соответствует спокойной ситуации. Для решения этой задачи многокритериальной оптимизации воспользуемся нелинейной схемой компромиссов [2]

$$\chi^* = \arg \min_z \sum_{i=1}^J \alpha_i [1 - y_i(\chi)]^{-1}, \quad (3)$$

где α_i - весовые коэффициенты, характеризующие важность частных критериев.

При многокритериальном синтезе в системе управления кроме локальных критериев необходимо учитывать ограничения на переменные состояния и управления, заданные в форме неравенств. Обычно бывает ситуация, когда исходная точка по некоторым ограничениям является недопустимой. В частности, это касается заданных значений времени первого согласования, перерегулирования, точности отработки и компенсации случайных внешних воздействий и многих других показателей качества, предъявляемых к системе. Более того, некоторые локальные критерии в результате многокритериального синтеза могут быть вообще не выполнены. Однако, ряд критериев, таких как величины управляющих воздействий и переменных состояния являются допустимыми. Поэтому, в нелинейной схеме компромиссов (3) используется комбинация метода штрафных функций [11-13] с внутренней точкой для локальных критериев и ограничений, являющихся допустимыми, и метода с внешней точкой для локальных критериев и ограничений, являющихся недопустимыми, так что целевая функция в (3) примет следующий вид

$$f(\chi, r, \lambda) = \sum_{i=1}^J \alpha_i [1 - y_i(\chi)]^{-1} + s(r)L(z) + p(\lambda)T(\chi), \quad (4)$$

где $s(r)$ и $p(\lambda)$ - весовые функции, учитывающие влияние функции

штрафа $L(\chi, r) = r^2 \sum_{i=1}^m \frac{1}{g_i(\chi)}$ для метода внутренней точки и функции

штрафа $T(\chi) = \sum_{i=1}^m \frac{1}{2r} \{\min[0, g_i(\chi(r))]\}^2$ для метода внешней точки. Для

получения оптимального решения и выполнения ограничений необходимо, чтобы $r \rightarrow 0$, а $\lambda \rightarrow \infty$.

Исследования целевой функции полученной задачи (4) показало, что она является многоэкстремальной и имеет участки типа оврагов и «плато». Для нахождения глобального оптимума такой целевой функции вначале использовался метод последовательного квадратичного программирования (Sequential quadratic programming – SQP method) со случайным заданием точек мультистарта, покрывающих область значений искомых параметров. Однако в областях многомерных оврагов и «плато», такой подход оказался малоэффективным и приводил к «блужданию» по дну оврага, медленному продвижению к глобальному оптимуму в окрестности участка типа «плато». Для повышения скорости нахождения глобального оптимума использованы стохастические мультиагентные алгоритмы на основе оптимизации роением частиц [14-15].

Результаты экспериментальных исследований двухмассовой электромеханической системы. На основании экспериментальных исследований двухмассовой электромеханической системы установлено, что применение синтезированных анизотропийных регуляторов по сравнению с типовыми регуляторами позволило сократить время первого согласования в пять раз, повысить плавность движения на низких скоростях в 1.7 раза, уменьшить дисперсию ошибки отработки случайного задающего воздействия в четыре раза. Синтезированная система имеет меньшую чувствительность к изменению параметров объекта управления по сравнению с системой с типовыми регуляторами.

Выводы из приведенного исследования, перспективы этого направления. Разработан метод многокритериального синтеза анизотропийных регуляторов многомассовых электромеханических систем, позволяющий удовлетворить разнообразным требованиям, которые предъявляются к работе многомассовых электромеханических систем в различных режимах. Возможность такого подхода показана на основе концепции функционально множественной принадлежности вектора состояния. Обоснован и разработан метод выбора матриц, с помощью которых формируется вектор цели стохастического робастного управления путем решения задачи нелинейного программирования. Для решения такой многоэкстремальной задачи нелинейного программирования, использованы стохастические мультиагентные алгоритмы на основе оптимизации роением частиц. Синтезированные систе-

мы являются робастными по отношению к изменению параметров моделей объектов управления и внешних воздействий за счет минимизации анизотропийной нормы. Приведены результаты экспериментальных исследований двухмассовой электромеханической системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кунцевич В.М. Инвариантность и квазиинвариантность систем управления /В.М. Кунцевич // Праці міжнародної конференції «50 років Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України». – Київ: інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, 2008. – С. 61-74.
2. Воронин А.Н. Многокритериальный синтез динамических систем. – К.: Наукова думка, 1992. – 160 с.
3. Кунцевич В.М. Квазиинвариантность, робастность и адаптация в системах управления /В.М. Кунцевич // Труды научного семинара «70 – лет теории инвариантности». – М.: Издательство ЛКИ, 2008. – С. 61 – 90.
4. Кунцевич В.М. От проблем управления одним объектом – к проблемам управления классами объектов /В.М. Кунцевич // Проблемы управления и информатики. – 1994. - № 1-2. – С. 3-15.
5. Diamond P., Vladimirov I.G., Kurdjukov A.P., Semyonov A.V. Anisotropy – based performance analysis of linear discrete time invariant control systems // Int. J. Control. – 2001. – V. 74. – Pp. 28 – 42.
6. Vladimirov I.G., Kurdjukov A.R, Semyonov A.V. State-space solution to anisotropy-based stochastic H_∞ – optimization problem // Proc. 13th IFAC World Congress. – San-Francisco (USA). – 1996. – Pp. 427 – 432.
7. Semyonov A.V., Vladimirov I.G., Kurdjukov A.P. Stochastic approach to H_∞ –optimization // Proc. 33rd IEEE Conf. on Decision and Control. – Florida (USA). – 1994. – Pp 2249 – 2250.
8. Кунцевич В.М. Управление в условиях неопределенности: гарантированные результаты в задачах управления и идентификации/В.М. Кунцевич. – К.: Наукова думка, 2006. – 264 с.
9. Hoyle D., Hyde R., Limebeer D.J.N. An H_∞ approach to two-degree-of-freedom design / Proceedings of the 30 th IEEE Conference on Decision and Control. – Brighton: 1991. – P. 1581-1585.
10. Limebeer D.J.N., Kasenally E.M., Perkins J.D. On the design of robust two degree of freedom controllers / Automatica.– 1993. – №29. – P. 157 – 161.
11. Батищев Д.И. Многокритериальный выбор с учетом индивидуальных предпочтений / Д.И. Батищев, Д.Е. Шапошников. – Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1994. – 92 с.
12. Штойер Р. Многокритериальная оптимизация. Теория, вычисления и приложения/[под. ред. А.В. Лотова]. – М.: Радио и связь, 1992. – 504 с.
13. Ногин В.Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход / В.Д. Ногин – М.: Физматиздат, 2004. – 176 с.
14. Clerc. M. Particle Swarm Optimization.– London: ISTE Ltd, 2006. – 244 p.
15. Gazi V., Passino K.M. Swarm Stability and Optimization. – Springer, 2011. – 318 p.

А.И. Федорович

**ИССЛЕДОВАНИЕ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ
СДВИГА В ЗАДАЧАХ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ**

Аннотация. Проведен сравнительный анализ мощности непараметрических критериев сравнения сдвигов в выборках независимых и автокоррелированных случайных величин с различными законами распределения вероятностей. Исследована работоспособность критериев в задачах сравнения выборок с различными законами распределения вероятностей.

Ключевые слова: выборка измерений, мощность критерия, непараметрические критерии, сдвиг.

Постановка задачи

В задачах ультразвукового неразрушающего контроля объектов информация об их состоянии содержится в выборках измерений, статистические закономерности которых, как правило, неизвестны. Изменение статистических закономерностей является свидетельством изменения состояния объекта. Оценка изменения может быть использована при контроле однотипных объектов и наблюдении за их состоянием при эксплуатации, после длительного хранения, перевозке, ремонте. Задача обнаружения изменения состояния объектов может быть решена путем сравнения двух выборок измерений с неизвестными законами распределения вероятностей. Чаще всего выборки отличаются центром группировки измерений и величиной рассеяния (сдвигом и масштабом по терминологии непараметрической статистики) [1]. В работе [1] рассмотрено десять методов использования непараметрических критериев сдвига для сравнения двух выборок случайных величин. Это критерии Кенуя, ранговый, Манна-Уитни-Вилкоксона, Ван-дер-Вардена, медианный, Мостеллера, Розенбаума, Хаги, Е-критерий. Критерии Мостеллера и Розенбаума имеют малоэффективны и поэтому не рассматриваются.

При сравнении выборок измерений возможны два ошибочных решения: 1) при равенстве сдвигов выборок случайных величин при-

нимается противоположное решение (ошибки первого рода); 2) при сравнении двух выборок с неравными сдвигами принимаются ошибочные решения об их равенстве (ошибки 2-ого рода). Приведённые непараметрические критерии сдвига могут использоваться в задачах неразрушающего контроля для распознавания элементов с неизвестными случайными параметрами, измеряемые с ошибками и различными законами распределения вероятностей.

Цель исследования – оценка вероятностей ошибочных решений и сравнительный анализ работоспособности непараметрических критериев сдвига для различных видов законов распределения вероятности и коррелированности случайных величин в задачах неразрушающего контроля.

Вычислительные эксперименты

В работе рассмотрены критерии сдвига в контексте, что сравниваемые выборки случайных величин имеют одинаковый масштаб.

Исследуются выборки случайных величин с законами распределения вероятностей: логистическим, Лапласа, Гаусса. И коррелированные нормальные случайные величины. Длина исследуемых выборок $n = 200$, а количество проведённых независимых экспериментов $k = 10000$. Эффективностью критерия является его способность распознавать различие между сдвигами исследуемых выборок. Вычислительные эксперименты проводились следующим образом:

1. Две выборки с логистическим (Лапласовским, нормальным) распределением с одинаковыми дисперсиями, математическое ожидание одной выборки фиксировано и равно нулю, а второй – изменяется от нуля до единицы, с шагом в 0,1.

2. Коррелированные нормальные случайные величины ($r = 0.1, r = 0.5, r = 0.9$), также при одном фиксированном математическом ожидании и изменяющимся другом, с тем же шагом.

3. Выборки с различными законами распределения вероятностей (логистический и нормальный; нормальный и Лапласа, логистический и Лапласа) фиксированным сдвигом одной выборки и изменяющимся – другой.

Анализ результатов вычислительных экспериментов

В результате проведения вычислительных экспериментов были получены таблицы эффективности непараметрических критериев сдвига. Пример такой таблицы приведен ниже, для двух выборок ло-

гистическим распределением ($\sigma_1 = \sigma_2 = 1, a_1 = 0$). В таблице 1 приведено значение вероятности принятия правильного решения (сдвиги одинаковы) в зависимости от величины отклонения сдвига одной выборки от сдвига другой. При заданной вероятности принятия решения $P = 0.97$.

Таблица 1

№	Критерий \ a_2	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
1	Стьюдента	0,963	0,837	0,482	0,135	0,018	0,003	0,001	0,001	0,001	0,001	
2	Ранговый	0,944	0,936	0,908	0,853	0,792	0,708	0,607	0,473	0,384	0,283	
3	Хаги	0,971	0,974	0,964	0,951	0,943	0,901	0,89	0,858	0,833	0,811	
4	Е	0,967	0,974	0,964	0,966	0,949	0,932	0,932	0,903	0,897	0,862	
5	Кенуя	0,706	0,7	0,707	0,696	0,688	0,682	0,682	0,663	0,663	0,646	
6	В-д-В	0,959	0,931	0,91	0,865	0,787	0,701	0,608	0,496	0,382	0,284	
7	Вилкоксона	0,956	0,942	0,927	0,848	0,8	0,71	0,596	0,503	0,383	0,293	
8	Медианный	0,927	0,916	0,88	0,831	0,773	0,722	0,612	0,505	0,434	0,336	

По результатам таблицы построены графики (рисунок 1).

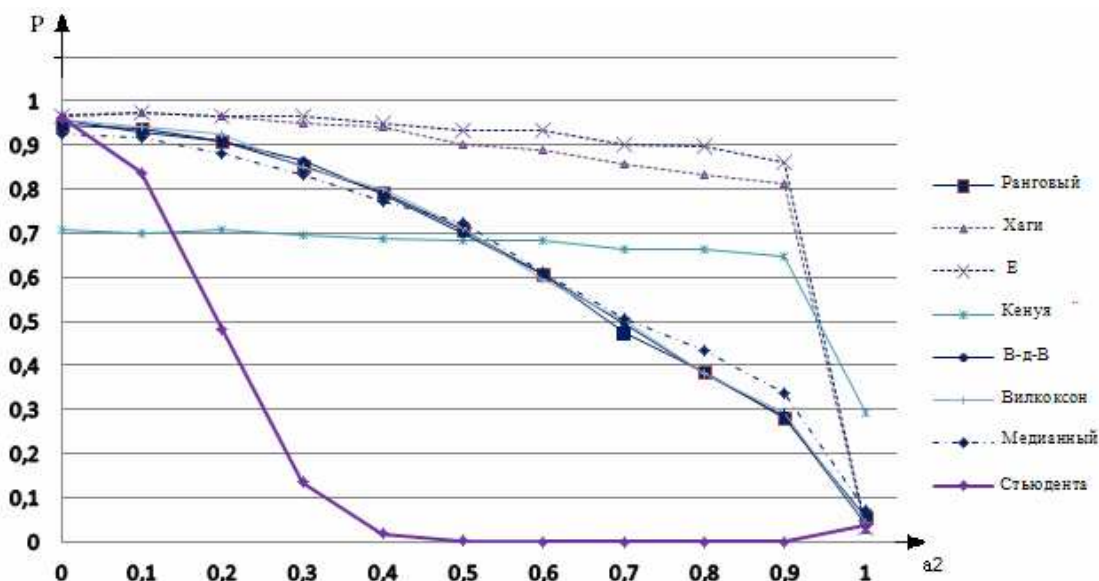


Рисунок 1 – Зависимость вероятности распознавания неравенства сдвигов от величины отклонения параметра a_2 от $a_1 = 0$

В таблице 2 приведён пример показателей эффективности непараметрических критериев сдвига при сравнении выборок с различными законами распределения вероятностей. Для случая сравнения выборок с нормальным и лапласовским распределениями ($\sigma_1 = \sigma_2 = 1, a_1 = 0$). В таблице приведено значение вероятности, с которой каждый из критериев определяет выборки как имеющие различные сдвиги.

Таблица 2

№	Критерий	a_2											
		0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	
1	Стьюдент	0,046	0,078	0,186	0,386	0,615	0,802	0,926	0,974	0,993	0,996	1	
2	Ранговый	0,088	0,083	0,156	0,281	0,425	0,589	0,705	0,825	0,907	0,958	0,982	
3	Хаги	0,07	0,086	0,111	0,149	0,202	0,276	0,358	0,438	0,527	0,609	0,694	
4	Е	0,002	0,004	0,007	0,01	0,016	0,022	0,028	0,039	0,054	0,066	0,085	
5	Кенуя	0,691	0,694	0,6989	0,68	0,669	0,653	0,64	0,624	0,603	0,579	0,553	
6	В-д-В	0,04	0,062	0,125	0,241	0,369	0,573	0,717	0,842	0,92	0,976	0,992	
7	Вилкоксон	0,039	0,065	0,135	0,272	0,429	0,603	0,766	0,877	0,949	0,978	0,995	
8	Медианный	0,082	0,099	0,173	0,311	0,492	0,632	0,761	0,849	0,915	0,962	0,98	

В случае коррелированных случайных величин, получаются следующие результаты. Приведён случай марковских случайных величин с $a_1=1$ и коэффициентом корреляции $r=0.5$. Результаты данного эксперимента занесены в таблицу 3.

Таблица 3

№	Критерий	a_2											
		0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	
1	Стьюдент	0,247	0,538	0,886	0,987	1	1	1	1	1	1	1	
2	Ранговый	0,254	0,33	0,513	0,718	0,866	0,942	0,984	0,996	1	1	1	
3	Хаги	0,108	0,152	0,304	0,484	0,669	0,833	0,92	0,971	1	1	1	
4	Е	0,08	0,11	0,219	0,34	0,52	0,661	0,788	0,874	0,925	0,967	0,981	
5	Кенуя	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
6	В-д-В	0,275	0,335	0,504	0,704	0,866	0,958	0,983	0,997	1	1	1	
7	Вилкоксон	0,25	0,341	0,519	0,714	0,876	0,954	0,988	0,996	1	1	1	
8	Медианный	0,22	0,272	0,507	0,645	0,798	0,922	1	1	1	1	1	

Графики, построенные по результатам таблицы 3 приведены на рисунке 2.

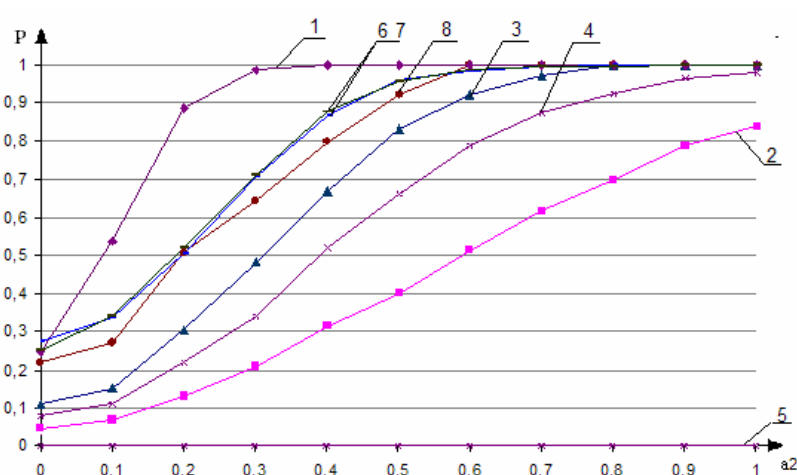


Рисунок 2 - Зависимость вероятности распознавания неравенства сдвигов от величины отклонения параметра a_2 от $a_1=0$, при корреляции выборок $r=0.5$

Из графиков и таблиц видно, что критерий Кенуя мало эффективен для любых из рассматриваемых случаев, и к применению не рекомендуется. Медианный критерий имеет невысокую эффективность распознавания различия между сдвигами (0.7) для любых сочетаний законов распределения выборок случайных величин. Неработоспособен для коррелированных случайных величин. Е-критерий имеет низкую эффективность распознавания при наличии изменения сдвигов, но может быть применён для выборок случайных величин с коэффициентов корреляции до 0.8. В этом случае критерий различает две выборки случайных величин, как имеющие различные сдвиги, с вероятностью 0.87. Критерий Хаги не работоспособен для коррелированных выборок. Но, эффективность не снижается, если исследуемые выборки случайных величин имеют различные законы распределения вероятностей. Ранговый критерий не применим для коррелированных случайных величин. Однако его эффективность (0.8-0.9) не снижается, если исследуемые выборки имеют различные законы распределения вероятностей. Критерий Ван-дер-Вардена и Вилкоксона идентичны по своим свойствам. Эффективность их распознавания наличия неравенства сдвигов двух выборок случайных величин составляет 0.8-0.9 для выборок с произвольными и даже различными видами законов распределения вероятностей. Но не применимы к выборкам коррелированным.

Поскольку, сама статистика каждого критерия является случайной величиной, то в дальнейшем будет исследовано влияние величины сдвигов на статистику каждого критерия, с целью определения по её параметрам, состояния объекта после эксплуатации.

Выводы

1. Непараметрические критерия сдвига возможно использовать лишь в тех случаях, когда заранее известно, что исследуемые выборки имеют одинаковые дисперсии.

2. Распознавание различия между сдвигами двух выборок случайных величин не зависят от вида их закона распределения вероятностей. Наименее эффективным является критерий Кенуя.

3. Невозможно применение критериев для коррелированных случайных величин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика/ А.И. Кобзарь. – М.: ФИЗМАТ ЛИТ, 2006. – 816 с.
2. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. – М.: Наука, 1983. – 416 с.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВЕРТЫВАНИЯ ВЕСОМОЙ НИТИ С ПОМОЩЬЮ ФИЗИЧЕСКИХ ДВИЖКОВ

Анотація. Фізичні движки — бібліотеки комп'ютерного моделювання руху систем тіл, що дозволяють додавати і видаляти тіла безпосередньо в ході розрахунків — являють собою зручний інструмент для дослідження динаміки систем, структура яких змінюється під час руху. У роботі запропоновано алгоритм розгортання вагової нитки, складеної з шарнірно зв'язаних твердих тіл, що додаються по мірі розгортання. Моделювання виконано за допомогою движків Vox2D і Bullet. Показано можливості верифікації результатів розрахунків.

Одной из тенденций современной космонавтики является использование на орбите протяженных систем. Так, в 2007 г. со спутника YES2 был развернут 30-километровый трос с закрепленной на его конце спускаемой капсулой. Подобные космические тросовые системы предполагается использовать для создания интерферометров с большой базой, солнечных электростанций, а также систем увода отработавших космических аппаратов [1, 2]. В связи с этим актуальна задача исследования динамики разворачивания таких систем [3, 4].

Учет влияния космической среды на движение протяженного тела сам по себе является достаточно сложной проблемой. Поэтому на начальном этапе исследований целесообразно упростить исходную постановку задачи, рассмотрев поведение системы в более простых внешних условиях, а именно — исследовать разворачивание весо­мой нити с закрепленным концом, находящейся в поле постоянной силы тяжести.

Трос можно представить системой связанных друг с другом точечных масс или твердых тел. Моделирование движения таких систем с помощью современных пакетов физического моделирования (например, SimMechanics или MapleSim) выполняется достаточно просто. Сложности возникают при решении задач, в которых структура системы изменяется в процессе движения. Добавление тел по мере

развертывания требует остановки расчета и внесения коррективов в схему системы.

Перспективным средством решения подобных задач представляются физические движки (physics engines) — библиотеки компьютерного моделирования движения систем частиц и тел [5], позволяющие добавлять и удалять тела непосредственно в ходе расчета. Появившись в связи с развитием индустрии компьютерных игр и 3D-моделирования, эти библиотеки затем нашли широкое применение в системах виртуальной реальности [6] и робототехнике. Обзор моделей, численных методов и алгоритмов, используемых в физических движках, содержится в [7]. Наиболее полный список подобных библиотек приведен на сайте [8].

Целью работы является обзор основных компонентов физических движков и создание на их основе модели развертывания весоной нити.

Принципы моделирования с помощью физических движков

В отличие от математических библиотек, реализующих те или иные численные методы, физический движок как библиотека дает возможность пользователю создавать такие объекты как «частица», «тело», «связь» и управлять их характеристиками.

Моделирование с помощью физического движка начинается с создания виртуального пространства — «мира», в который помещаются частицы и тела. Тела могут быть твердыми или «мягкими» (soft body), с заданными характеристиками движения и массой. Кроме того, каждому телу присваивается определенная форма (collision shape), которая потом используется при анализе столкновений.

Затем задаются действующие на тела силы и импульсы, добавляются связи между телами и выполняется расчет движения. Основными задачами физического движка на этом этапе являются обнаружение столкновений между телами и расчет на основе этой информации состояния тел в следующий момент времени. Полученные данные о состоянии тел передаются средству отображения (рендереру).

По окончании расчетов выполняется «уборка мусора»: удаляются созданные связи, тела и др. объекты.

Рассмотрим подробнее шаг расчета по времени. Прежде всего выполняется обнаружение столкновений тел (collision detection). Оно состоит из широкой и узкой фаз (broadphase и narrowphase). Во время

широкой фазы алгоритм обнаружения столкновений находит пары потенциально взаимодействующих объектов. При этом используется упрощенная геометрия системы, например, тела заменяются выровненными по осям ограничивающими параллелепипедами (*axis aligned bounding box*). Далее наступает черед узкой фазы, во время которой движок должен определить реальные точки контакта тел, нормали и глубины проникновения. Узкая фаза обычно значительно «дороже» в вычислительном плане, чем широкая, поэтому от эффективности выполнения широкой фазы во многом зависит производительность движка при большом количестве тел.

Учетом обнаруженных столкновений (*resolve collisions*) занимается подсистема движка, называемая «решателем» (*solver*). В задачу решателя входит вычисление скоростей тел после столкновения, и коррекция их положений во избежание проникновения друг в друга.

На завершающем этапе происходит вычисление новых координат и скоростей тел. Для этого используются традиционные методы численного решения обыкновенных дифференциальных уравнений, в частности, методы Эйлера-Кромера, Верле и Рунге-Кутты.

Более подробно внутреннее устройство и принципы работы физических движков описаны в [9–11].

Схема нити

Пусть нить состоит из шарнирно связанных твердых тел. В физических движках используются следующие три вида твердых тел:

- динамические тела (*dynamic rigidbodies*) — обычные твердые тела, способные двигаться и сталкиваться с другими телами;
- статические тела (*static rigidbodies*) — неподвижные тела, с которыми могут сталкиваться другие тела;
- кинематические тела (*kinematic rigidbodies*) — подвижные тела, движение которых задается пользователем и столкновение с другими телами не может его изменить.

В нашем случае понадобятся динамические тела, составляющие нить, и статическое тело, к которому нить будет крепиться.

Для соединения тел понадобится сферический шарнир (*revolute joint*) (рис. 1а), допускающий одну (в плоском случае) или три (в пространственном) вращательные степени свободы, а также призматическое соединение (*prismatic* или *sliding joint*), имеющее одну поступательную степень свободы (рис. 1б).

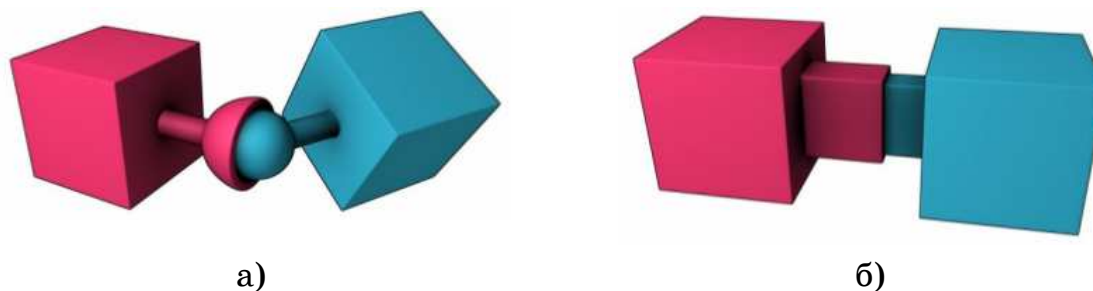


Рисунок 1 — Соединения между телами и их условные обозначения:
а) сферический шарнир; б) призматическое соединение [12]

Кроме того, в соединениях можно задать моторы (joint motor), то есть силы, регулирующие взаимное движение соединенных тел, а также ограничители (joint limits) взаимного перемещения/вращения тел. Для моделирования развертывания необходимо задать мотор в призматическом соединении, позволяющий раздвигать тела с заданной скоростью.

Схема развернутой нити представлена на рис. 2.

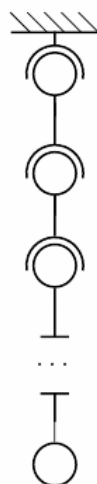


Рисунок 2 — Схема развернутой нити

Алгоритм развертывания

Алгоритм развертывания нити состоит из двух основных этапов: инициализации (рис. 3) и шага расчета.

```

Создаем «мир» и задаем гравитацию
Создаем статическое тело ground
Создаем динамическое тело jointBody и помещаем его в точку крепления нити
Соединяем ground и jointBody сферическим шарниром
Создаем динамическое тело transBody
Соединяем jointBody и transBody призматическим шарниром, задаем мотор
  
```

Рисунок 3 — Алгоритм развертывания: инициализация (псевдокод)

По окончании инициализации система приобретает вид, показанный на рис. 4а. Нить состоит из единственного звена, включающего в себя два тела (`jointBody` и `transBody`), соединенных призматическим шарниром.

В ходе разворачивания эти тела раздвигаются с заданной скоростью. Когда расстояние между ними превысит некоторую фиксированную длину `length` (рис. 4б), звено трансформируется: удаляется связывающий тела шарнир (рис. 4в) и создается новое тело `newBody` (рис. 4г). Если нить еще не развернута на полную длину, то `newBody` соединяется с `jointBody` призматическим шарниром (рис. 4д) и процесс разворачивания продолжается уже в звене `jointBody`–`newBody`. Теперь `newBody` играет роль `transBody` (рис. 4е). Если же нить развернута, то `newBody` и `jointBody` соединяются сферическим шарниром и система приобретает вид, показанный на рис. 4з.

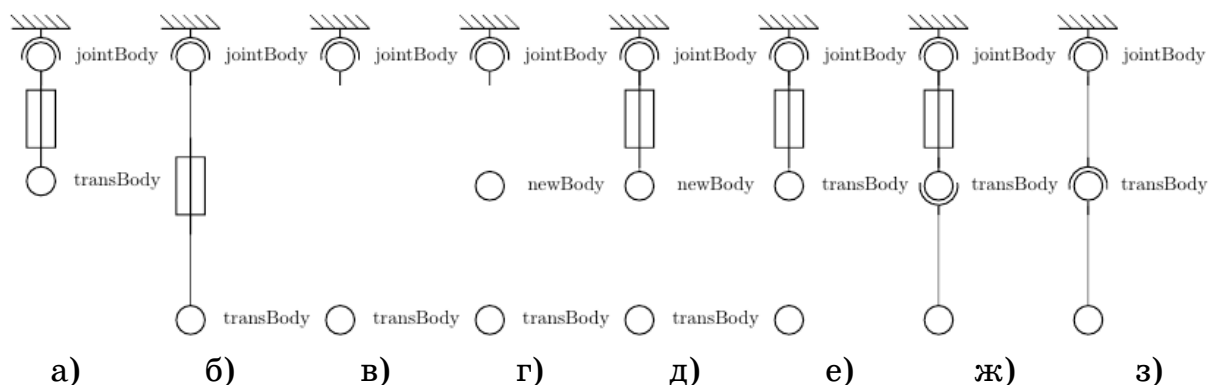


Рисунок 4 — Схема разворачивания нити

Шаг расчета алгоритма разворачивания нити представлен на рис. 5.

```

Вычисляем длину звена
Если длина звена больше length
    удаляем призматический шарнир
    создаем динамическое тело newBody
Если нить не развернута полностью
    соединяем newBody и jointBody призматическим шарниром
иначе
    соединяем newBody и jointBody сферическим шарниром
соединяем newBody и transBody сферическим шарниром
transBody = newBody
  
```

Рисунок 5 — Алгоритм разворачивания: шаг расчета (псевдокод)

Моделирование развертывания

Рассмотрим реализацию алгоритма развертывания на примере двух физических движков — Vox2D [13] и Bullet [14]. Программный код реализации находится на сайте [15].

Vox2

Vox2D — свободный двумерный физический движок, разработанный Эрином Катто (Erin Catto). Простой в освоении, Vox2D широко используется в компьютерных играх (в частности, в Angry Birds) и в учебных приложениях.

Vox2D предназначен для моделирования динамики систем твердых тел. Тела могут быть связаны шарнирами различных видов (всего их более десятка), снабженными моторами и ограничителями, подвергаться действию разных сил, в частности, сил гравитации, трения и удара. Движок может моделировать столкновения тел, составленных из выпуклых многоугольников, окружностей и линий. Работа с Vox2D подробно описана в [16].

Vox2D написан на C++ и может работать на любой платформе, на которой присутствует компилятор C++. Кроме того, он портирован на многие языки программирования и программные среды, включая Java, C#, Adobe Flash, JavaScript и Delphi.

Результаты моделирования развертывания при помощи Vox2D представлены на рис. 6.

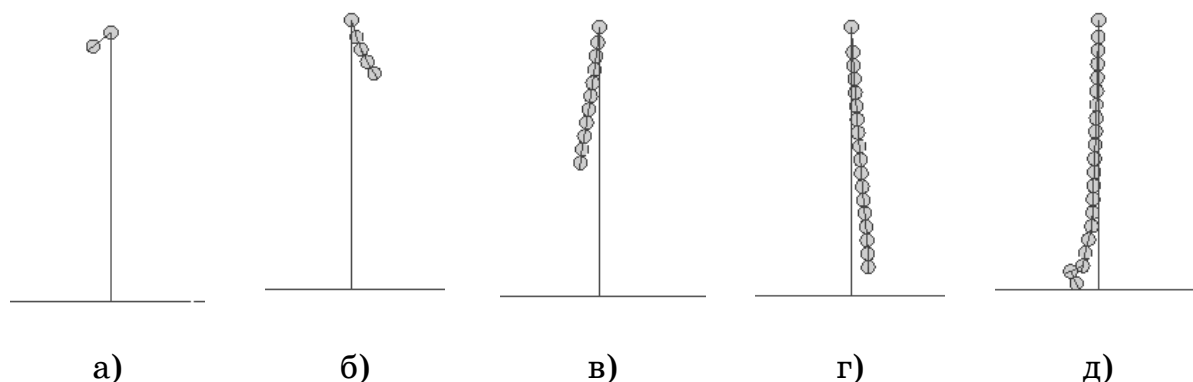


Рисунок 6 — Кадры анимации развертывания нити, смоделированного при помощи Vox2D

Bullet

Bullet — свободный трехмерный физический движок реального времени, разработанный Эрвином Кумансом (Erwin Coumans). Помимо твердых тел, движок позволяет моделировать движение мягких

тел, реализует методы гидродинамики сглаженных частиц (smoothed particle hydrodynamics), поддерживает технологии CUDA и OpenCL.

Bullet активно используется в компьютерных играх (GTA 4, 5), фильмах (Shrek 4), программах 3D-моделирования (Blender).

На рис. 7 представлены результаты моделирования развертывания нити с помощью Bullet.

Возможности верификации результатов

Рассмотренные выше библиотеки являются свободными и распространяются с открытым исходным кодом, что позволяет специалисту самостоятельно оценить то, как реализован тот или иной компонент библиотеки и, при необходимости, исправить ошибки или добавить новые компоненты.

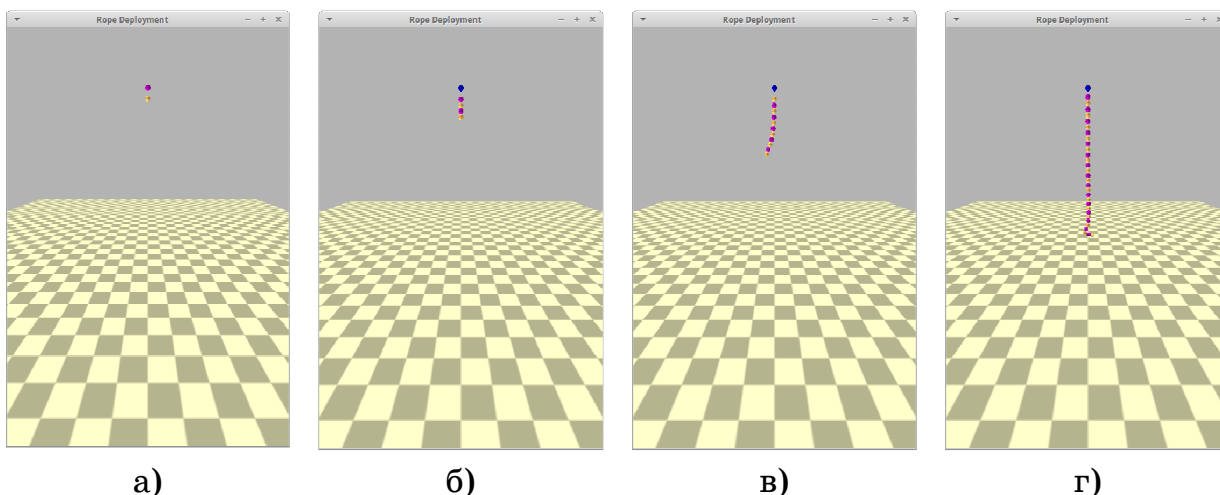


Рисунок 7 — Кадры анимации развертывания нити, смоделированного при помощи Bullet

Кроме того, можно сравнить между собой результаты, полученные с помощью разных движков. Для этого существуют формат COLLADA Physics и API Physics Abstraction Layer (PAL).

COLLADA [17] — это стандартный формат обмена данными между 3D-приложениями, основанный на XML. Стандарт COLLADA состоит из нескольких частей, одна из которых — COLLADA Physics — отвечает за передачу данных о физических объектах. Файл COLLADA представляет собой мгновенный «снимок» виртуального пространства, содержащий данные обо всех находящихся в нем телах и связях между ними. Стандарт поддерживается наиболее известными физическими движками, в частности, Bullet. Это дает возмож-

ность, импортируя файл COLLADA, выполнить аналогичную симуляцию на другом движке.

Иной подход к обмену данными предлагается в PAL [18]. PAL представляет собой интерфейс к абстрактному физическому движку, с помощью которого разработчик может использовать одновременно несколько движков или менять их между собой, в том числе непосредственно в ходе расчетов.

Выводы

Использование физических движков позволяет разработчику расчетных программ оперировать объектами более близкими к предметной области — динамике систем твердых тел — по сравнению с подходом, основанным на использовании языков программирования общего назначения совместно с математическими библиотеками.

Физические движки позволяют без значительных усилий разработать программу развертывания нити и получать результаты расчетов в реальном времени. Следует отметить, что для большинства физических движков скорость выполнения расчетов важнее их точности. Поэтому, в частности, во многих движках используются методы численного интегрирования не выше 2-го порядка. Однако, для свободных движков этот недостаток легко исправить подключением дополнительных математических библиотек.

Отметим, что ряд физических движков позволяет рассчитывать динамику деформируемых (мягких) тел. Однако методы, на которых основываются эти расчеты, весьма скудно описаны в руководствах и требуют дальнейшего изучения. Поэтому в работе предложен алгоритм моделирования развертывания нити, составленной из шарнирно связанных твердых тел.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cartmell M. P. A review of space tether research / M. P. Cartmell, D. J. McKenzie // Progress in Aerospace Sciences. — 2008. — V. 44, N 1. — P. 1–21.
2. Волошенюк О. Л. Космические тросовые системы — перспективное направление космической техники и технологии / О. Л. Волошенюк, А. В. Пироженко, Д. А. Храмов // Космічна наука і технологія. — 2011. — Т. 17, № 2. — С. 32–44.
3. Dynamics of variable-length tethers with application to tethered satellite deployment / J. L. Tang, G. X. Ren, W. D. Zhu, H. Ren // Communications

- in Nonlinear Science and Numerical Simulation. — 2011. — V. 16, N 8. — P. 3411–3424.
4. Dynamical simulation of tether in orbit deployment / N. N. Smirnov, Yu. A. Demyanov, A. V. Zvyaguin, A. A. Malashin, A. A. Luzhin // Acta Astronautica. — 2010. — V. 67, N 3--4. — P. 324–332.
 5. Jones M. T. Open source physics engines. Building believable worlds with open source [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <http://www.ibm.com/developerworks/opensource/library/os-physicsengines/os-physicsengines-pdf.pdf>
 6. An Evaluation of Open Source Physics Engines for Use in Virtual Reality Assembly Simulations / J. Hummel, R. Wolff, T. Stein, A. Gerndt, T. Kuhlen // Advances in Visual Computing. 8th International Symposium, ISVC 2012, Rethymnon, Crete, Greece, July 16–18, 2012, Revised Selected Papers, Part II. — 2012. — P. 346–357.
 7. Interactive simulation of rigid body dynamics in computer graphics / J. Bender, K. Erleben, J. Trinkle, E. Coumans // EUROGRAPHICS 2012 State of the Art Reports. — Cagliari, Sardinia, Italy : Eurographics Association, 2012.
 8. Physics Engines List [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <http://www.digitalrune.com/Support/Blog/tabid/719/EntryId/30/Physics-Engines-List.aspx>
 9. Millington I. Game Physics Engine Development / I. Millington. — New York : Morgan Kaufmann Publishers, 2010. — 553 p.
 10. Bourg D. M. Physics for Game Developers / D. M. Bourg, B. Bywalec. — Cambridge : O'Reilly, 2013. — 551 p.
 11. Eberly D. H. 3D Game Engine Architecture / D. H. Eberly. — New York : Morgan Kaufmann Publishers, 2005. — 736 p.
 12. Bullet 2.82 Physics SDK Manual [Электронный ресурс].- Режим доступа: http://bullet.googlecode.com/svn/trunk/Bullet_User_Manual.pdf
 13. Box2D [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <http://www.box2d.org/>
 14. Bullet Physics Library [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://bulletphysics.org/>
 15. Компьютерное моделирование развертывания весоной нити с помощью физических движков [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://dkhramov.dp.ua/index.php?n=Sci.SciSoft>
 16. Box2D C++ tutorials [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.iforce2d.net/b2dtut/>
 17. COLLADA [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://collada.org/>
 18. PAL [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.adrianboeing.com/pal/index.html>

V.P. Ivaschenko, G.G. Shvachych, M.A. Tkach

**PROSPECTS OF NETWORK INTERFACE INFINIBAND IN
MULTIPROCESSOR COMPUTER SYSTEMS FOR SOLVING
TASKS OF CALCUALTIONS' AREA SPREADING**

The article investigates the specific application InfiniBand network interface in a multiprocessor computer system for tasks aimed at increasing the computational domain. The main patterns regarding the computing time of a task depending on changes in the field of computing in a multiprocessor system. The carried out researches had the aim to determine the deceleration rate calculations. The rate is connected with an increase in the computational domain of multiprocessor system in comparison with a computer having the unlimited field of computing.

Keywords: multi-processor computer system, computing nodes, calculations ' area for multiprocessor systems, computing platforms.

Introduction

The need to use high-performance computing in the whole world belongs to the fundamentals of developing a strategic capacity and has an important scientific, technical and economic importance. Nowadays there are two main methods of improving productivity and performance of computing systems:

- the use of increasingly complicated element base;
- parallel execution of computational operations.

The first method needs a very significant investment. Experience of the Company CRAY which created supercomputer based on gallium arsenide showed that the development of fundamentally new element base for high performance computing systems is a daunting task even for such a well-known corporation. The second method dominates after the announcement of the U.S. government program: " Accelerated Strategic Computer Initiative » (ASCI). Taking the above in account we note that in recent years the process of creating high-performance systems developed mainly in the direction of combining many parallel processors

for the solution of a large and complex task [1 – 3]. In this regard now we equate supercomputer and parallel (multi) computer system.

We note that the development of such systems is an actual problem. This is not only because of the fundamental limitations for the maximal possible speed of conventional serial computers but also because of constant existence of computational tasks for which capacity of existing computer equipment is insufficient. These tasks include, for example, the numerical modeling of hydrodynamics and metallurgical Thermo physics [4 – 5], the pattern recognition problem, optimization problems with a large number of parameters, climate modeling, genetic engineering calculations, design of integrated circuits, analysis of environmental pollution [6] as well as solving a wide range of multi-dimensional unsteady problems [7], etc.

However, there were not many researches devoted to the effectiveness of computing parallelization. This can be explained by the fact that this problem is extremely complex because the efficiency of parallelization of calculations depends on many factors. Along with this, we note that neglecting of these factors can negate the effect of increasing the number of processors used. Taking into account the marks, this work is aimed at disclosure the effectiveness of parallelization for a certain class of tasks solved by using multiprocessor computer systems.

Analysis of recent research and publications

Currently there appeared a unique opportunity to create inexpensive installations network technologies of the supercomputer's type: multiprocessor computer clusters. Until recently, there was doubt in the prospect of such a direction. However, with all the "pros" and "contras" the permanent residents in a list of Top500 : companies Cray, Sun, Hewlett-Packard and others had to make room passing forward a number of cluster solutions. On the other hand, now the market is rapidly developing, and manufacturers of networking solutions based on cLAN, Myrinet, ServerNet, SCI continue to improve their technologies, practically enabling to construct their own version of a supercomputer without any financial expenses. It is obvious today there are many different options for building cluster computing systems. However, one of the major differences in their design lies in the networking technology, the choice of which is determined by the class of tasks. For example, solving the metallurgy tasks via the mathematical modeling of high-speed heat treat-

ment of the long length objects. One of the main problems can be formulated as follows: we have a differential grid of dimension M , the computation time of solving the task with using a single-processor system is determined by t . This parameter is critical. It is necessary to reduce significantly the computation time while preserving the value of M . Here we consider the problem of reducing the computation time by increasing the number of nodes in a cluster system. This approach is focused, for example, on the development of new technological processes in which the computation time is a critical value. In addition, similar problems often have to be solved in the fields of medicine, military equipment, etc.

Thus, the theme of designing cluster multiprocessor systems today is relevant, interesting and experiencing a stage of rapid development. It is clear that using high productive clusters (HPC) is an effective way to solve a wide range of topical problems. In our opinion, the new qualitative stage of development of multiprocessor cluster system lies in the use of new advanced network technologies. This is explained as follows. Network computing cluster system is fundamentally different from a network of workstations, although it demands to build cluster conventional network cards and hubs/switches that are used in the design of a network of workstations. However, in the case of a cluster computing system, there is one fundamental feature. Cluster network is primarily intended for computing processes, not for computers' communication. In this regard, the higher is the throughput speed of a computer network cluster, the faster will be solved users' parallel tasks performed at the cluster. Thus, the technical characteristics of computer networks is of the utmost importance for multi-cluster systems.

By now the problem of choice and analysis of network technology for modular multi-cluster systems was not well developed. In addition, practically there are no works devoted to the study of influence of network technologies on parallelization efficiency in modular multiprocessor cluster systems. In this regard studies, considered in this paper, are directed on prospects for InfiniBand network technology application for solving tasks with an expandable calculations' area.

Statement of the Problem Research

In this paper we consider the following problem. There is a differential grid having dimension M ; the computation time for solving the

task by using a single-processor system is determined by the value t . This parameter is not determinative. The principal is increasing the size of the net, and above the one which can be processed in a computer memory. This procedure is critical for a more detailed account or getting some new effects of the investigated processes. It is necessary to investigate the features of the calculations under this class of tasks based on the use of multiprocessor computer system having network interface InfiniBand.

Purpose and objectives of research

The purpose of this work is to study the specific application InfiniBand network interface in parallel computing for solving tasks related to the extension of the computational area.

First of all, it is necessary to:

1. Identify the basic regularity regarding the counting time for a task depending on changes in the field of multiprocessor computing system designed on the application of network interface InfiniBand. At the same time it is important to carry out the main analytical interconnections defining the dependence of the solution of the problem on the basic parameters of a multiprocessor system.

2. Explore the option of a hypothetical computer with unlimited memory and to hold the comparative analysis with a real multiprocessor system; compare features of formation computational area for this computer with analytical interconnection; show the results of the comparative analysis of the functioning of a real multiprocessor system and hypothetical computer with unlimited memory to determine the main factors affecting the efficiency of parallelization of a real computer system.

3. Run the modeling phase of the main performance characteristics of the problem being solved by the application of a multiprocessor system designed on the application network interface InfiniBand.

4. To carry out the research aimed at determining the rate of deceleration the calculations associated with an increase of the area of multiprocessor computing system, distributed over its nodes, in a comparison with a computer with an unlimited area of computing.

Derive analytical expressions for the rate of deceleration the calculations. Studies are directed on further development of the approach given below which was focused in [5 – 12]. The studies and developed to a multiprocessor system [13].

The main material of research

Thus, we consider the task of expanding the area of computing by increasing the number of nodes in a cluster system. We assume that the area is evenly distributed among computing nodes of a cluster system. For the convenience of research we also assume that the area in which the calculations are carried out has the shape of a circle. At the same time each node of the multiprocessor system corresponds to one sector of an isometric circle. Taking into account that each cluster node has available RAM R (Gbit), the total area of computing for a multiprocessor system is represented as the ratio:

$$S = N \cdot R, \quad (1)$$

where N – number of nodes in a multiprocessor system.

In the conditions when the area of computing is maximally loaded and evenly distributed among the nodes of a multiprocessor system, one can define a formula to calculate the volume of the boundary data exchange (in Gbit). This formula is:

$$E_{\text{ex}} = m \cdot N \cdot \sqrt{\frac{S}{\pi}}, \quad (2)$$

The value of m may be equal to unity for a unilateral regime of boundary data exchange or two for bilateral one. Note that at $N = 1$ it is completely obvious that the value of the amount of data exchange boundary (E_{ex}) vanishes.

Under such circumstances it is possible to determine – T_{ex} the time of data exchange among the boundary nodes of the cluster c . Note that the counting time iteration depends only on the power of the processor while the time of boundary data exchange is dictated by the size of the differential grid, the number of nodes of the cluster system and computer network capacity. Consequently, one can determine the value T_{ex} from ratio:

$$T_{\text{ex}} = \frac{E_{\text{ex}}}{V}. \quad (3)$$

In the expression (3) V – is the cluster network capacity (Gbit / s). In general a communication network throughput in a multiprocessor system can be determined on the relation:

$$V = k \cdot d \cdot V_p, \quad (4)$$

where V_p (Gbit /s) is the network capacity of a port, κ – is a number of computer network communication channels which operate simultaneously (the number of computer networks), d – half-duplex ($d = 1$) or duplex ($d = 2$) mode of a cluster computer network system. In this class of tasks all calculations are made on the basis of the differential grid. In addition, for the analysis of the effectiveness of a multiprocessor system the most important parameter is the calculation time per iteration (T_{it}).

$$T_{it} = T_c^N + T_{ex} . \quad (5)$$

Here T_c^N is the computing time for one iteration of a multiprocessor system (s):

Obviously, for the case where $N = 1$ we obtain that

$$T_{it} = T_c^1 . \quad (6)$$

where T_c^1 – is the counting time per iteration for a single-processor computer system. For the case where $N > 1$ the total calculation time per iteration will be determined as (7) regarding expression (2).

$$T_{it} = T_c^N + \frac{m \cdot N \cdot \sqrt{\frac{S}{\pi}}}{V} . \quad (7)$$

For the considering type of tasks we will specify the first term in (7). Wherein:

$$T_c^N = \frac{S}{N \cdot V_c} , \quad (8)$$

V_c – counting rate of one iteration of the task for this type of processor and associated numerical methods which are determined experimentally. Using (1), the expression (8) is presented as following:

$$T_c^N = \frac{R}{V_c} . \quad (9)$$

Analysis of (9) shows that T_c^N depends on the memory amount used by the CPU and on the speed of computation for one iteration for this node type multiprocessor system. Thus, we have all the prerequisites for the determination of total computation time per iteration for a multiprocessor system:

$$T_{it} = \frac{R}{V_c} + \frac{m \cdot N \cdot \sqrt{\frac{N \cdot R}{\pi}}}{V} \quad (10)$$

Analysis of (10) shows that at the increase of the computational area in N times the calculation time for the task grows as $N^{3/2}$ with a coefficient that depends on the amount of RAM node cluster network capacity and the character of communication among nodes, i.e.:

$$T_{it} = T_c^N + N^{3/2} \cdot f \cdot (m, R, V). \quad (11)$$

Analysis of (11) shows the perspective of the modern communication technologies, e.g., InfiniBand application and also the use of multi-core computing platforms. On the background of the conducted research let us consider the case of hypothetical computer with unlimited memory. Thus, taking into account the relation (6), we obtain:

$$T_c^1(S) = \frac{S_i}{V_c} \quad (12)$$

In (12) the total area of the hypothetical computer calculations represented in the form:

$$S_i = i \cdot R, \quad (13)$$

where i – coefficient that determines the change in the area of computing hypothetical computer. Analysis of the interconnections (12) and (13) shows that the increase of the total amount of computation in N times the calculation time increases linearly with some coefficient depending on the computational capabilities of the processor.

In accordance with the derived computational interconnections' the experiments for a computing platform equipped with a processor Intel E8400 3 GHz were conducted. Here features of the tasks of the solved class and the ones of the cluster system were accepted as the initial characteristics. It is shown in Table.1.

Table 1

Initial data for calculating system performance using a computing platform equipped with a processor Intel E8400 3 GHz

Vp	8 Gbit/s
T_c^1	100 s
Vc	$14 \cdot 10^9$ bit/s
R	24 Gbit
m	2
d	2
k	1

The obtained simulation results are listed in Table 2 .

Under this system simulation results showed the following general trend: in effect a significant impact of time for the boundary data ex-

change by the total time for solving the problem, on the background of expansion of area calculation time to solve the problem for real multiprocessor system will increase significantly compared with the ideal computer.

Table 2

The results of calculating the basic characteristics of the system equipped with a processor Intel E8400 3 GHz

N	S_n	E_{ex}	T_{ex}	$T_{c,n}$	T_{it}	T_{id}
2	48,00	15,64	1,95	1,71	3,67	3,43
3	72,00	28,73	3,59	1,71	5,31	5,14
4	96,00	44,23	5,53	1,71	7,24	6,86
5	120,00	61,82	7,73	1,71	9,44	8,57
6	144,00	81,26	10,16	1,71	11,87	10,29
7	168,00	102,40	12,80	1,71	14,51	12,00
8	192,00	125,11	15,64	1,71	17,35	13,71
9	216,00	149,29	18,66	1,71	20,38	15,43
10	240,00	174,85	21,86	1,71	23,57	17,14
11	264,00	201,73	25,22	1,71	26,93	18,86
12	288,00	229,85	28,73	1,71	30,45	20,57
13	312,00	259,17	32,40	1,71	34,11	22,29
14	336,00	289,64	36,21	1,71	37,92	24,00
15	360,00	321,22	40,15	1,71	41,87	25,71
16	384,00	353,88	44,23	1,71	45,95	27,43
17	408,00	387,56	48,45	1,71	50,16	29,14
18	432,00	422,26	52,78	1,71	54,50	30,86
19	456,00	457,93	57,24	1,71	58,96	32,57
20	480,00	494,56	61,82	1,71	63,53	34,29

The obtained simulation results are displayed in the form of plots (Fig. 1).

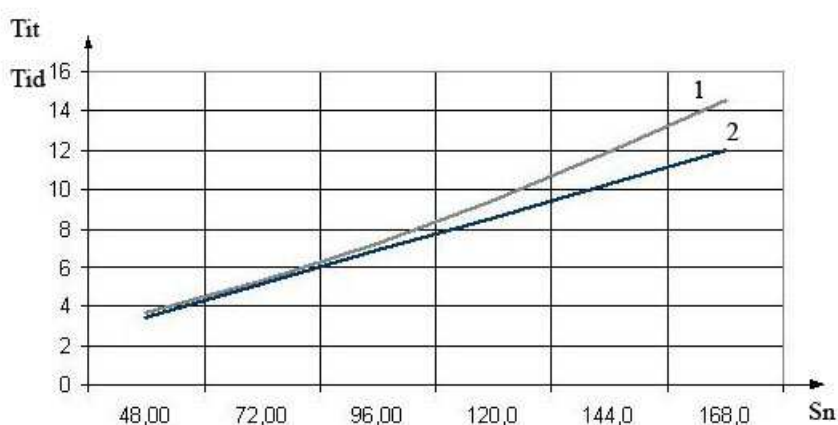


Figure 1 - Curves of the calculation time of one iteration depending on the size of the computational area for a multiprocessor system equipped with an Intel Pentium 4 3 GHz

As we can see in Fig. 1 counting time per iteration by increasing the computational area of a multiprocessor system varies according to the nonlinear dependence (curve 1, T_{it}). This dependence shows that an increase in the computational area in N times the calculation time of the problem grows as $N^{3/2}$ with a coefficient that depends on the amount of RAM for the node cluster network capacity and the nature of data exchange among the computing nodes. Counting time for one iteration of a hypothetical computer with unlimited memory, as was expected, increases linearly (Line 2, T_{id}). The angle of a line inclination is determined by the characteristics of the applied computing platform. Note that the experiments were carried out for a multiprocessor system shown in [13].

For the system described above simulation results showed the following general trend: significant impact time for the expensed area to solve the task of boundary data exchange by the total time for solving the task for real multiprocessor system will increase significantly compared with the ideal computer.

Further studies are directed at determining the deceleration calculations' rate (K) associated with an increase of the multiprocessor computing system area distributed over its nodes in comparison with one computer with an unlimited computing area. Obviously, such a deceleration rate will be determined by the ratio.

$$K = \frac{T_c^N}{T_c^1(S)}. \quad (14)$$

Equation (14) shows that this factor is calculated and, simultaneously, one has to take into account the increase of the computing area of a multiprocessor system distributed above the nodes. Using (5) we obtain:

$$K = \frac{T_c^N + T_{ex}}{T_c^1(S)}. \quad (15)$$

In regarding (7 - 10), (12) and (13), the value of deceleration calculations' rate (K) can be represented in the form convenient for analysis:

$$K = \frac{1}{N} \left(1 + \frac{T_{ex}}{T_c^N} \right). \quad (16)$$

Expression (16) can be represented in a form suitable for analysis:

$$K = \frac{1}{N}(1 + K_1). \quad (17)$$

In the expression (17) K_1 is defined as:

$$K_1 = \frac{T_{ex}}{T_c^N}. \quad (18)$$

This factor can be interpreted as the ratio of the active deceleration due to the fact that this value mainly affects the deceleration rate of calculations in general.

The features of the solved class of tasks and the ones of the cluster system were accepted as the initial characteristics and shown in Table.1. The simulation results are presented in the form of plots (Fig. 2).

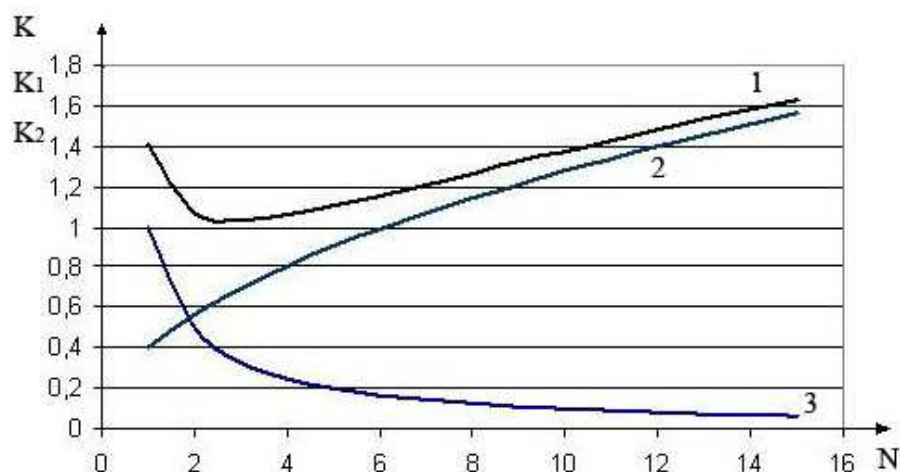


Figure 2. - Curves deceleration rate of the number of nodes in a multiprocessor system equipped with a processor Intel E8400 3 GHz

In Figure. 2 Line 1 shows the general trend of the deceleration of calculations rate. Line 2 shows the effect of time of the boundary data exchange on deceleration computing coefficient. At the same time line 3 shows the effect of the number of nodes in a multiprocessor system by the value of deceleration calculations' rate. These dependences have a significant effect on computing time of the boundary data exchange deceleration coefficient. Last underlines the need to perform a procedure matching the network interface and computational capabilities of the selected computing platform. Furthermore, it becomes apparent that at other equal conditions for a multiprocessor system we have a problem of

optimal choice of the nodes' number to minimize the deceleration rate calculations.

Conclusions and prospects for further research

1. We revealed main patterns regarding the counting time for the task depending on changes in the computing area for a multiprocessor system. It is shown that at the increase of the total amount of computation in N times the calculation time increases in $N^{3/2}$.

2. We derived the main analytical interconnections determining the dependence of the task solution on the basic parameters of a multiprocessor system. Such interconnections showed that the calculation time for a task grows nonlinearly with a coefficient that depends on the amount of a node memory, network capacity and the nature of the cluster communication among computing nodes.

3. We considered an option of a hypothetical computer with unlimited memory and held its comparative analysis with a real multiprocessor system and derived analytical expressions defining features of the computational area for the formation of such a computer. To determine the main factors affecting the efficiency of parallelization of a real computer system there were analyzed two processes: functioning of a real multiprocessor system and functioning of a hypothetical one with unlimited memory. Studies showed the relevance of the reconciliation process components of the network interface and the processing capabilities of the selected computing platforms.

4. The research was focused on determining the calculations' deceleration rate associated with an increase in the area of multiprocessor computing system distributed over its nodes; the rate coefficient was compared with the one of a computer with an unlimited computing area. We derived analytical expressions for the calculations' deceleration rate. The decisive role of time for the boundary data exchange on the value of the calculations' deceleration rate was shown.

5. In their subsequent studies the authors intend to highlight features matching components of the network interface and the processing capabilities of the selected computing platforms and provide solution for the task of optimal choice of nodes in a multiprocessor system to minimize the calculations' deceleration rate.

LITERATURE

1. Лацис А.О. Как построить и использовать суперкомпьютер / А.О. Лацис. – М.: Бестселлер, 2003. – 240 с.
2. Гергель В.П. Основы параллельных вычислений для многопроцессорных вычислительных систем: учеб. пособие / В.П. Гергель, Р.Г. Стронгин. – Н.Новгород: Н.НГУ, 2003. – 184 с.
3. Beowulf Introduction & Overview [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.beowulf.org>.
4. Коздоба Л. А. Вычислительная теплофизика / Л.А. Коздоба. – К.: Наук. думка, 1992. – 224 с.
5. Иващенко В.П. Параллельные вычисления и прикладные задачи металлургической теплофизики / В.П. Иващенко, Г.Г. Швачич, А.А. Шмукин // Системні технології. Регіональний збірник наукових праць. – Вип. 3(56). – Т. 1. – Дніпропетровськ, 2008. – С. 123 – 138.
6. Швачич Г.Г. К вопросу конструирования параллельных вычислений при моделировании задач идентификации параметров окружающей среды / Г.Г. Швачич // Математичне моделювання. – 2006. – № 2 (14). – С. 23 – 34.
7. Швачич Г.Г. О параллельных компьютерных технологиях кластерного типа решения многомерных нестационарных задач / Г.Г. Швачич // Materiably IV mezinbrodnn videcko- praktickb konference [«Vedecky potencial sveta - 2007»]. – D. Technicke vedy. Matematika. Fyzika. Modernn informacni technologie. Vystavba a architektura. – Praha: Publishing House «Education and Science» s.r.o. – P. 35 – 43.
8. Швачич Г.Г. Математическое моделирование скоростных режимов термической обработки длинномерных изделий / Г.Г. Швачич, В.П. Колпак, М.А. Соболенко // Теория и практика металлургии. Общегосударственный научно-технический журнал. – 2007. – № 4– 5(59 – 60). – С. 61 – 67.
9. Сбитнев Ю.І. Дослідження оцінки ефективності багато процесорної кластерної системи / Ю.І. Сбитнев, Г.Г. Швачич, М.О. Ткач // VI International Conference “Strategy of Quality in Industry and Education”, June, 1 – 8, 2010, Varna; Bulgaria. – Proceedings. – V. 2. – P. 288 – 296.
10. Швачич Г.Г. О проблеме исследования эффективности модульной кластерной системы / Г.Г. Швачич, Ю.І. Сбитнев, М.О. Ткач // [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://cluster.linux-ekb.info/cuda1.php>.
11. Иващенко В.П. Дослідження оцінок ефективності модульної багато процесорної кластерної системи / В.П. Иващенко, Г.Г. Швачич, Є.О. Башков // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія “Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка”. – Вип. 13 (185). – Донецьк: ДонНТУ, 2011. – С. 33 – 43.
12. Башков Е.А. Исследование влияния сетевого интерфейса на эффективность модульной многопроцессорной системы / Е.А. Башков, В.П. Иващенко, Г.Г. Швачич // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія “Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка”. – Вип. 14 (188). – Донецьк: ДонНТУ, 2011. – С. 89–99.
13. Башков І.О. Високопродуктивна багато процесорна система на базі персонального обчислювального кластера / Є.О. Башков, В.П. Иващенко, Г.Г. Швачич // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія “Проблеми моделювання та автоматизації проектування”. – Вип. 9 (179). – Донецьк: ДонНТУ, 2011. – С.312 – 324.

L. Skrupskaya, A. Oliinyk, M. Polyakov

**THE METHOD OF FAILURE PREDICTION
IN THE HIGH VOLTAGE TRANSFORMER EQUIPMENT
BASED ON THE METRIC CLASSIFICATION
OF DIAGNOSTIC FEATURES' TRENDS**

*The process of diagnosing of high-voltage transformers has been analyzed. The problem of measurements clustering of transformers' diagnostic features has been solved. The method which is based on the metric classification and allows predicting the residual life of the high-voltage transformer equipment has been proposed. An experimental study of the proposed method which confirmed its effectiveness in practice has been performed.
Classification, diagnostics, metric, prediction, transformer.*

Introduction

Early identification of trends for faults in the high-voltage equipment helps to prevent progressing of defects; to carry out repair right in time; to reduce maintenance costs. Unlike the diagnosis "in fact", forecasting lets eventually predict the faults occurrence, even if there were appeared no significant deviations of controlled parameters from their certified values.

As the rule, the faults progress goes gradually and continuously at standard modes and it is getting faster in case of the emergency mode [1]. The current transformer residual life prediction methods are known, e.g. [2]. Those methods do not provide early faults detection and they cannot be used to predict the residual life for a long period of time. Thereby the effectiveness of the faults progress preventing measures is reduced. Therefore, it is actual and important to predict equipment failure according to diagnosis data at the earliest stages until the fault is not turned into its critical state.

The failures prediction in the high voltage transformer equipment is based on the mathematical model for the metric data classification [3-6], that allows producing the learning systems. It enables to increase the effectiveness of diagnosing the high-voltage equipment. This

paper proposes a method which is based on the calculations. It lets predict the failures in the high voltage transformer equipment basing on the fact of a given number of diagnostic features.

1. Problem definition of forecasting faults in high voltage transformer equipment

For diagnosing the database with the results of measurements will be used. Measurements are provided for some analogue groups of equipment. The state of this equipment is known according to the scale "functional - refusal" at the time of measurement. Let the database has a plethora of those sets (1):

$$D = \langle n, t, x, y \rangle, \quad (1)$$

where n is object's number, $n = \overline{1, N}$; t is relative discrete measurement time, $t = \overline{0, T_d}$; x is measurement vector of results sizing I ; y is object's state, $y=0$ is "refuse", $y=1$ is "serviceable"; N is database objects number. To convert discrete time to the analogue time the following formula is used: $t_H = t_{HO} + t\Delta$, where t_{HO} – the time when the 1st measurement occurs for this object; Δ is range of time between two measurements.

Then basing on the given multitude D (1) the model $M = M(D)$ should be constructed. It lets execute diagnosis (to specify the output value y) of the HV equipment state according to the set of its characteristics. For the equipment that is accepted as serviceable the model lets specify the residual life service.

The task of the paper is to work out the method of faults forecasting for HV transformer equipment, that allows forecasting at the earlier stages of faults progressing.

2. Method of faults prediction in the high voltage transformer equipment on the basis of metric classification

To specify the transformer state T_q basing on the metric classification [3] the model should be built $M = M(D)$. It is a set of geometric center points for the classes. In the D base there are specified the objects, that are accepted as refusal. Then their parameters should be united in the moment T_d to the k_0 class. Objects measurements are united to the k_1 classes, that are accepted as serviceable for $t \in [0, T_d]$. Parameters for objects that were taken at the previous time should be united to

the $k_{\Delta t}$, $k_{2\Delta t}$, $k_{3\Delta t}$ classes etc. These measurements were taken at the moment of time $T_d - 1$ for the $k_{\Delta t}$ class, $T_d - 2$ for the $k_{2\Delta t}$ class. Meaning of i -th coordinate ($i = \overline{1, I}$), that is the center of k -th class C_i^k ($k = 1, 2, \dots, K$) should be specified according to the formula (2):

$$C_i^k = \frac{1}{N_k} \sum_{j=1}^{N_k} \{x_{ij}\}, \quad (2)$$

N_k is the number of measurement in the set D (1) that is related to the k class; x_{ij} is the meaning of i -th parameter for j -th sample of the object related to the k class.

Having calculated the coordinates of classes centers set C^1, C^2, \dots, C^K , $C^k = \{C_1^k, C_2^k, \dots, C_{N_x}^k\}$ the relation of the samples T_q to some classes $\{1, 2, \dots, K\}$ can be specified for any sample that is out of the D (1) set, basing on the input meanings $\{x_{1q}, x_{2q}, \dots, x_{N_x q}\}$ in their nearness to centers C^1, C^2, \dots, C^K .

Different metrics could be used [5, 6]:

– Euclidean metric:

$$R(T_q, C^k) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_x} (x_{iq} - C_i^k)^2}; \quad (3)$$

– Hamming metric:

$$R(T_q, C^k) = \sum_{i=1}^{N_x} |x_{iq} - C_i^k|; \quad (4)$$

– Maximum value of the distances of every coordinate:

$$R(T_q, C^k) = \max_{i=1, 2, \dots, N_x} |x_{iq} - C_i^k|; \quad (5)$$

– Minimum value of the distances of every coordinate:

$$R(T_q, C^k) = \min_{i=1, 2, \dots, N_x} |x_{iq} - C_i^k|. \quad (6)$$

Depending on the distance $R(T_q, C^k)$ then the relating of transformer occurs to the k class, that is situated at the least distance $R(T_q, C^k)$:

$$k(T_q) = \arg \min_{k=1, 2, \dots, K} R(T_q, C^k), \quad (7)$$

where $\operatorname{argmin}_{k=1,2,\dots,K}$ is the function, that specifies the number of the k class according to the minimal distance $R(T_q, C^k)$.

There could be situations when the results for a transformer will be situated at the same distance to different classes (e.g., $k_{a\Delta t}$ & $k_{b\Delta t}$). In this case the following measures should be taken:

- in order to reduce the potential losses because of the wrong decision (to accept the sample as serviceable set in the case when it should be accepted as refusal) the transformer T_q should be related to the $k_{a\Delta t}$ class with geometric center C^k , that is closer to the k_0 class ($R(C^{k_0}, C^{k_{a\Delta t}}) < R(C^{k_0}, C^{k_{b\Delta t}})$);

- to specify the sample T_q as a part of $k_{a\Delta t}$ class, that contains more numbers of samples in the set D ($N_{D|k=a\Delta t} > N_{D|k=b\Delta t}$).

As the result of making the choice whether the equipment should belong to k_0 class (refusal) or k_1 class (serviceable). At the making decision $k = k_{a\Delta t}$ transformer is considered as the one, that his time to the fault is not less $a\Delta t$, where a is a value that is equal to the intervals number Δt before transformer fault. If the value $a\Delta t$ is less than minimum acceptable time of waiting t_{\min} ($a\Delta t < t_{\min}$), the measures of transformer diagnosis should be provided [7–9].

There is depicted the graphical interpretation of the lot of samples, that corresponds to different $k_0, k_{\Delta t}, k_{2\Delta t}, \dots, k_{a\Delta t}, k_1$ classes in the 2D space of normalized x_1, x_2 curves in the fig 1. There are shown classes, where $y=0$, i.e. the fault equipment is fixed and $y=1$ equipment is processed as serviceable with the different grade of serviceability.

On the fig.1 there is shown possible case for gradual transfer from serviceable state ($y=1$; $k = k_1, k = k_{2\Delta t}, k = k_{\Delta t}$) to the fault state ($y=0$; $k = k_0$).

Thus, the proposed method of predicting failure in the high voltage transformer equipment on the basis of metric classification involves the creation of a diagnostic model by splitting the original set (equipment parameters) on classes depending on the time before the fault event, as well as the calculation of the geometric center of each class.

Calculating the coordinates distance for measured parameters of diagnosed transformer to the centers of model classes it is possible to determine the closest class and therefore, the residual life of the transformer.

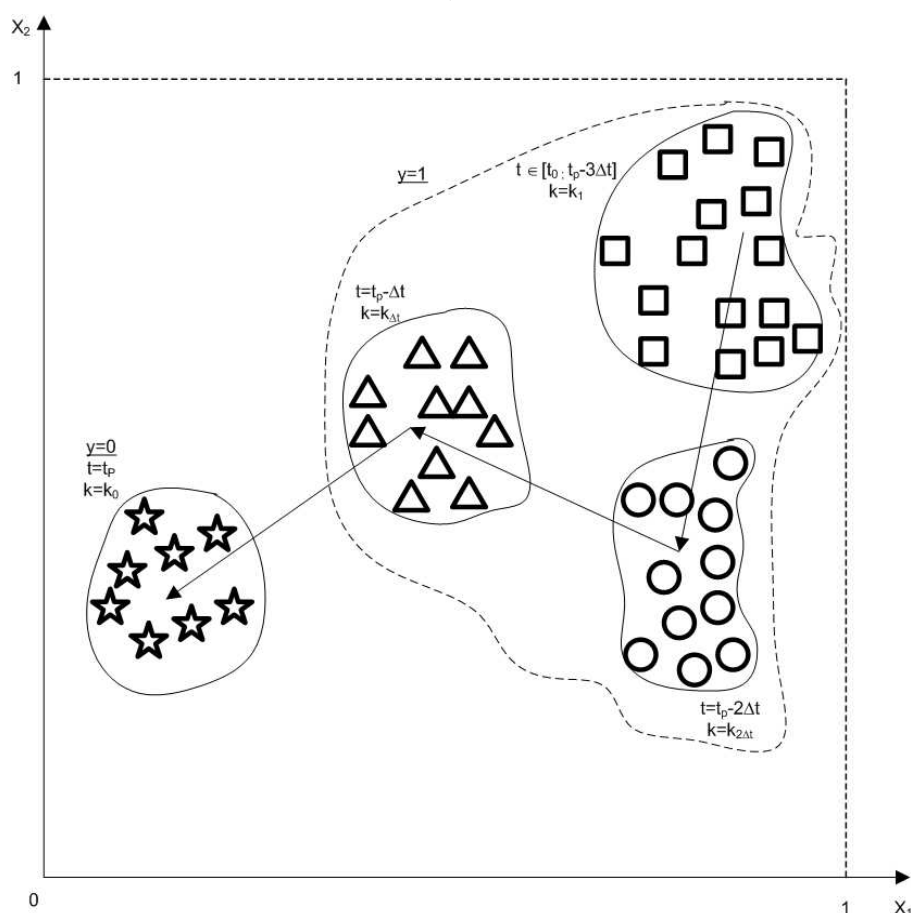


Figure 1 – Graphical interpretation of deviating x_1, x_2 curves meanings at the gradual transfer of samples (transformers) from serviceable state ($y=1$) to the fault state ($y=0$)

3. Experiments and results

For the experiments the proposed method of predicting failure in the high voltage transformer equipment on the basis of metric classification program was implemented with the measuring current transformers. On the basis of this method and software, the task of state diagnosing of paper-oil insulation for measuring current transformers ТФКН-330 was solved. The transformers were in service of ПАО "ДТЭК Днепроэнерго".

As the input parameters there were chosen the next parameters in order to construct the diagnosis model $M = M(D)$ [10]:

– dielectric loss tangent of basic insulation at the operating voltage, x_1 ;

- basic insulation capacitance deviation from the rated value, x_2 ;
- the temperature of the ambient air, x_3 .

The part of the measurements results set D (1) is listed in the table 1, where $Y = 1$ is serviceable transformer state, $Y = 0$ is fault (“refusal”) state.

Table 1

The part of the transformer measurements results set using for the diagnosis model $M = M(D)$

Measurement number	Transformer number	Parameters values			Y	k class
		x_1	x_2	x_3		
1	1	0,460	0,937	0,563	1	$k_{3\Delta t}$
10	3	0,440	0,644	0,781	1	$k_{3\Delta t}$
15	1	0,767	0,286	0,500	0	k_0
18	4	0,574	0,928	0,332	0	k_0
34	6	0,499	0,880	0,767	1	$k_{\Delta t}$
45	8	0,490	0,933	0,900	1	$k_{\Delta t}$
47	8	0,468	0,882	0,333	1	$k_{2\Delta t}$
6	1	0,478	0,955	0,643	1	$k_{2\Delta t}$
71	11	0,407	0,877	0,964	1	k_1
91	13	0,233	0,962	0,435	1	k_1
...
183	15	0,609	1,0	1,0	0	k_0

The measurements of transformers were taken with the average time of $\Delta t = 3$ months. The task was to build the model $M = M(D)$ that will let specify the trends for faults appearance before $t_{progn} = 9$ months of their appearance and complete operation refusal of transformer. Therefore the set of measurement D (columns x_1 , x_2 , x_3 , Y in the table 1) was divided into the k_0, k_1 classes corresponding to the time before fault event, and into $C = \frac{t_{progn}}{\Delta t} = \frac{9}{3} = 3$ for the class ($k_{\Delta t}, k_{2\Delta t}, k_{3\Delta t}$),

corresponding to the states of gradual transfers from serviceable state to the refusal state.

After the classes splitting (transfer $D \rightarrow D'$) the next specification of center classes have been specified according to the formula (2). Results of centers splitting are listed in the table 2.

Table 2

Classes' centers

Class k	Classes center coordinates meanings C_i^k		
	x_1	x_2	x_3
k_0	0,5222	0,8551	0,5159
$k_{\Delta t}$	0,4880	0,8505	0,7462
$k_{2\Delta t}$	0,4696	0,8491	0,7257
$k_{3\Delta t}$	0,4595	0,8580	0,6268
k_1	0,4341	0,8661	0,7683

Then every measurement of transformer T_j was corresponded to the $k = k_0, k_{\Delta t}, k_{2\Delta t}, k_{3\Delta t}, k_1$ classes in accordance with input parameters x_1, x_2, x_3 and their nearness $R(T_j, C^k)$ to the classes centers, using Euclidean metric (3) and the formula (7). Error E of the constructed model $M = M(D)$ was calculated as a relation of wrong classified transformers N_{err} to their common number N_D in the set D that are shown in the table 1:

$$E = \frac{N_{err}}{N_D} = \frac{9}{183} = 0,049. \quad (8)$$

To check the model adequacy $M = M(D)$ its usage for the D_{test} data was executed. Those data do not belong to the D set. Wherein the number of transformer measurements for D_{test} set was $N_{D_{test}} = 134$ un. Error E_{test} of the model $M = M(D)$ was calculated in the following way, calculated for the D_{test} data.

$$E_{test} = \frac{N_{err, test}}{N_{D_{test}}} = \frac{12}{134} = 0,089. \quad (9)$$

It is clear that error E_{test} for the given D_{test} is a little bit greater than E , calculated for the data D . Both characteristics meanings E &

E_{test} are in the range of allowable error of 10%, that allows making decision that it is expedient to use the proposed method in practice. Furthermore all cases of wrong classification have to do with the case of processing serviceable transformers as the faulty ones. That is not so significant than the case of processing the faulty transformer as serviceable one.

Conclusion

In this paper the problem of forecasting the actual failures in high voltage transformer equipment was solved.

Scientific novelty lies in the fact that there was developed a method of predicting failures in high voltage transformer equipment on the basis of metric classification, which involves splitting the original set on classes of the characteristics of transformers depending on the time before their failure, the calculation of the geometric center coordinates for each of the classes in the space of normalized characteristics. Belonging diagnosed transformer to one of these classes was determined by the coordinates of its minimum deviation of the current characteristics of the coordinates of the centers of classes. Transformer belonging to a particular class of the proposed model characterizes its residual life, with an accuracy that depends on the characteristics of the measurement interval used to construct the model. This allows you to identify faults occurring at the initial stages.

The practical value of these results is that the developed software that implements the proposed method and solved the practical problem of diagnosing the state for paper-oil insulation measuring current transformers.

REFERENCES

1. П. М. Сви «Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения» – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 50 с.
2. Сахно А.А. Математическая модель прогноза остаточного ресурса трансформаторов тока 330-750 кВ с бумажно-масляной изоляцией конденсаторного типа / А.А Сахно // Вісник НТУ"ХПІ" – 2010. – №55. – С. 97-105.
3. Ding S. X. Model-based fault diagnosis techniques: design schemes, algorithms, and tools / S. X. Ding. – Berlin: Springer, 2008. – 473 p.
4. Интеллектуальные информационные технологии проектирования автоматизированных систем диагностирования и распознавания образов: монография / С. А. Субботин, Ан. А. Олейник, Е. А. Гофман, С. А. Зайцев, Ал. А. Олейник; под ред. С. А. Субботина. – Харьков: ООО «Компания Смит», 2012. – 317 с.
5. ASM handbook. – Vol. 17: Nondestructive evaluation and quality control. – Cleveland: ASM International, 1997. – 1607 p.
6. Intelligent fault diagnosis and prognosis for engineering systems / [G. Vachtsevanos, F. Lewis, M. Roemer et al.]. – New Jersey: John Wiley & Sons, 2006. – 434 p.
7. Боянич Б. Измерительные трансформаторы – диагностика как предпосылка надежной работы / Б. Боянич, М. Поляк // Электротехнический институт, Загреб. – 2007. – №1. – С. 26-37.
8. Transformers: Basics, Maintenance, and Diagnostics – Denver: Hydroelectric Research and Technical Services Group, 2005. – 256 p.
9. Kulkarni S.V. Transformer Engineering: Design, Technology, and Diagnostics, Second Edition / S.V. Kulkarni; S.A. Khaparde. : CRC Press, 2012. – 750 p.
10. Скрупская Л.С. Построение моделей диагностирования состояния бумажно-масляной изоляции измерительных трансформаторов тока / Л.С. Скрупская, А.А. Олейник, А.А. Сахно // Электротехника и электромеханика – 2014. – №2. С. 27–31.

**ВИЗНАЧЕННЯ КРИТИЧНИХ ЗНАЧЕНЬ КРИТЕРІЮ ТИПУ
КОЛМОГОРОВА-СМИРНОВА ДЛЯ ДЕЯКИХ ТИПІВ
РОЗПОДІЛУ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО**

Анотація. В статті розглядається питання про оцінювання критичних значень критерію типу Колмогорова-Смирнова методом Монте-Карло для випадку коли параметри моделі розподілу визначають шляхом мінімізації розрахункового значення цього критерію.

Ключові слова: ідентифікація, функція розподілу, критерій Колмогорова-Смирнова, метод Монте-Карло.

Постановка проблеми. На практиці часто виникає необхідність ідентифікації моделей розподілу. При цьому частіше ставлять завдання підібрати модель із заданого класу, яка б найкраще описувала наявні емпіричні дані. Ця процедура складається з трьох етапів [1,2]:

- 1) формування гіпотези про закон (модель) розподілу, що перевіряється;
- 2) оцінювання параметрів обраної моделі;
- 3) перевірка адекватності моделі за допомогою певних статистичних критеріїв.

На останньому етапі найчастіше використовують критерії типу Колмогорова-Смирнова, омега-квадрат, хі-квадрат та ін.

У [2] було показано, що модель розподілу можна ідентифікувати шляхом мінімізації розрахункового значення статистичного критерію згоди. Але існує проблема вибору критичних значень для прийняття чи відхилення гіпотези про адекватність моделі наявним даним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Х. Ліллієфорсом [3] було оцінено критичні значення критерію типу Колмогорова-Смирнова для випадку, коли параметри моделі нормального розподілу оцінюють як середнє арифметичне та стандартне відхилення досліджуваної вибірки. В його роботі було досліджено по 1000 або більше вибірок обсягом від 4 до 30 елементів. Пізніше ці результати

були уточнені П. Моліном та Г. Абді [4] за допомогою сучасних комп'ютерних технологій, що дало змогу збільшити кількість досліджених вибірок до 100000, а їх максимальний обсяг – до 50 елементів. В обох випадках використовувався метод статистичних випробувань Монте-Карло.

В [5] нами було доведено наявність кореляції та визначено рівняння зв'язку, що дає змогу встановити приблизну відповідність між критичними значеннями для випадку, коли ідентифікацію параметрів розподілу здійснюють шляхом мінімізації розрахункового значення критерію типу Колмогорова – Смирнова та відповідними значеннями критерію Ліллієфорса. В цій роботі розглядається інший підхід до визначення критичних значень критерію типу Колмогорова-Смирнова.

Постановка завдання. Методом Монте-Карло визначити критичні значення критерію типу Колмогорова-Смирнова для нормального, гамма, експоненціального розподілів, а також розподілу Вейбулла.

Виклад основного матеріалу дослідження. Серед непараметричних критеріїв перевірки відповідності емпіричних розподілів тим чи іншим теоретичним моделям $\{F(x; \Theta), \theta \in \Theta\}$ виокремлюють критерії типу Колмогорова-Смирнова [1]. Вони визначають ступінь відповідності за максимальним за абсолютною величиною відхиленням моделі від емпіричної функції розподілу. Тобто, для перевірки двосторонньої нульової гіпотези $H_0 : F_n(x) = F(x, \theta_0)$ розраховують максимальну відстань між емпіричною $F_n(x)$ і теоретичною $F(x)$ функціями розподілу: $D_n = \sup_{|x| < \infty} |F_n(x) - F(x, \theta_0)|$. Розрахункове значення критерію

Колмогорова – Смирнова визначають за формулою:

$$\lambda = \sqrt{n}D_n(\theta_0), \quad (1)$$

де n – обсяг вибірки.

Формулу (1) застосовують, якщо значення параметрів $\theta = \theta_0$ теоретичної функції розподілу відомі. Але на практиці зазвичай трапляється, що ці параметри невідомі досліднику. Тому необхідно використовувати вектор вибірових оцінок θ^* . Розрахункове значення критерію в цьому випадку визначають за формулою:

$$\lambda^* = \sqrt{n}D_n(\theta^*) \quad (2)$$

При цьому змінюються критичні значення критерію.

В результаті необхідно розв'язати одну з таких задач:

– оцінити відповідність моделі $F_n(x) = F(x, \theta)$ з відомими параметрами наявним емпіричним даним (критерій Колмогорова-Смирнова);

– оцінити відповідність наявним емпіричним даним моделі $F_n(x) = F(x, \theta^*)$ з параметрами, які визначено за вибірковими моментами (критерій Ліллієфорса);

– оцінити відповідність наявним емпіричним даним моделі $F_n(x) = F_{\min}(x, \theta^*)$ з параметрами, що визначають з умови мінімуму деякого показника якості моделі, наприклад розрахункового значення критерію типу Колмогорова-Смирнова. Задача такого типу розв'язується в цій роботі.

Методика дослідження аналогічна використаній в роботах [3, 4] і ґрунтувалась на методі Монте-Карло. Вона полягає у наступному. Генерується велика кількість вибірок із заданим законом розподілу. Для кожної вибірки визначаються вибіркові параметри (наприклад, для нормального розподілу – це вибіркові середнє і стандартне відхилення) та розрахункове значення D_n^* . Далі, використовуючи отримані вибіркові параметри як початкове наближення, уточнюємо параметри моделі шляхом мінімізації розрахункових значень D_n^* методом багатовимірної нелінійної оптимізації. Потім будуємо емпіричну функцію розподілу отриманих значень $D_n^*(\min)$. Квантили відповідних рівнів цієї функції розподілу складають таблицю шуканих значень статистики типу Колмогорова-Смирнова.

В проведеному дослідженні спочатку генерували по 10000 вибірок обсягом N від 6 до 45 елементів згідно зі стандартним нормальним $N(0,1)$, гамма $\Gamma(1,0.5)$, експоненціальним $Exp(0.8)$ розподілами та розподілом Вейбулла $W(1,2)$.

З квантилів функцій розподілу відповідних статистик $D_n^*(\min)$ склали таблиці. Зокрема, в таблиці 1 наведено значення 0,05-квантилів $D_n^*(\min)$ для досліджених моделей розподілу і різних обсягів вибірок. Також тут наведено для порівняння аналогічні значення для критеріїв Ліллієфорса $N_L(\mu, \sigma^2)$ [3] та Колмогорова – Смирнова $N_{K-S}(\mu, \sigma^2)$ [4].

0,05 квантилі розподілу $D_n^*(\min)$

Обсяг вибірки, N	Квантилі $D_n^*(\min)$				Квантилі D_n	
	$N(\mu, \sigma^2)$	$\Gamma(k, \theta)$	$Exp(\lambda)$	$W(k, \lambda)$	$N_L(\mu, \sigma^2)$	$N_{K-S}(\mu, \sigma^2)$
6	0,226	0,245	0,291	0,313	0,319	0,324
7	0,212	0,230	0,275	0,290	0,300	0,304
8	0,202	0,218	0,265	0,272	0,285	0,288
9	0,192	0,203	0,253	0,263	0,271	0,274
10	0,183	0,193	0,242	0,248	0,258	0,262
11	0,175	0,183	0,234	0,236	0,249	0,251
12	0,169	0,175	0,227	0,228	0,242	0,243
13	0,163	0,169	0,217	0,219	0,234	0,234
14	0,157	0,162	0,212	0,214	0,227	0,226
15	0,152	0,157	0,205	0,205	0,220	0,220
16	0,149	0,153	0,200	0,200	0,213	0,213
17	0,144	0,148	0,193	0,194	0,206	0,207
18	0,140	0,145	0,189	0,187	0,200	0,202
19	0,137	0,140	0,182	0,183	0,195	0,197
20	0,134	0,137	0,180	0,179	0,190	0,192
25	0,120	0,122	0,161	0,161	0,180	0,173
30	0,111	0,112	0,147	0,148	0,161	0,159
35	0,103	0,105	0,139	0,136	0,150	0,155
40	0,096	0,097	0,129	0,129	0,140	0,148
41	0,096	0,096	0,128	0,126	0,138	0,139
42	0,094	0,095	0,126	0,126	0,137	0,135
43	0,093	0,095	0,125	0,123	0,135	0,134
44	0,092	0,093	0,123	0,123	0,134	0,132
45	0,091	0,093	0,121	0,122	0,132	0,131

На рис. 1 наведено графіки залежності значень вказаних квантилів від обсягу вибірки для аналізованих розподілів.

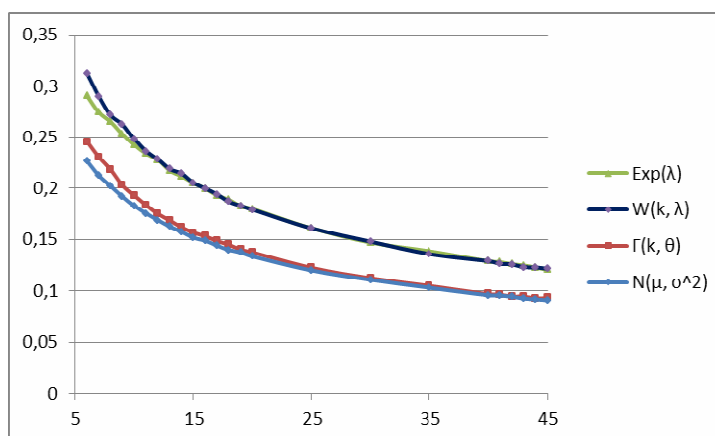


Рисунок 1 - Залежність 0,05 квантилів розподілу $D_n^*(\min)$ від обсягу вибірки

Для визначення граничних оцінок критичних значень критерію типу Колмогорова-Смирнова генерували по 10000 вибірок обсягом

1000 елементів і повторювали зазначену вище процедуру. Результати наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Квантили розподілу $D_n^*(min)$ для $n = 1000$

Довірчий рівень, p	Квантили $D_n^*(min)$				
	0,80	0,85	0,90	0,95	0,99
$N(\mu, \sigma^2)$	0,0171	0,0177	0,0184	0,0195	0,0216
$\Gamma(k, \theta)$	0,0170	0,0178	0,0187	0,0199	0,0227
$Exp(\lambda)$	0,0219	0,0227	0,0242	0,0259	0,0304
$W(k, \lambda)$	0,0222	0,0233	0,0245	0,0263	0,0297

Використовуючи формулу (2), отримали критичні значення λ_{min}^* критерію типу Колмогорова-Смирнова (табл. 3).

Таблиця 3

Критичні значення λ_{min}^* критерію типу Колмогорова-Смирнова

Довірчий рівень, p	Критичні значення λ_{min}^*				
	0,80	0,85	0,90	0,95	0,99
$N(\mu, \sigma^2)$	0,5418	0,5605	0,5845	0,6171	0,6845
$\Gamma(k, \theta)$	0,5407	0,5630	0,5930	0,6296	0,7180
$Exp(\lambda)$	0,6925	0,7178	0,7652	0,8190	0,9613
$W(k, \lambda)$	0,7022	0,7382	0,7735	0,8311	0,9379
$N_L(\mu, \sigma^2)$	0,736	0,768	0,805	0,886	1,031
$N_{K-S}(\mu, \sigma^2)$	0,775	0,819	0,895	0,955	1,035

Висновки з проведеного дослідження. Показано можливість та оцінено методом Монте-Карло критичні значення критерію згоди типу Колмогорова – Смирнова для деяких типів розподілу у випадку, коли параметри моделі розподілу уточнюються шляхом мінімізації розрахункового значення цього критерію. У подальшому передбачається уточнити довірчі інтервали для отриманих оцінок і перевірити їх можливу залежність від інших факторів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бахрушин В.Є. Методи аналізу даних / В.Є. Бахрушин.– Запоріжжя:КПУ, 2011.–268 с.
2. Бахрушин В.Є. Проблемы идентификации моделей распределения случайных величин с применением современного программного обеспечения / В.Є. Бахрушин // Успехи современного естествознания. – 2011. – № 11. – С. 50 – 54.
3. Lilliefors H. On the Kolmogorov–Smirnov test for normality with mean and variance unknown. Journal of the ASA, Vol. 62, No. 318 (Jun., 1967), 399-402.
4. Molin, P., Abdi H. (1998). New Tables and numerical approximation for the Kolmogorov- Smirnov/Lilliefors/Van Soest test of normality. Technical Report, University of Bourgogne (France) / University of Texas at Dallas (USA).
5. Бахрушин В.Є. Уточнення моделей нормального розподілу на основі мінімізації критерію Колмогорова – Смирнова / В.Є. Бахрушин, І.О. Дудко // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 5 (82). – Дніпропетровськ, 2012. – С. 95 –103.

В. Ермакова, Т.В. Селиверстова

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ С ПОМОЩЬЮ ОЦЕНКИ JARO

Аннотация. Рассмотрены основные фонетические алгоритмы и их эффективность при варьировании входных параметров. Разработана программа, реализующая алгоритмы Soundex, Daitch-Mokotoff Soundex, MetaPhoneRU и анализирующая схожесть результатов с помощью метрик похожести.

Ключевые слова: ФОНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ, НЕЧЕТКИЙ ПОИСК

Постановка проблемы. Поиск и извлечение информации из современных мощных баз данных может усложняться по причинам, связанным с неточностью строки запроса. При работе с фамилиями можно выделить три основные причины, по которым возникает данная проблема: ошибки при печати (в базе данных или же в строке поиска), неточности транслитерации и отсутствие четкого представления о написании фамилии.

Для решения этой проблемы используют нечеткий поиск. Он охватывает множество областей, таких как: проверка орфографии, поиск в глобальных поисковиках, сжатие данных, распознавание речи, криптография. Нечеткий поиск в контексте фонетических алгоритмов дает такие возможности, как: поиск слова по звучанию, поиск подобных по написанию слов, поиск слов с опечатками, поиск в транслитерованных словах. Важная часть поиска по словам – поиск по фамилиям. Практическая ценность решения этой задачи в наше время высока, так как существует повсеместное использование баз данных. Поэтому актуальной является практическая задача поиска по фамилии, при отсутствии уверенности в правильности ее написания.

Постановка задачи. Целью работы является исследования результатов работы основных алгоритмов фонетического поиска: Soundex, Daitch-Mokotoff Soundex, MetaPhone, путем вычисления метрики Jaro.

Изложение основных материалов исследования. Существует несколько основных фонетических алгоритмов: Soundex, Daitch-Mokotoff Soundex, MetaPhone, MetaPhoneRU, Caverphone, NYSIIS. Алгоритм Soundex наиболее универсален, однако, даёт наибольшее число совпадений при сомнительной фонетической схожести. Алгоритм Caverphone был разработан с уклоном в новозеландские фамилии. Алгоритм NYSIIS – для жителей Нью-Йорка [1].

Для работы со славянскими фамилиями наиболее целесообразно использовать следующие три алгоритма: Soundex (универсален и прост в исполнении), Daitch-Mokotoff Soundex (адаптирован авторами для русских фамилий) и MetaPhoneRU – доработанный Soundex Петром Каньковски для русского языка [2].

Рассмотрим выбранные алгоритмы более детально.

Порядок действий в Soundex:

1. Преобразуем фамилию в верхний регистр
2. Запоминаем первую букву, удаляем ее из рабочей строки
3. Заменяем оставшуюся строку по таблице 1.
4. Прибавляем букву

Таблица 1

Преобразования букв по алгоритму Soundex

Исходные символы	Конечный символ
А Е Ё И О У Х Ъ Ы Ь Э Ю Я	
Б П	1
Г Ж Й	4
Д Т	6
В Ф	2
З	5
Л	7
М Н	8
Р	9
К С Ц	3
Щ Ш Щ	@

Порядок действий в MetaPhoneRU:

1. Преобразуем фамилию в верхний регистр
2. Заменяем латинские буквы схожего написания на русские

(например, H/eitʃ/ на H /эн/)

3. Преобразуем фамилию в нижний регистр
4. Буквосочетания «тс» и «дс» заменяем на «ц».
5. Происходит замена окончаний по таблице 2.

Таблица 2

Замена окончаний

Исходные окончания	Конечный символ
-УК, -ЮК	0
-ИНА	1
-ИК, -ЕК	2
-НКО	3
-ОВ, -ЕВ, [-ИЕВ, -ЕЕВ]	4
-ЫХ, -ИХ	5
-АЯ	6
-ИЙ, -ЫЙ	7
-ИН	8
-ОВА, -ЕВА, [-ИЕВА, -ЕЕВА]	9
-ОВСКИЙ	@
-ЕВСКИЙ	#
-ОВСКАЯ	\$
-ЕВСКАЯ	%

6. Удаляем повторы (например, «нн» превращается в «н»).
7. Оглушаем согласные в слабой позиции (табл. 3)

Таблица 3

Замена согласных

Исходные символы	Конечный символ
П, Б	П
С, З	С
Т, Д	Т
Ф, В	Ф
К, Г	К

8. Удаляем повторы
9. Замена гласных по таблице 4

Замена гласных

Исходные символы	Конечный символ
О, Ы, А, Я	А
Ю, У	У
Е, Ё, Э, И	И

10. Удаление «Ь», «Ъ», «-».

Порядок действий в Daitch-MokotoffSoundex:

1. Слово транслитерируется
2. Буквы заменяются согласно таблице

Таблица 5

Преобразования букв по алгоритму Daitch-MokotoffSoundex

Исходные буквосочетания	В начале	За гласной	Остальное
AI, AJ, AY, EI, EY, EJ, OI, OJ, OY, UI, UJ, UY	0	1	
AU	0	7	
1	2	3	4
1	2	3	4
IA, IE, IO, IU	1		
EU	1	1	
A, UE, E, I, O, U, Y	0		
J	1	1	1
SCHTSCH, SHTSH, SHTCH, SHTCH, SHCH, SHTSH, STCH, STSCH, STRZ, STRS, STSH, SZCZ, SZCS	2	4	4
SHT, SHT, SHT, ST, SZT, SHD, SZD, SD	2	\$	\$
CSZ, CZS, CS, CZ, DRZ, DRS, DSH, DS, DZH, DZS, DZ, TRZ, TRS, TRCH, TSH, TTSZ, TTZ, TZS, TSZ, SZ, TTCH, TCH, TTCH, ZSCH, ZHSH, SCH, SH, TTS, TC, TS, TZ,	4	4	4

ZH, ZS			
SC	2	4	4
DT, D, TH, T	3	3	3
CHS, KS, X	5	%	%
S, Z	4	4	4
CH, CK, C, G, KH, K, Q	5	5	5
MN, NM		^	^
M, N	6	6	6
FB, B, PH, PF, F, P, V, W	7	7	7
H	5	5	
L	8	8	8
R	9	9	9

В процессе исследования был реализован программный продукт «PhSA – PhoneticSearchAlgorithms», автоматизирующий действия по сравнению строк и систематизированию результатов. Для создания программного продукта был использован язык C# и база данных AccessDB. В его состав входит главная («PhSA») и вспомогательная программа («PhSAHelper»). Задача главной программы – производить поиск в базе данных, ранее сформированной вспомогательной программой. Вспомогательная программа снабжена функциями: добавления ключей для быстрого поиска по каждому алгоритму, удаления случайных символов и пробелов перед записью, работы с двойными фамилиями. Таким образом, при использовании вспомогательной программы «PhSAHelper» создаётся новая база данных, содержащая исходный столбец с фамилиями и еще 3 столбца с ключами, соответствующими каждому алгоритму.

Тестирование работы фонетических алгоритмов обработки славянских фамилий производилось на данных телефонной книги Днепропетровской области.

Для исследования фонетических алгоритмов с помощью программного продукта «PhSA» необходимо ввести фамилию в строку поиска, после чего выбрать режим поиска по базе ключей (в противном случае, генерация ключа будет происходить «на лету»), и, непосредственно, сам алгоритм. После нажатия на кнопку «Искать!» отображаются результаты поиска (рис. 1). Разработанный программный

продукт «PhSA» содержит справочную информацию об используемых алгоритмах (рис. 2).

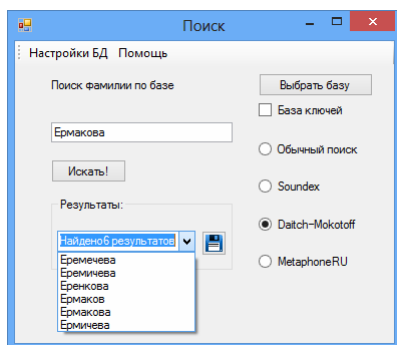


Рисунок 1 – Интерфейс «PhSA», с результатами поиска

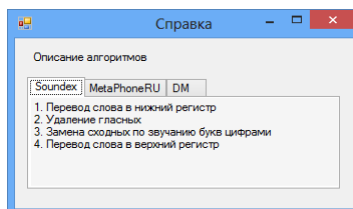


Рисунок 2 – Интерфейс «PhSA», справочная информация

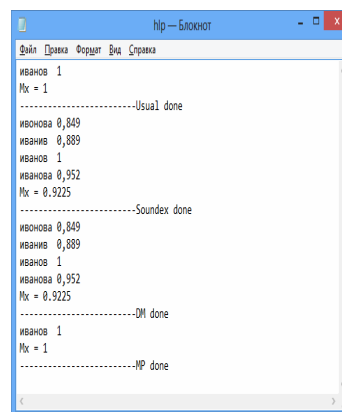


Рисунок 3 – Текстовый документ, созданный в результате поиска

Программный продукт «PhSA» предоставляет возможность сохранения результатов поиска, оценки Jaro[4] и математического ожидания оценки Jaro в файл, формат записи в который приведен на рис. 3.

С целью исследования работы фонетических алгоритмов было проведено их тестирование на двух группах фамилий (таблица 1). Группа 1 – содержит фамилии из списка «25 общерусских фамилий» [3], группа 2 – редкие, либо принадлежащие другим этническим группам.

Результаты приведенные в таблице 6 подтверждают эффективность работы алгоритмов Soundex и Daitch-Mokotoff Soundex для пространственных славянских фамилий. Так же из данных приведенных в таблице 1 следует, что алгоритм MetaPhoneRU «склонен» отыскивать точные совпадения и предоставляет меньшее количество подобных, с точки зрения алгоритма, фамилий. Так же проводилось исследование работы фонетических алгоритмов на фамилиях из славянской группы разной длины (таблица 7). Данные приведенные в таблице 2 демонстрируют различия работы алгоритмов при различной длине запроса и позволяют сделать вывод о том, что ключ для длинных фамилий оказывается «уникальным», т.е. ему находится меньшее количество соответствий в базе по сравнению с более короткими строками запроса.

Таблица 6

Результат работы фонетических алгоритмов для фамилий различных этнических групп (N– количество фамилий соответствующих ключу, сформированному каждым из алгоритмов; J– математическое ожидание оценки Jaro)

Группа фамилий	Запрос	Алгоритм					
		Soundex		Daitch-Mokotoff Soundex		MetaPhoneRU	
		N	J	N	J	N	J
1	Иванов	4	0,922	4	0,922	1	1
	Васильев	16	0,632	12	0,679	2	0,956
	Петров	10	0,735	10	0,735	1	1
	Смирнов	3	0,917	3	0,917	1	1
2	Ояпер	4	0,561	5	0,544	1	1
	Мороз	5	0,698	9	0,590	1	1
	Мухомор	2	0,603	2	0,603	1	1
	Сорока	14	0,575	18	0,554	1	1

Таблица 7

Результат работы фонетических алгоритмов для фамилий разной длины

Длина фамилии	Запрос	Алгоритм					
		Soundex		Daitch-Mokotoff Soundex		MetaPhoneRU	
		N	J	N	J	N	J
до 3-х букв	Дуб	5	0,817	19	0,570	1	1
	Сом	23	0,366	47	0,318	1	1
	Чиж	5	0,565	12	0,429	1	1
до 9-ти букв	Ермакова	4	0,924	7	0,776	1	1
	Васильев	16	0,632	12	0,679	2	0,956
	Смирнов	3	0,917	3	0,917	1	1
больше 9-ти букв	Воскобойникова	2	0,988	2	0,988	1	1
	Константинопольский	1	1	1	1	1	1
	Космодемьянская	1	1	1	1	1	1

Выводы

1. Для исследования работы фонетических алгоритмов Soundex, Daitch-Mokotoff Soundex, MetaPhone был разработан программный продукт «PhSA – PhoneticSearchAlgorithms», автоматизирующий действия по сравнению строк и систематизированию результатов.

2. Исследование работы фонетических алгоритмов на фамилиях различных этнических групп и славянских фамилиях различной длины показали, что алгоритмы Soundex и Daitch-Mokotoff Soundex дают схожие результаты, при высокой вычислительной затратности алгоритма Daitch-Mokotoff Soundex по сравнению с Soundex, а алгоритм MetaPhoneRU генерирует такой ключ, на который, чаще всего, приходится один вариант результата поиска, и, как следствие, имеет высокую оценку Jaro.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фонетические алгоритмы // habrhabr.ru ежедн. интернет-изд. 2011. 4 марта. URL: <http://habrhabr.ru/post/114947/>
2. Каньковски П. «Как ваша фамилия», или Русский MetaPhone // Программист. 2002. №8. С. 36-39.
3. Балановская Е. В., Соловьева Д. С., Балановский О. П. и др. «Фамильные портреты» пяти русских регионов // Медицинская генетика. 2005. № 1. С. 2-10
4. Ecole Polytechnique de Louvain, Universit'ecatholique de Louvain, Belgium «Mahalanobis distance, Jaro-Winkler distance and nDollar in UsiGesture» URL: http://www.vinc.be/www-pdf/10-11_SINF2356-Mahalanobis-JaroWinckler-nDollar.pdf

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИОННОЙ СЛОЖНОСТИ ХАОТИЧЕСКИХ И СТОХАСТИЧЕСКИХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

Аннотация. В работе проведен сравнительный рекуррентный и энтропийный анализ реализаций хаотических и стохастических процессов, обладающих различной корреляционной структурой. Получены зависимости мер информационной сложности временных рядов от параметров процессов. Исследованы временные ряды, соответствующие различным сложным динамическим системам.

Ключевые слова: временной ряд, мера сложности, энтропия подобия, рекуррентная диаграмма, псевдофазовое пространство, размерность вложения.

Введение и цель

Математическими моделями сложных систем, проявляющих нерегулярную динамику, являются как случайные, так и детерминированные хаотические процессы. Одной из целей анализа временных рядов является извлечение информации из реализации конечной длины и получение вывода о свойствах и механизме процесса, который генерирует ряд.

Существует множество подходов к исследованию временных рядов, базирующихся как на традиционном статистическом анализе, так и на методах нелинейной хаотической динамики. Большинство методов хаотической динамики, основаны на построении псевдофазового пространства по одной реализации процесса с помощью процедуры Паккарда-Такенса [1,2]. Построение псевдофазового пространства позволяет вычислять размерность вложения, что является основным инструментом различения хаотических и случайных процессов [1-3]. Такой подход позволяет хорошо различать хаотическую динамику и некоррелированный случайный шум, однако, он плохо работает для реализаций фрактальных случайных процессов, обладающих долгосрочной зависимостью [4-6].

В настоящее время основными характеристиками сложности динамики систем можно считать различные типы энтропии и меры сложности рекуррентных диаграмм [7]. Рекуррентный анализ базируется на фундаментальном свойстве диссипативных динамических систем – рекуррентности (повторяемости состояний). Данный метод анализа, основанный на представлении свойств процессов в виде геометрических структур, является инструментом для обнаружения скрытых зависимостей в наблюдаемых ВР [7-9]. Количественными мерами сложности рекуррентных диаграмм являются меры детерминизма, рекуррентности, ламинарности, тренда и т.д. [9,10]. Характеристикой сложности поведения системы традиционно является энтропия. Существует разные типы энтропии: энтропия подобия, энтропия шаблонов, многомасштабная энтропия, вейвлет-энтропия и др. Расчет энтропии и построение рекуррентных диаграмм основаны на методах нелинейной динамики, в частности, процедуре Паккарда-Такенса, позволяющей восстановить фазовую траекторию системы по одной реализации [4,7-9].

Целью представленной работы является проведение сравнительного рекуррентного и энтропийного анализа детерминированных хаотических и случайных самоподобных реализаций для определения механизма процесса, который генерирует исследуемый ряд.

Методы исследования

Построение псевдофазового пространства [1,2]. Главная идея применения методов нелинейной динамики к анализу траектории динамической системы состоит в том, что основная структура, содержащая в себе всю информацию о системе, а именно, аттрактор системы, может быть восстановлена через измерение только одной компоненты этой системы. Широко используемая процедура Паккарда-Такенса позволяет восстановить фазовую траекторию динамической системы по одной реализации:

$$F(t) = [x(t), x(t + \tau), \dots, x(t + m\tau)], \quad (1)$$

где: $F(t)$ – m -мерное псевдофазовое пространство, $x(t)$ – временная реализация системы, τ – период запаздывания.

Построение рекуррентной диаграммы [7-10]. Рекуррентная диаграмма является проекцией m - мерного псевдофазового пространства на плоскость. Пусть точка x_i соответствует точке фазовой траектории $x(t)$, описывающей динамическую систему в m -мерном про-

странстве в момент времени $t=i$, для $i = 1, \dots, N$, тогда рекуррентная диаграмма RP есть массив точек, где ненулевой элемент с координатами (i, j) соответствует случаю, когда расстояние между x_j и x_i меньше ε :

$$RP_{i,j} = \Theta(\varepsilon - \|x_i - x_j\|), \quad x_i, x_j \in R^m, \quad i, j = 1, \dots, N, \quad (2)$$

где ε – размер окрестности точки x_i , $\|x_i - x_j\|$ – расстояние между точками, $\Theta(\cdot)$ – функция Хэвисайда.

Анализ топологии диаграммы позволяет классифицировать наблюдаемые процессы: определять однородные процессы с независимыми случайными значениями; процессы с медленно меняющимися параметрами; периодические или осциллирующие процессы, соответствующие нелинейным системам и т.д. Численный анализ рекуррентных диаграмм позволяет вычислять меры сложности структур рекуррентных диаграмм, такие как мера рекуррентности, мера детерминизма, мера энтропии и др. Мера рекуррентности RR показывает плотность рекуррентных точек: $RR = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j} RP_{i,j}$. Мера детерминизма Det

является характеристикой предсказуемости поведения процесса и равна отношению числа рекуррентных точек, составляющих диагональные линии, к общему количеству рекуррентных точек:

$$Det = \frac{\sum_{l=l_{\min}}^N P(l)}{\sum_{i,j} RP_{i,j}}, \quad \text{где: } l_i - \text{длина } i\text{-й диагональной линии,}$$

$P(l) = \{l_i, i = 1, \dots, N_l\}$ – частотное распределение длин диагональных линий в диаграмме, N_l – количество диагональных линий.

Вычисление энтропии подобия [4,7,11]. Энтропия подобия $ApEn$ является статистикой регулярности временного ряда, что определяет возможность его предсказания. Рассмотрим временной ряд $\{x_i\}, i = 1, \dots, N$. Пусть вектор $P_m(i)$ – подпоследовательность значений ряда $\{x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+m}\}$ длиной m . Два вектора $P_m(i)$ и $P_m(j)$ будут подобными, если выполняется $|x_{i+k} - x_{j+k}| < \varepsilon, 0 \leq k < m$.

Для каждого значения $i = 1, \dots, N - m + 1$ вычисляется величина

$$C_{im}(\varepsilon) = \frac{n_{im}(\varepsilon)}{N - m + 1} f, \quad \text{где: } n_{im}(\varepsilon) - \text{число векторов, подобных вектору } P_m(i).$$

Энтропия подобия $ApEn$ определяется по формуле

$$ApEn(m, \varepsilon) = \ln \frac{C_m(\varepsilon)}{C_{m+1}(\varepsilon)}, \quad C_m(\varepsilon) = \frac{1}{N-m+1} \sum_{i=1}^{N-m+1} C_{im}(\varepsilon) \quad (3)$$

Модельные данные

Хаотические реализации [1,2]. Хаос представляет собой сложную форму поведения детерминированной системы в установившемся режиме. Основным свойством таких систем является чувствительная зависимость режима функционирования к сколь угодно малым изменениям начальных условий. Если d_0 – мера начального расстояния между двумя точками, то спустя малое время t расстояние между траекториями, выходящими из этих точек, становится равным $d(t) = d_0 e^{\lambda t}$, где величина λ является показателем Ляпунова. Это обстоятельство ведет к потере детерминированной предсказуемости и хаотическому поведению. Одними из самых простых и наглядных математических моделей, демонстрирующих хаотическое поведение, являются итерируемые отображения вида $x_{n+1} = f(C, x_n)$, где C – управляющий параметр.

Для широкого класса нелинейных функций f последовательность значений $\{x_n\}_{n=0}^{\infty}$ является хаотической. Наиболее известным примером хаотических отображений является логистическое отображение. Это одномерное квадратичное отображение, определяемое следующим образом:

$$x_{n+1} = Ax_n(1 - x_n), \quad (4)$$

где A – управляющий параметр, $A \in (0, 4]$, а значения $x_n \in [0, 1]$.

Реализации процесса авторегрессии [3]. В качестве случайных процессов с краткосрочной зависимостью в работе выбраны процессы авторегрессии 1-го порядка:

$$X(t) = \phi X(t-1) + \varepsilon(t), \quad (5)$$

где $\varepsilon(t)$ – некоррелированный белый шум, ϕ – коэффициент авторегрессии, $|\phi| < 1$. Значение коэффициента авторегрессии ϕ определяет степень автокорреляционной зависимости процесса.

Стохастические самоподобные реализации [3,12]. Стохастический процесс $X(t)$ является самоподобным с параметром самоподобия H , если процесс $a^{-H} X(at)$ описывается теми же конечномерными законами распределений, что и $X(t)$. Одной из наиболее известных и

простых моделей стохастической динамики, обладающих фрактальными свойствами, является фрактальное броуновское движение (ФБД).

ФБД с параметром $H=0.5$ совпадает с классическим броуновским движением. Параметр H , называемый показателем Херста, представляет собой степень самоподобия процесса. Наряду с этим свойством, показатель H характеризует меру долгосрочной зависимости стохастического процесса, т.е. убывание корреляционной функции процесса по степенному закону.

Результаты исследования

Проведенный в работе рекуррентный анализ выявил сильные различия, как в визуальной топологии, так и в численных характеристиках реализаций вышеописанных процессов. Рассмотрим пример абсолютно различных по сложности процессов: периодического движения и некоррелированного белого шума. Очевидно, что характеристики вышеописанных хаотических и случайных процессов должны находиться внутри диапазона значений характеристик, рассчитанных для периодических и полностью случайных траекторий. В таблице 1 приведены значения меры рекуррентности RR , меры детерминизма Det и энтропии подобия $ApEn$, рассчитанные для реализаций длиной 1000 значений.

Таблица 1

Числовые характеристики сложности синусоиды и шума

	RR	Det	$ApEn$
Синусоида	0.18	0.998	0.03
Некоррелированный шум	0.0003	0.025	1.7

В таблице 2 приведены средние значения мер рекуррентности, детерминизма и энтропии подобия для реализаций отображения (4) при значениях управляющего параметра $A=3.7, 3.9, 4$ (соответствующие значения показателя Ляпунова равны $\lambda=0.37, 0.5, 0.69$); для реализаций авторегрессии (5) при значениях коэффициента $\phi=0.3, 0.6, 0.9$; для реализаций ФБД при значениях параметра Херста $H=0.3, 0.6, 0.9$. Больше значение показателя Ляпунова соответствует большей хаотичности системы. В каждом случае величины RR и Det , как меры регулярности, уменьшаются, а величина энтропии

увеличивается с ростом хаотичности или некоррелированности процесса.

Таблица 2

Числовые характеристики сложности реализаций

Логистическое отображение				Процесс авторегрессии				Фрактальное броуновское движение			
<i>A</i>	<i>RR</i>	<i>Det</i>	<i>ApEn</i>	ϕ	<i>RR</i>	<i>Det</i>	<i>ApEn</i>	<i>H</i>	<i>RR</i>	<i>Det</i>	<i>ApEn</i>
3.7	0.008	0.1	0.93	0.3	0.0003	0.03	1.72	0.3	0.02	0.55	0.47
3.9	0.004	0.07	1.2	0.6	0.0005	0.05	1.65	0.6	0.02	0.87	0.21
4	0.002	0.05	0.86	0.9	0.002	0.13	1.25	0.9	0.01	0.95	0.12

В работе рассмотрены временные ряды, соответствующие различным сложным динамическим системам. В частности, проведен анализ рядов, построенных по RR-интервалам. RR-интервал представляет собой промежуток времени между соседними зубцами электрокардиограммы и равен продолжительности сердечного цикла. В качестве примера финансового временного ряда рассмотрена динамика изменения индекса S&P500 за 2004-2008 гг. Количественные рекуррентные и энтропийные характеристики, полученные по данным временным рядам, представлены в табл.3.

Таблица 3

Числовые характеристики сложности рядов

	<i>RR</i>	<i>Det</i>	<i>ApEn</i>
RR-интервалы	0.18	0.84	1.87
S&P 500	0.06	0.91	2.1

На основании результатов анализа можно предложить для моделирования реализаций RR-интервалов детерминированные хаотические системы, тогда как математическое моделирование ряда S&P 500 должно базироваться на самоподобных стохастических процессах. Для адекватного выбора модели в первом случае необходим расчет таких характеристик, как показатель Ляпунова, инвариантная мера распределения и др., а во втором – расчет фрактальных характеристик.

Выводы

В работе проведен сравнительный рекуррентный и энтропийный анализ реализаций хаотических и стохастических процессов, обладающих различной корреляционной структурой: некоррелированных шумов, процессов авторегрессии с краткосрочной зависимостью и фрактальных процессов с долгосрочной памятью. Получены зависимости мер информационной сложности временных рядов, таких как мера рекуррентности, мера детерминизма, энтропия подобия от параметров процессов: бифуркационного параметра, показателя Херста, коэффициента авторегрессии. В работе рассмотрены временные ряды RR-интервалов и индекса S&P500, На основании результатов анализа предложены математические модели, учитывающие корреляционную и рекуррентную структуру временного ряда.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мун Ф. Хаотические колебания / Ф. Мун. – М.: Мир, 1990. – 304 с..
2. Шустер Г. Детерминированный хаос: Введение / Г. Шустер. – М.: Мир, 1988. – 240 с
3. Ширяев А. Н. Основы стохастической финансовой математики / А. Н. Ширяев. – М.: Фазис, 1998. – Т. 1: Факты. Модели. – 512 с.
4. Pincus S.M. „Approximate entropy as a measure of system complexity” / S.M. Pincus. Proc. // Natl. Acad. Sci. Vol.88, pp. 2297-2301
5. Dabi-Prashad O. Investigation of Time Series of Original Values of Currency Rates Measured on Small Time Frames on FOREX Using Methods of Chaos Theory / O. Dabi-Prashad, L. Kirichenko // Radioelectronics & Informatics. – 2009. – №4. – P. 18–24.
6. Кириченко Л.О., Кобицкая Ю.А., Хабачева А.Ю. Сравнительный рекуррентный анализ хаотических и случайных процессов / Л.О. Кириченко, Ю.А. Кобицкая, А.Ю. Хабачева // Physical and technological problems of radio engineering devices, telecommunication, nano- and microelectronics Proceeding of the III International Scientific-Practical Conference October 24–26, 2013 Chernivtsi, Ukraine.
7. Дербенцев В.Д., Сердюк О.А., Соловйов В.М., Шарапов О.Д. Синергетичні та економічні методи дослідження динамічних та структурних характеристик економічних систем / В.Д. Дербенцев, О.А. Сердюк, В.М. Соловйов, О.Д. Шарапов // Монографія. – Черкаси: Брама-Україна, 2010. – 287 с.
8. Eckmann J.P. Recurrence Plots of Dynamical Systems / J.P. Eckmann, S.O. Kamphorst, D. Ruelle // Europhysics Letters 5. – 1987. – P. 973-977.
9. Marwan N. Recurrence-plots-based measures of complexity and application to heart-rate-variability data / N. Marwan, N. Wessel, U. Meyerfeldt, A. Schirdewan, J.Kurths // Physical Review, E66,– 2002.
10. Zbilut J.P., Zaldívar-Comenges J.-M., Stozzi F. Recurrence quantification based Liapunov exponent for monitoring divergence in experimental data // Phys. Lett. A, V. 297, 2002. – pp. 173-181.
11. Joshua S., Richman J., Moorman R. Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy // Am. J Physiol. Heart Circ. Physiol. 278: H2039-H2049, 2000
12. Федер Е. Фракталы / Е. Федер. – М.: Мир, 1991. – 254 с.

Р. В. Кирия, Т. Ф. Мищенко, Ю. В. Бабенко
**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
СИСТЕМ КОНВЕЙЕРНОГО ТРАНСПОРТА
УГОЛЬНЫХ ШАХТ**

Аннотация. На основании метода динамики средних для марковских процессов разработана математическая модель функционирования систем конвейерного транспорта с последовательным и параллельным соединением конвейеров и бункеров, а также с древовидной веерной и самоподобной структурами. В результате для этих систем конвейерного транспорта получен рекуррентный алгоритм определения их пропускной способности при различных соотношениях поступающих из лав грузопотоков и производительностей питателей. Получены оценки минимальных и максимальных значений пропускной способности рассмотренных систем конвейерного транспорта, приведен пример расчета.

Ключевые слова: системы конвейерного транспорта, бункер, марковская модель, функционирование, пропускная способность, самоподобная структура.

Системы конвейерного транспорта угольных шахт имеют сложную разветвленную структуру, состоящую из конвейеров и бункеров, связанных между собой с помощью питателей, перегружателей и перегрузочных узлов. Отказы конвейеров часто приводят к простоям лав и, как следствие, к снижению производительности системы конвейерного транспорта.

Для повышения пропускной способности систем подземного конвейерного транспорта угольных шахт из-за ограниченности пространства широкое применение получили аккумулирующие бункеры (временное резервирование) [1, 2]. Однако эффективное применение аккумулирующих бункеров ограничивается отсутствием математического и программного обеспечения, позволяющего оптимизировать процессы функционирования систем конвейерного транспорта.

В настоящее время разработаны математические модели функционирования систем конвейерного транспорта без бункеров, применяемым, в основном, на открытых разработках полезного ископаемого [3, 4].

Вопросами моделирования функционирования систем конвейерного транспорта с бункерами занимались многие исследователи [1, 5–7].

При этом полученные математические модели функционирования системы конвейерного транспорта, в основном, касались системы с простой структурой «конвейер – бункер – конвейер».

Для систем конвейерного транспорта с более сложной структурой были получены имитационные модели. В работе [8] получены математические модели надежности сложных многофункциональных автоматических систем с бункерами, которые непосредственно невозможно использовать для определения пропускной способности разветвленной системы конвейерного транспорта с бункерами.

В статье разработаны математические модели функционирования систем подземного конвейерного транспорта с последовательным и параллельным соединением бункеров, а также самоподобной древовидной структуры.

В основе математической модели положен метод динамики средних для марковских процессов [9], в которой элементарная система «конвейер – бункер – конвейер» заменяется элементом (конвейером) с эквивалентными параметрами потоков отказов и восстановлений.

Анализ систем конвейерного транспорта угольных шахт показал, что в основном они имеют самоподобную древовидную структуру. Другими словами, структурную схему конвейерного транспорта можно разбить на иерархические уровни. При этом каждый уровень повторяет один и тот же граф. Такие геометрические структуры, согласно [10], называются древовидными фракталами.

На рис. 1 показаны типичные схемы подземного конвейерного транспорта угольных шахт с последовательным и параллельным соединением бункеров, а также системы конвейерного транспорта с бункерами древовидной структуры.

Древовидную структуру подземного конвейерного транспорта угольных шахт можно объяснить цикличностью технологии добычи угля: проходка – добыча – проходка. В результате каждый новый участок конвейерного транспорта подсоединяется к уже существующей системе, образованной в результате множества циклов добычи угля. Этот процесс можно сравнить с процессом роста дерева, где циклом является весна – лето – осень.

Поэтому математическое моделирование будет касаться именно таких типов систем конвейерного транспорта.

Как было показано в работах [3, 11], одним из основных показателей функционирования систем конвейерного транспорта являются средние значения пропускной способности m_c , определяемые по формуле

$$m_c = \sum_{i=0}^s P_i Q_i, \quad (1)$$

где P_i – вероятность того, что система конвейерного транспорта находится в i -ом состоянии; Q_i – производительность системы конвейерного транспорта, находящейся в i -ом состоянии; s – количество возможных состояний системы конвейерного транспорта при остановках или отказах конвейеров.

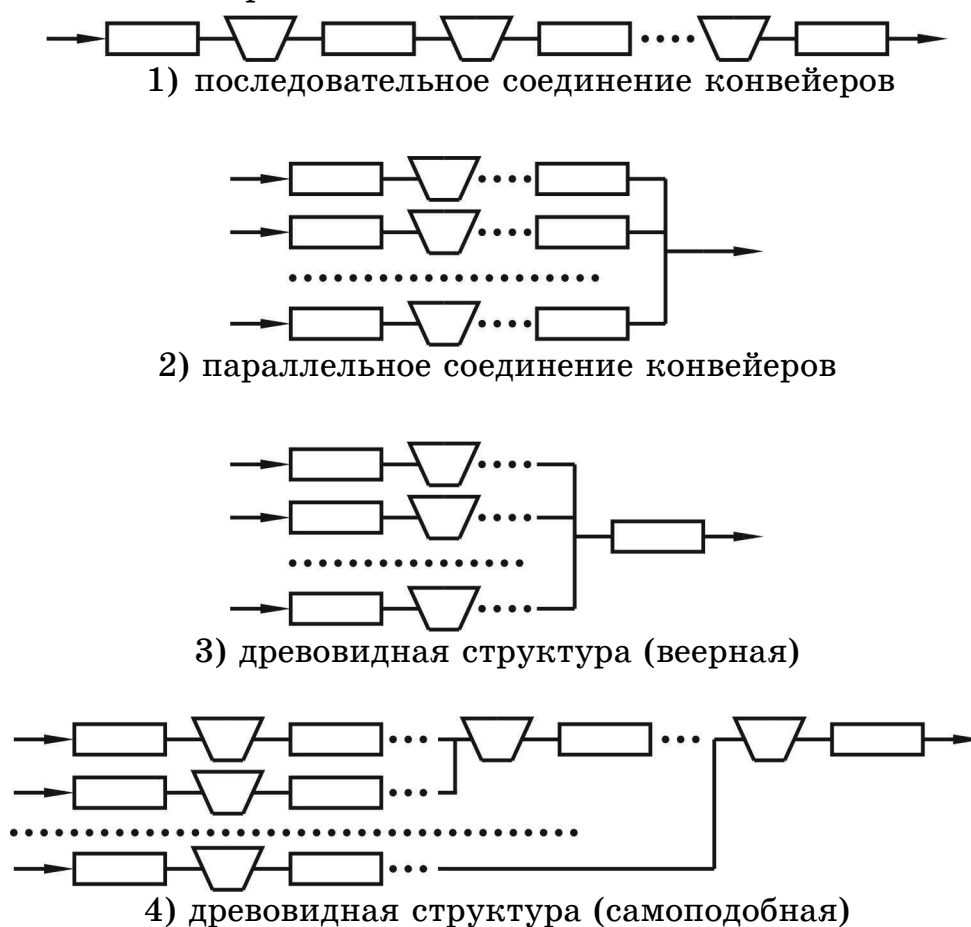


Рисунок 1 - Структурные схемы подземного конвейерного транспорта угольных шахт с бункерами

Как видно из формулы (1), для определения значения m_c необходимо знать структуру системы конвейерного транспорта, из которой определяется количество возможных состояний системы s и веро-

ятности P_i нахождения системы транспорта в каждом i -ом состоянии ($i = 1, s$).

Рассмотрим сначала последовательное соединение бункеров (рис. 2).

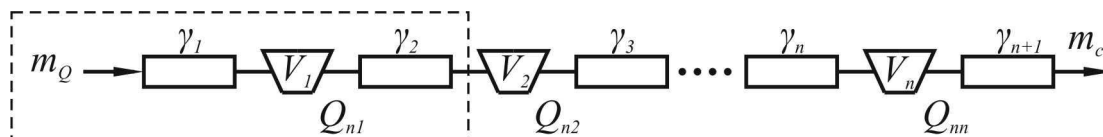


Рисунок 2 - Расчетная схема последовательного соединения бункеров

Для получения математических моделей функционирования систем конвейерного транспорта с бункерами воспользуемся свойством самоподобия структуры последовательного соединения бункеров.

Выделим в этой схеме с левого края простейшую систему «конвейер – бункер – конвейер», обведенную пунктирной линией (рис. 2).

Согласно работе [12], среднюю пропускную способность этой простейшей системы можно определить по формуле:

при $m_Q > Q_{n1}$

$$m_{c1} = \frac{\left[\frac{e^{A_{11}\gamma V_1}}{\gamma_1} + \frac{\bar{m}_{Q_1}}{(\bar{m}_{Q_1} - Q_{n1})} (e^{A_{11}\gamma V_1} - 1) \right]}{\left[1 + \frac{e^{A_{11}\gamma V_1}}{\gamma_1} + \frac{\bar{m}_{Q_1}}{(\bar{m}_{Q_1} - Q_{n1})} (e^{A_{11}\gamma V_1} - 1) \right]} \bar{Q}_{n1}, \quad (2)$$

где m_Q – производительность надбункерного конвейера; Q_{n1} – производительность питателя; V_1 – объем питателя; γ – удельный вес груза;

$$A_{11} = \frac{\mu_1 [m_Q - (1 + \gamma_1) \bar{Q}_{n1}]}{(m_Q - \bar{Q}_{n1}) \bar{Q}_{n1}}; \quad \bar{m}_{Q_1} = \frac{m_Q}{1 + \gamma_1}; \quad \bar{Q}_{n1} = \frac{Q_{n1}}{1 + \gamma_2}; \quad \gamma_1 = \frac{\lambda_1}{\mu_1};$$

$\gamma_2 = \frac{\lambda_2}{\mu_2}$; γ_1, γ_2 – коэффициенты аварийности надбункерного и подбункерного конвейеров; λ_1, μ_1 и λ_2, μ_2 – параметры потоков отказов и восстановлений надбункерного и подбункерного конвейеров соответственно;

при $m_Q \leq Q_{n_1}$

$$m_{c_1} = \left[\frac{1 + \frac{(Q_{n_1} - \bar{Q}_{n_1}) (1 - e^{A_{21}\gamma V_1})}{(\bar{Q}_{n_1} - \bar{m}_{Q_1})}}{1 + \gamma_2 e^{A_{21}\gamma V_1} + \frac{(Q_{n_1} - \bar{Q}_{n_1}) (1 - e^{A_{21}\gamma V_1})}{(\bar{Q}_{n_1} - \bar{m}_{Q_1})}} \right] \bar{m}_{Q_1}, \quad (3)$$

где $A_{21} = \frac{\mu_2 [\bar{m}_{Q_1} (1 + \gamma_2) - Q_{n_1}]}{\bar{m}_{Q_1} (Q_{n_1} - \bar{m}_{Q_1})}$.

Рассмотрим теперь систему последовательного соединения двух первых бункеров схемы последовательного соединения бункеров (рис. 3).

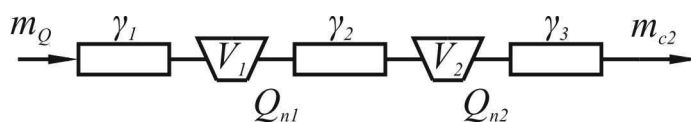


Рисунок 3 - Система последовательного соединения двух первых бункеров

Заменим эту схему простейшей эквивалентной схемой «бункер – конвейер – бункер», у которой на вход надбункерного конвейера поступает груз средней производительностью m_Q (рис. 4).

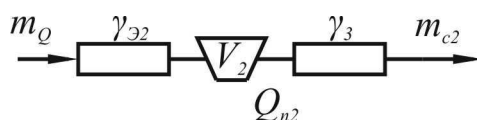


Рисунок 4 - Эквивалентная схема «бункер – конвейер – бункер»

Коэффициент аварийности надбункерного конвейера равен некоторому эквивалентному значению $\gamma_{э2}$. Среднее значение пропускной способности m_{c_2} на выходе из этой эквивалентной системы, согласно [12], определяется по формулам:

при $m_Q > Q_{n_2}$

$$m_{c_2} = \left[\frac{\frac{e^{A_{12}\gamma V_2}}{\gamma_{э2}} + \frac{\bar{m}_{Q_2}}{(\bar{m}_{Q_2} - Q_{n_2})} (e^{A_{12}\gamma V_2} - 1)}{1 + \frac{e^{A_{12}\gamma V_2}}{\gamma_{э2}} + \frac{\bar{m}_{Q_2}}{(\bar{m}_{Q_2} - Q_{n_2})} (e^{A_{12}\gamma V_2} - 1)} \right] \bar{Q}_{n_2}, \quad (4)$$

где
$$A_{12} = \frac{\mu_1 [m_Q - (1 + \gamma_{\varepsilon_2}) \bar{Q}_{n_2}]}{(m_Q - \bar{Q}_{n_2}) \bar{Q}_{n_2}}; \quad \bar{m}_{Q_2} = \frac{m_Q}{1 + \gamma_{\varepsilon_2}}; \quad \bar{Q}_{n_2} = \frac{Q_{n_2}}{1 + \gamma_3};$$

$$\gamma_{\varepsilon_2} = \frac{m_Q}{m_{c_1}} - 1; \quad \gamma_3 = \frac{\lambda_3}{\mu_3};$$

при $m_Q \leq Q_{n_2}$

$$m_{c_2} = \left[\frac{1 + \frac{(Q_{n_2} - \bar{Q}_{n_2})}{(\bar{Q}_{n_2} - \bar{m}_{Q_2})} (1 - e^{A_{22} \gamma V_2})}{1 + \gamma_3 e^{A_{22} \gamma V_2} + \frac{(Q_{n_2} - \bar{Q}_{n_2})}{(\bar{Q}_{n_2} - \bar{m}_{Q_2})} (1 - e^{A_{22} \gamma V_2})} \right] \bar{m}_{Q_2}, \quad (5)$$

где
$$A_{22} = \frac{\mu_2 [\bar{m}_{Q_2} (1 + \gamma_3) - Q_{n_2}]}{\bar{m}_{Q_2} (Q_{n_2} - \bar{m}_{Q_2})}; \quad \bar{m}_{Q_2} = m_{c_1}; \quad \bar{Q}_{n_2} = \frac{Q_{n_2}}{1 + \gamma_3}.$$

Продолжая этот процесс n раз (n – количество бункеров в системе), приходим к рекуррентным формулам:

при $m_Q > Q_{n_i}$

$$m_{c_i} = \left[\frac{\frac{e^{A_{1i} \gamma V_i}}{\gamma_{\varepsilon_i}} + \frac{\bar{m}_{Q_i}}{(\bar{m}_{Q_i} - Q_{n_i})} (e^{A_{1i} \gamma V_i} - 1)}{1 + \frac{e^{A_{1i} \gamma V_i}}{\gamma_{\varepsilon_i}} + \frac{\bar{m}_{Q_i}}{(\bar{m}_{Q_i} - Q_{n_i})} (e^{A_{1i} \gamma V_i} - 1)} \right] \bar{Q}_{n_i}, \quad (6)$$

где
$$A_{1i} = \frac{\mu_c [m_Q - (1 + \gamma_{\varepsilon_i}) \bar{Q}_{n_i}]}{(m_Q - \bar{Q}_{n_i}) \bar{Q}_{n_i}}; \quad \bar{m}_{Q_i} = \frac{m_Q}{1 + \gamma_{\varepsilon_i}} = m_{c_{i-1}}; \quad \bar{Q}_{n_i} = \frac{Q_{n_i}}{1 + \gamma_{i+1}};$$

$$\gamma_{\varepsilon_i} = \frac{m_Q}{m_{c_{i-1}}} - 1; \quad \gamma_i = \frac{\lambda_i}{\mu_i}; \quad (i = 1, n; \quad m_{c_0} = \frac{m_Q}{1 + \gamma_1}; \quad \mu_c = \mu_i);$$

при $m_Q \leq Q_{n_i}$

$$m_{c_i} = \left[\frac{1 + \frac{(Q_{n_i} - \bar{Q}_{n_i})}{(\bar{Q}_{n_i} - \bar{m}_{Q_i})} (1 - e^{A_{2i} \gamma V_i})}{1 + \gamma_{i+1} e^{A_{2i} \gamma V_i} + \frac{(Q_{n_i} - \bar{Q}_{n_i})}{(\bar{Q}_{n_i} - \bar{m}_{Q_i})} (1 - e^{A_{2i} \gamma V_i})} \right] \bar{m}_{Q_i}, \quad (7)$$

где
$$A_{2i} = \frac{\mu_c [\bar{m}_{Q_i} (1 + \gamma_{i+1}) - Q_{n_i}]}{\bar{m}_{Q_i} (Q_{n_i} - \bar{m}_{Q_i})}; \quad \bar{m}_{Q_i} = m_{c_{i-1}}; \quad \bar{Q}_{n_i} = \frac{Q_{n_i}}{1 + \gamma_{i+1}}; \quad (i = 1, n;$$

$$m_{c_0} = \frac{m_Q}{1 + \gamma_1}; \quad \mu_c = \mu_i).$$

При этом пропускная способность всей системы конвейерного транспорта с последовательным соединением бункеров определяется на n -ой итерации по формуле:

$$m_c = m_{c_n}, \tag{8}$$

где n – количество бункеров в системе.

Рассмотрим систему конвейерного транспорта с параллельным соединением бункеров (рис. 5).

Для этой системы, так же, как и в предыдущем случае, используя самоподобие ее структуры, получим рекуррентные соотношения

при $m_{Q_i} > Q_{n_i}$

$$m_{c_i} = \left[\frac{\frac{e^{A_{1i}\gamma V_i}}{\gamma_i} + \frac{\bar{m}_{Q_i}}{(\bar{m}_{Q_i} - \bar{Q}_{n_i})} (e^{A_{1i}\gamma V_i} - 1)}{1 + \frac{e^{A_{1i}\gamma V_i}}{\gamma_i} + \frac{\bar{m}_{Q_i}}{(\bar{m}_{Q_i} - \bar{Q}_{n_i})} (e^{A_{1i}\gamma V_i} - 1)} \right] \bar{Q}_{n_i}, \tag{9}$$

где $A_{1i} = \frac{\mu_c [m_{Q_i} - (1 + \gamma_i)\bar{Q}_{n_i}]}{(m_{Q_i} - \bar{Q}_{n_i})\bar{Q}_{n_i}}$; $\bar{m}_{Q_i} = \frac{m_{Q_i}}{1 + \gamma_i}$; $\bar{Q}_{n_i} = \frac{Q_{n_i}}{1 + \gamma_{0i}}$; $\gamma_i = \frac{\lambda_i}{\mu_i}$;

при $m_{Q_i} \leq Q_{n_i}$

$$m_{c_i} = \left[\frac{1 + \frac{(Q_{n_i} - \bar{Q}_{n_i})}{(\bar{Q}_{n_i} - \bar{m}_{Q_i})} (1 - e^{A_{2i}\gamma V_i})}{1 + \gamma_{0i} e^{A_{2i}\gamma V_i} + \frac{(Q_{n_i} - \bar{Q}_{n_i})}{(\bar{Q}_{n_i} - \bar{m}_{Q_i})} (1 - e^{A_{2i}\gamma V_i})} \right] \bar{m}_{Q_i}, \tag{10}$$

где $A_{2i} = \frac{\mu_c [\bar{m}_{Q_i} (1 + \gamma_{0i}) - Q_{n_i}]}{\bar{m}_{Q_i} (Q_{n_i} - \bar{m}_{Q_i})}$; $\bar{m}_{Q_i} = \frac{m_{Q_i}}{1 + \gamma_i}$; $\bar{Q}_{n_i} = \frac{Q_{n_i}}{1 + \gamma_{0i}}$; $i = 1, n$;

$$\mu_c = \mu_i.$$

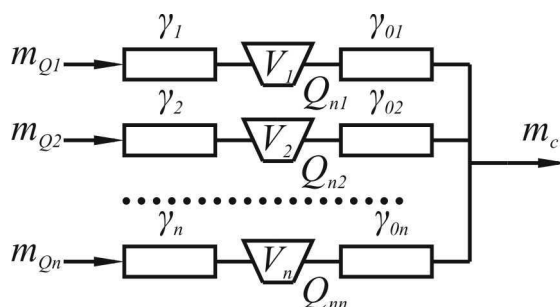


Рисунок 5 - Расчетная схема с параллельным соединением бункеров

При этом пропускная способность всей системы конвейерного транспорта с параллельным соединением бункеров определяется по формуле:

$$m_c = \sum_{i=1}^n m_{c_i}, \quad (11)$$

где n – количество бункеров в системе.

Для древовидной веерной структуры соединения бункеров (рис. 6) среднее значение пропускной способности системы конвейерного транспорта определяется по тем же формулам (9) и (10), в которых значения коэффициентов аварийности γ_{0_i} надбункерных конвейеров заменяется значением коэффициента аварийности γ_0 сборного конвейера ($\gamma_{0_i} = \gamma_0, i = 1, n$).

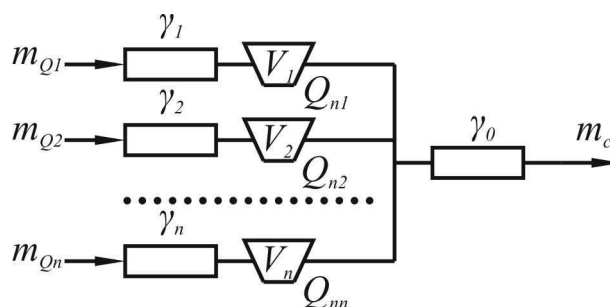


Рисунок 6 - Расчетная схема веерной структуры соединения бункеров

Рассмотрим систему конвейерного транспорта самоподобной древовидной структуры с бункерами (рис. 7).

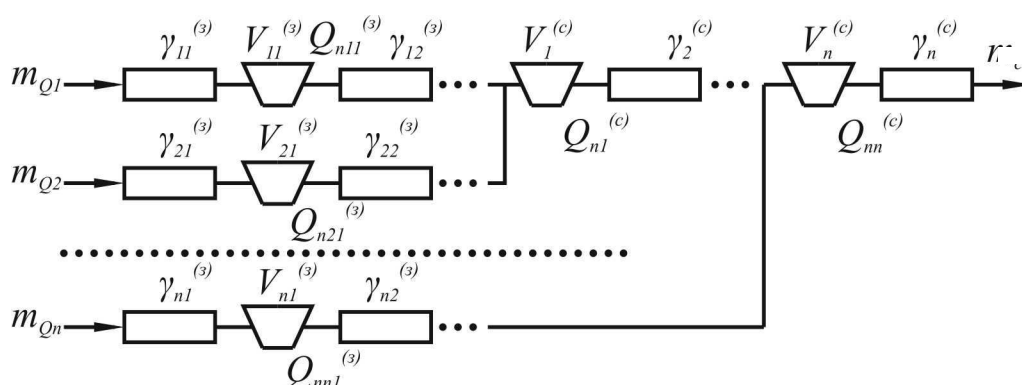


Рисунок 7 - Расчетная схема самоподобной древовидной структуры соединения бункеров

Для этой системы, используя так же, как и в предыдущих случаях, самоподобие структуры, получим рекуррентные соотношения, определяющие среднюю пропускную способность системы:

при $m_{Q_i} > Q_{n_i}$

$$m_{c_i} = \frac{\left[\frac{e^{A_{1i}\gamma_{\partial_i}^{(c)}}}{\gamma_{\partial_i}^{(c)}} + \frac{m_i^{(s)}}{(m_i^{(s)} - \bar{Q}_{n_i}^{(c)})} \left(e^{A_{1i}\gamma_{\partial_i}^{(c)}} - 1 \right) \right]}{\left[1 + \frac{e^{A_{1i}\gamma_{\partial_i}^{(c)}}}{\gamma_{\partial_i}^{(c)}} + \frac{m_i^{(s)}}{(m_i^{(s)} - \bar{Q}_{n_i}^{(c)})} \left(e^{A_{1i}\gamma_{\partial_i}^{(c)}} - 1 \right) \right]} \bar{Q}_{n_i}^{(c)}, \quad (12)$$

где $A_{1i} = \frac{\mu_c [m_i^{(s)}(1 + \gamma_{\partial_i}^{(c)}) - (1 + \gamma_{\partial_i}^{(c)})\bar{Q}_{n_i}^{(c)}]}{[m_i^{(s)}(1 + \gamma_{\partial_i}^{(c)}) - \bar{Q}_{n_i}^{(c)}]\bar{Q}_{n_i}^{(c)}}$; $\gamma_{\partial_i}^{(c)} = \frac{\sum_{k=1}^i m_{Q_k}}{m_i^{(s)}} - 1$;

$$m_i^{(s)} = m_{c_{i-1}} + \frac{m_{Q_i}}{1 + \gamma_{\partial_i}^{(s)}}; \quad \bar{Q}_{n_i}^{(c)} = \frac{Q_{n_i}^{(c)}}{1 + \gamma_{\partial_{i+1}}^{(c)}}; \quad m_{c_0} = 0; \quad \mu_c = \mu_i; \quad i = 1, n;$$

$\gamma_i^{(c)}$ – коэффициенты аварийности стволовых путей с бункерами; $\gamma_{\partial_i}^{(c)}$ – эквивалентные коэффициенты аварийности стволовых путей с бункерами; $\gamma_{\partial_i}^{(s)}$ – эквивалентные коэффициенты аварийности забойных путей с бункерами;

при $m_{Q_i} \leq Q_{n_i}$

$$m_{c_i} = \frac{\left[1 + \frac{(Q_{n_i}^{(c)} - \bar{Q}_{n_i}^{(c)})}{(\bar{Q}_{n_i}^{(c)} - m_i^{(s)})} \left(1 - e^{A_{2i}\gamma_{\partial_i}^{(c)}} \right) \right]}{\left[1 + \gamma_{\partial_{i+1}}^{(c)} e^{A_{2i}\gamma_{\partial_i}^{(c)}} + \frac{(Q_{n_i}^{(c)} - \bar{Q}_{n_i}^{(c)})}{(\bar{Q}_{n_i}^{(c)} - m_i^{(s)})} \left(1 - e^{A_{1i}\gamma_{\partial_i}^{(c)}} \right) \right]} m_i^{(s)}, \quad (13)$$

где $A_{2i} = \frac{\mu_c [m_i^{(s)}(1 + \gamma_{\partial_{i+1}}^{(c)}) - Q_{n_i}^{(c)}]}{m_i^{(s)}(Q_{n_i}^{(c)} - m_i^{(s)})}$, ($\mu_c = \mu_i$; $i = 1, n$).

Здесь эффективные коэффициенты аварийности забойных путей с бункерами определяются по формулам:

$$\gamma_{\partial_i}^{(s)} = \frac{m_{Q_i}}{m_{c_i}^{(s)}} - 1, \quad (\gamma_{\partial_1}^{(c)} = \gamma_{\partial_1}^{(s)}, \quad i = 1, n), \quad (14)$$

где $m_{c_i}^{(s)}$ – средние пропускные способности i -го забойного пути системы конвейерного транспорта с бункерами, определяемые аналогично по формулам (6) и (7).

Средние пропускные способности забойных путей $m_{c_i}^{(з)}$ определяются по формулам (6)–(8) для последовательного соединения забойных конвейеров с бункерами.

Для определения минимального и максимального значений пропускной способности рассмотренных выше систем конвейерного транспорта с бункерами положим в выше полученных рекуррентных формулах значения $V_i = 0$ и $V_i \rightarrow \infty$ соответственно для минимального и максимального значений. В результате получим:

– для последовательного соединения бункеров:

при $m_Q > Q_{n_i}$

$$\frac{Q_{n_1} \cdot Q_{n_2} \cdot \dots \cdot Q_{n_n}}{m_Q^{n-1} \cdot \prod_{i=1}^{n+1} (1 + \gamma_i)} \leq m_c \leq \frac{Q_{n_n}}{1 + \gamma_{n+1}}; \quad (15)$$

при $m_Q \leq Q_{n_i}$

$$\frac{m_Q}{\prod_{i=1}^{n+1} (1 + \gamma_i)} \leq m_c \leq \frac{m_Q}{1 + \gamma_1}; \quad (16)$$

– для параллельного соединения бункеров

при $m_{Q_i} > Q_{n_i}$

$$\sum_{i=1}^n \frac{Q_{n_i}}{(1 + \gamma_i)(1 + \gamma_{0_i})} \leq m_c \leq \sum_{i=1}^n \frac{Q_{n_i}}{1 + \gamma_{0_i}}; \quad (17)$$

при $m_{Q_i} \leq Q_{n_i}$

$$\sum_{i=1}^n \frac{m_{Q_i}}{(1 + \gamma_i)(1 + \gamma_{0_i})} \leq m_c \leq \sum_{i=1}^n \frac{m_{Q_i}}{1 + \gamma_i}; \quad (18)$$

– для веерного соединения бункеров

при $m_{Q_i} > Q_{n_i}$

$$\frac{1}{1 + \gamma_0} \sum_{i=1}^n \frac{Q_{n_i}}{1 + \gamma_i} \leq m_c \leq \frac{1}{1 + \gamma_0} \sum_{i=1}^n Q_{n_i}; \quad (19)$$

при $m_{Q_i} \leq Q_{n_i}$

$$\frac{1}{1 + \gamma_0} \sum_{i=1}^n \frac{m_{Q_i}}{1 + \gamma_i} \leq m_c \leq \sum_{i=1}^n \frac{m_{Q_i}}{1 + \gamma_i}; \quad (20)$$

– для самоподобного соединения бункеров с древовидной структурой

при $m_{Q_i} > Q_{n_i}$

$$m_c^{(0)} \leq m_c \leq \frac{Q_{n_n}}{1 + \gamma_{n+1}^{(c)}}; \quad (21)$$

при $m_{Q_i} \leq Q_{n_i}$

$$m_n^{(t)} \leq m_c \leq \sum_{i=1}^n \frac{m_{Q_i}}{1 + \gamma_{i_1}^{(s)}}, \quad (22)$$

где $m_c^{(0)}$ – средняя пропускная способность системы конвейерного транспорта древовидной самоподобной структуры при $V_i^{(c)} = 0$, и $V_{ij}^{(s)} = 0$; $m_n^{(t)}$ – пропускная способность системы конвейерного транспорта с древовидной самоподобной структурой без бункеров [3].

Пропускная способность $m_n^{(t)}$, согласно работе [3], определяется по рекуррентным формулам:

$$m_n^{(t)} = \frac{m_{n-1}^{(t)}}{1 + \gamma_{n+1}^{(c)}}, \quad (23)$$

$$\text{где } m_{n-1}^{(t)} = \frac{m_{n-2}^{(t)}}{1 + \gamma_n^{(c)}} + \frac{m_{Q_n}}{1 + \gamma_{\varepsilon_n}^{(s)}}; \quad m_1^{(t)} = \frac{m_0^{(t)}}{1 + \gamma_2^{(c)}} + \frac{m_{Q_2}}{1 + \gamma_{\varepsilon_2}^{(s)}};$$

$$m_0^{(t)} = \frac{m_{Q_1}}{1 + \gamma_{\varepsilon_1}^{(s)}}.$$

Здесь $m_i^{(t)}$ – средняя пропускная способность системы конвейерного транспорта с древовидной самоподобной структурой без бункеров после i -й итерации; $\gamma_{\varepsilon_i}^{(s)}$ – эквивалентный коэффициент аварийности забойных путей без бункеров, определяемый по формулам (14) при $V_{ij}^{(s)} = 0$ ($i=1, n; j=1, k_i, k_i$ – количество бункеров в i -ом забойном пути).

На основании полученных аналитических выражений были проведены расчеты пропускной способности систем конвейерного транспорта самоподобной древовидной структуры с бункерами (см. рис. 7).

При этом исходные данные и результаты расчета представлены в таблицах 1 и 2.

В таблицах 1 и 2 показаны результаты расчета пропускной способности по формулам (13) и (14) для $m_{Q_i} > Q_{n_i}$ и $m_{Q_i} \leq Q_{n_i}$ соответственно.

Из таблиц 1 и 2 видно, что при $m_{Q_i} \leq Q_{n_i}$ пропускная способность систем конвейерного транспорта в пять раз выше, чем при $m_{Q_i} > Q_{n_i}$.

Расчеты на основе полученных зависимостей показали, что с увеличением объемов аккумулирующих бункеров пропускная способность систем конвейерного транспорта любой структуры увеличивается, а при значениях объемов бункеров $V_i^{(c)} \geq 500 \text{ м}^3$ и $V_i^{(з)} \geq 500 \text{ м}^3$ пропускная способность практически не изменяется.

Таблица 1

Исходные данные и результаты расчета пропускной способности
в случае $m_{Q_i} > Q_{n_i}$ ($n=5; k_i = 5$)

m_{Q_i} , Т/МИН	$Q_{n_i}^{(c)}$, Т/МИН	$Q_{n_i}^{(з)}$, Т/МИН	$\gamma_i^{(c)}$	$\gamma_{ij}^{(з)}$	μ_i , 1/МИН	$V_i^{(c)}$, М ³	$V_{ij}^{(з)}$, Т/МИН	$m_i^{(s)}$, Т/МИН	m_c , Т/МИН
5,6	5,0	5,0	0,037	0,193	0,054	300,0	100,0	3,14	4,42
5,6	5,0	5,0	0,037	0,193	0,054	300,0	100,0	4,56	
5,6	5,0	5,0	0,037	0,193	0,054	300,0	100,0	4,57	
5,6	5,0	5,0	0,037	0,193	0,054	300,0	100,0	4,48	
5,6	5,0	5,0	0,037	0,193	0,054	300,0	100,0	4,42	

Таблица 2

Исходные данные и результаты расчета пропускной способности
в случае $m_{Q_i} \leq Q_{n_i}$ ($n=5; k_i = 5$)

m_{Q_i} , Т/МИН	$Q_{n_i}^{(c)}$, Т/МИН	$Q_{n_i}^{(з)}$, Т/МИН	$\gamma_i^{(c)}$	$\gamma_{ij}^{(з)}$	μ_i , 1/МИН	$V_i^{(c)}$, М ³	$V_{ij}^{(з)}$, Т/МИН	$m_i^{(s)}$, Т/МИН	m_c , Т/МИН
5,6	6,0	6,0	0,037	0,193	0,054	300,0	100,0	4,28	20,69
5,6	6,0	6,0	0,037	0,193	0,054	300,0	100,0	8,53	
5,6	6,0	6,0	0,037	0,193	0,054	300,0	100,0	12,61	
5,6	6,0	6,0	0,037	0,193	0,054	300,0	100,0	16,75	
5,6	6,0	6,0	0,037	0,193	0,054	300,0	100,0	20,69	

Кроме того, расчеты предельных оценок пропускной способности заданной системы конвейерного транспорта самоподобной древо-видной структуры показали, что в случае $m_{Q_i} = 5,6$ т/мин и

$Q_{n_i} = 5$ т/мин ($m_{Q_i} > Q_{n_i}$) пропускная способность принимает минимальное значение $m_{c \min} = m_c^{(0)} = 0,25$ т/мин при $V_i^{(c)} = V_{ij}^{(z)} = 0$ и максимальное значение $m_{c \max} = 4,82$ т/мин при $V_i^{(c)} = V_{ij}^{(z)} = \infty$.

При $m_{Q_i} = 5,6$ т/мин и $Q_{n_i} = 6$ т/мин ($m_{Q_i} < Q_{n_i}$) пропускная способность принимает минимальное значение $m_{c \min} = m_c^{(t)} = 8,72$ т/мин при $V_i^{(c)} = V_{ij}^{(z)} = 0$ и максимальное значение $m_{c \max} = 23,47$ т/мин при $V_i^{(c)} = V_{ij}^{(z)} = \infty$.

Выводы. На основе метода динамики средних для марковских процессов получены математические модели функционирования системы конвейерного транспорта с последовательным и параллельным соединением бункеров, а также с древовидной веерной и самоподобной структурой, позволяющие определить пропускную способность системы конвейерного транспорта угольных шахт.

При этом установлено, что если средние производительности поступающих из лав грузопотоков m_{Q_i} больше производительности питателей Q_{n_i} ($m_{Q_i} \geq Q_{n_i}$), то пропускная способность системы конвейерного транспорта намного меньше пропускной способности в случае если $m_{Q_i} < Q_{n_i}$.

Кроме того, с увеличением объемов аккумулирующих бункеров до определенного значения пропускная способность систем конвейерного транспорта увеличивается, а при значениях объемов бункера свыше этого значения – практически не изменяется.

ЛИТЕРАТУРА

1. Системы подземного транспорта на угольных шахтах / В. А. Пономаренко, Е. Л. Креймер, Г. А. Дунаев [и др.]. – М.: Недра, 1975. – 309 с.
2. Черкесов Г. Н. Надежность технических систем с временной избыточностью / Г. Н. Черкесов. – М.: Советское радио, 1974. – 296 с.
3. Кирия Р. В. Применение фракталов к определению пропускной способности систем конвейерного транспорта горных предприятий / Р. В. Кирия // Системні технології: Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Дніпропетровськ, 2010. – Випуск 2(67). – С. 167–174.
4. Спиваковский А.О. Карьерный конвейерный транспорт / А.О. Спиваковский, М.Г. Потапов, Г.В. Приседский. – М.: Недра, 1979. – 264 с.
5. Алотин Л. М. Моделирование и расчет транспортных систем горных предприятий / Л. М. Алотин, П. Б. Степанов. – Алма-Ата: Наука, КазССР, 1979. – 214 с.
6. Степанов П. Б. Надежность многобункерных конвейерных линий / П. Б. Степанов, Л. М. Алотин // Изв. ВУЗов. Горный журнал. – 1978. – №1. – С. 94-99.
7. Климов Б. Г. Оценка эффективности функционирования шахтных транспортных систем с бункерами / Б. Г. Климов, В. Я. Богуславский // Изв. ВУЗов. Горный журнал. – 1976. – № 5. – С. 93–96.
8. Копп В. Я. Моделирование автоматизированных производственных систем / В. Я. Копп. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – 700 с.
- 9.9. Вентцель Е.С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения: учебное пособие. 5-е изд. / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: КНОРУС, 2011. – 448 с.
10. Шредер Н. Фракталы, хаос, степенные законы. Миниатюры из бесконечного рая / Н. Шредер. – Ижевск: НИЦ, 2005. – 528 с.
11. Кирия Р. В. Адаптивное управление конвейерными линиями горных предприятий / Р. В. Кирия, В. Ф. Монастырский, В. Ю. Максютенко // Форум гірників–2011: Матеріали міжнарод. конф., 12–15 жовтня 2011 р. – Днепропетровск: Національний гірничий університет, 2011. – С. 87–95.
12. Кирия Р. В. Разработка быстрого алгоритма определения пропускной способности системы «конвейер – бункер – конвейер» / Р. В. Кирия, Т. Ф. Мищенко, Ю. В. Бабенко // Системні технології: Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Дніпропетровськ, 2013. – Випуск 1. – С. 146–158.

Н.В. Михайловский, С.В. Бейцун

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МОДЕЛИ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ «РАСПЛАВ–КОВШ»

Аннотация. Разработана математическая модель нестационарного теплопереноса через многослойную футеровку, а также за счет излучения с поверхности расплава. На основе анализа влияния конструктивных и теплофизических факторов в качестве основных параметров для идентификации модели выбраны приведенные значения внутреннего диаметра футеровки ковша и степени черноты поверхности расплава.

Ключевые слова: моделирование, сталеразливочный ковш, тепловое состояние, нестационарный теплоперенос.

Постановка проблемы

Ограниченные возможности регулирования физических и физико-химических условий протекания процессов плавления железа в традиционных агрегатах привели к созданию новых сталеплавильных процессов. В тех случаях, когда технологические операции, которые обеспечивают получение металла необходимого качества непосредственно в самом агрегате, приводят к потерям производительности процесса, их выполняют во вспомогательной емкости. В современном технологическом процессе внепечной обработки сталеразливочный ковш превращается из сугубо транспортного сосуда в металлургический реактор. Соответственно возрастают и требования к нему.

Основным фактором, который ограничивает продолжительность технологических операций с расплавом, находящимся в ковше, является температура жидкой стали. Ее снижение связано с тепловыми потерями на нагрев футеровки ковша, теплопередачей через нее и излучением с поверхности расплава.

При передаче ковша на разливку необходимо обеспечить довольно узкий диапазон температуры стали. Поскольку в производственных условиях реализовать оперативный контроль этого важного параметра с требуемой точностью не представляется возможным, для управления процессом внепечной обработки стали изменение температуры нужно прогнозировать.

Анализ публикаций по теме исследования

Исследованию теплового состояния системы «расплав–ковш–окружающая среда» при внепечной обработке стали уделяется много внимания. В частности, в работе [1] предложена технология автоматического определения теплосодержания сталеразливочного ковша. С использованием математической модели нестационарного теплопереноса в статье [2] рассмотрено влияние толщины футеровки сталеразливочного ковша на тепловые потери расплава. В статье [3] представлены результаты исследования теплового состояния сталеразливочного ковша при переменной тепловой нагрузке. В работе [4] исследовано изменение температуры расплава в зависимости от времени технологических операций ковшевой обработки.

Формулировка целей статьи

Обычно при моделировании теплофизические характеристики расплава и огнеупорных материалов футеровки, коэффициенты конвективной и лучистой теплоотдачи не измеряются, а принимаются в соответствии со справочными данными. В каждом конкретном случае налива расплава в ковш измеряются только масса расплава, его начальная температура, а также начальная температура внутренней поверхности футеровки ковша после его термической подготовки. Температура окружающей среды обычно принимается равной стандартной температуре производственных помещений. В результате, реальные значения параметров моделей могут отличаться от принятых в пределах нескольких процентов.

Поэтому необходимо исследовать влияние вариативности значений параметров теплового состояния сталеразливочного ковша на результаты моделирования охлаждения расплава.

Основная часть

Для моделирования сталеразливочный ковш представлен в виде цилиндра с плоским днищем. В математической модели [2] учитываются тепловые потери через многослойные стенку и днище ковша,

а также излучением с поверхности расплава, которая частично или полностью покрыта слоем шлака.

Для расчета процесса нестационарного теплообмена при охлаждении расплава в сталеразливочном ковше в качестве исходных данных используются следующие параметры: геометрические размеры ванны и масса расплава; начальная температура расплава и внутренней поверхности футеровки ковша, а также температура окружающей среды; толщина и число слоев футеровки; теплофизические свойства расплава и материалов футеровки.

Начальное поле температур в стенке и днище сталеразливочных ковшей рассчитывается по заданным граничными условиями I-го рода – постоянным значениям температуры внутренней поверхности футеровки ковша и внешней поверхности брони, принятым в соответствии с данными промышленных наблюдений.

Для исследования взята модель 120-тонного сталеразливочного ковша с внешним диаметром 3,6 м и высотой 4,3 м. Структура футеровки ковша, а также теплофизические свойства ее материалов взяты из [5]. Начальная температура расплава в ковше после выпуска, согласно нашим данным, составляет в среднем 1620°С, а начальная температура внутренней поверхности футеровки подготовленного ковша – 1100°С. Температура окружающей среды для расчетов принята равной 30°С. Условия моделирования соответствовали случаю выдержки ковша в течение 30 минут.

Для расчета процесса нестационарного теплообмена при охлаждении расплава в ковше используются следующие номинальные значения параметров модели: масса расплава 120000 кг; плотность расплава 7000 кг/м³; его теплоемкость 825 Дж/(кг·К); коэффициенты теплоотдачи конвекцией: от расплава к стенке ковша 5800 Вт/(м²·К); с поверхности расплава и от наружной стенки ковша в окружающую среду – соответственно, 27 и 12 Вт/(м²·К).

Коэффициенты влияния K_e параметров модели определяли как

$$K_e = \frac{(P_{\max} - P_{\min}) / P_n}{(\Delta t_{\max} - \Delta t_{\min}) / \Delta t_n}, \quad (1)$$

где P_{\max} , P_{\min} , P_n – соответственно, максимальное, минимальное и номинальное значения исследуемого параметра; Δt_{\max} , Δt_{\min} , Δt_n – соответствующее снижение температуры расплава.

Анализ результатов моделирования охлаждения расплава при вариативности параметров теплового состояния сталеразливочного ковша показал, что наиболее значимыми являются: теплофизические свойства жидкой стали (плотность и теплоемкость) – коэффициенты влияния K_e равны минус 0,89; начальная температура внутренней поверхности футеровки ($K_e = -0,66$); внутренний диаметр ковша ($K_e = +0,74$); степень черноты поверхности расплава ($K_e = +0,39$). Менее влияют на точность модели вариации теплофизических свойств и толщины внутреннего слоя футеровки ($0,2 > K_e > 0,05$). Неопределенностью значений остальных параметров системы «расплав–ковш» можно пренебречь.

Выводы и перспективы дальнейших исследований

Учитывая надежность данных о теплофизических свойствах расплава и корунда, а также о начальной температуре футеровки ковша основными параметрами для адаптации модели теплового состояния ковша следует считать приведенные значения его внутреннего диаметра и степени черноты поверхности расплава.

Полученные результаты могут быть использованы для создания надежной системы прогнозирования изменения температуры расплава в ходе внепечной обработки стали.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев С.В. Технология автоматического определения теплосодержания сталеразливочного ковша // С.В. Агеев, А.Д. Чернопольский, И.А. Петушков, В.И. Бойков, С.В. Быстров, А.А. Блинников. – Металлург. – 2011. – № 5. – С. 48–52.
2. Михайловский Н.В. Влияние толщины футеровки сталеразливочного ковша на тепловые потери расплава // Н.В. Михайловский, С.В. Бейцун. – Металлургическая теплотехника: сборник научных трудов НМетАУ. – Днепропетровск: НМетАУ, 2010. – С. 135-142.
3. Ошовская Е. В. Моделирование работы футеровки сталеразливочного ковша с переменной тепловой нагрузкой // Е.В. Ошовская, И.Н. Салмаш, Д.А. Фоменко. – Наукові праці ДонНТУ: Металургія. – 2011. – Вип. 13 (194). – С. 198-210.
4. Бейцун С. В. Тепловое состояние ковшей при внепечной обработке стали // С.В. Бейцун, Н.В. Михайловский, В.И. Шибакинский. – Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2013. – № 4. – С. 104-107.
5. Казанцев Е.И. Промышленные печи: Справочное руководство для расчетов и проектирования. – 2-ое издание, перераб. и доп. / Е.И. Казанцев – М.: Металлургия, 1975. – 368 с.

Е.Ю. Островская, Д.А. Колбун

НЕЧЕТКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ КОЭФФИЦИЕНТА СЦЕПЛЕНИЯ «АВТОМОБИЛЬ-ДОРОГА»

Анотація. Розглянуто задачу оцінки коефіцієнта зчеплення коліс автомобіля з дорожнім покриттям, яка виникає у зв'язку з проведенням автотехнічної експертизи при розслідуванні дорожньо-транспортних пригод. Від точності визначення коефіцієнта зчеплення залежить об'єктивність прийняття рішення про винність або невинність водія, який скоїв ДТП. Існуюча методика дозволяє визначити тільки діапазон можливих значень коефіцієнта зчеплення в залежності від ряду факторів, що впливають.

Ключові слова: ідентифікація, коефіцієнт, діапазон, лінгвістична змінна, методи, програма, функція приналежності, база правил.

Введение. Высокие темпы автомобилизации в Украине способствуют повышению внимания к строительству автомобильных магистралей, предназначенных для интенсивных пассажирских и грузовых перевозок с высокими скоростями движения и значительными требованиями к его безопасности.

Обеспечение безопасности движения с большими скоростями выдвигает специфические требования к характеристикам условий движения и транспортного потока, в том числе к сцепным качествам и шероховатости дорожного покрытия. Одной из важнейших характеристик покрытия проезжей части является способность ее сопротивляться скольжению автомобильных шин. В то же время, на сцепление влияют не только характеристики покрытия, но и свойства шин, конструкция автомобиля и текущие погодные условия [1].

Известно, что коэффициент сцепления шин автомобиля с дорожным покрытием меняется, прежде всего, в зависимости от типа, шероховатости и состояния покрытия [1]. Это изменение распространяется по поверхности проезжей части дороги, которую можно смоделировать в двухкоординатной криволинейной системе, одна координата подсчитывается в поперечном сечении дороги вторая - в про-

дольном. Дополнительно в каждой точке криволинейной поверхности коэффициент сцепления изменяется по времени. В зависимости от масштаба времени можно отслеживать изменения часовые, суточные, месячные, годовые и по годам. В рамках безопасности дорожного движения наиболее важным является изменение часовая и суточная, которые очень сложно отследить на практике и предупредить об этих изменениях водителей автомобилей.

С точки зрения безопасности дорожного движения наиболее актуальным процессом изменения коэффициента сцепления является процесс изменения в условиях магистрального движения, где при высоких скоростях требуется значительное тормозное усилие для эффективной остановки автомобиля, но это усилие обратно с увеличением скорости значительно уменьшается в связи с уменьшением коэффициента сцепления, что при прочих равных условиях увеличивает сложность торможения и резко снижает безопасность движения.

В снижении коэффициента сцепления главной проблемой является неожиданная водителем потеря устойчивости автомобилю, появляется обычно в моментах с интенсивным маневрированием, то есть в сложных условиях движения, и становится причиной возникновения ДТП. В рассматриваемых условиях выдающимся характеристикой является текущий запас по коэффициенту сцепления для каждого автомобиля транспортного потока, непосредственно раскрывает имеющийся уровень безопасности движения.

Постановка задачи. Задача оценки коэффициента сцепления колес автомобиля с дорожным покрытием возникает в связи с проведением автотехнической экспертизы при расследовании дорожно-транспортных происшествий (ДТП). От точности определения коэффициента сцепления зависит объективность принятия решения о виновности или невиновности водителя, который совершил ДТП (например, наезд на пешехода). Существующая методика позволяет определить только диапазон возможных значений коэффициента сцепления в зависимости от ряда влияющих факторов. Поэтому, окончательная его оценка определяется автотехническим экспертом субъективно, с учетом дополнительных факторов и условий, которые не входят в методику.

Принятие решения о причине аварии очень чувствительно к значению коэффициента сцепления: субъективный выбор нижнего

или верхнего значения коэффициента может решить судьбу участников происшествия.

Методика идентификации. Модель оценки коэффициента сцепления разрабатывалась на основе идентификации нелинейных объектов нечеткими базами знаний. Построение модели производилось в два этапа: первый - структурная идентификация; второй - параметрическая идентификация [3]. На первом этапе строилась структура зависимости коэффициента сцепления от влияющих факторов с применением экспертных правил <ЕСЛИ-ТО>. На втором этапе проводилась настройка модели путем подбора таких параметров формы функций принадлежности нечетких термов и весов правил <ЕСЛИ-ТО>, которые обеспечивают минимальное расхождение модельных и экспериментальных результатов.

На рисунке 1 представлена схема структурной идентификации в виде дерева, вершинами которого являются факторы, влияющие на коэффициент сцепления. Особенность модели заключается в том, что она учитывает как традиционные для известной методики факторы, которые обобщены интегральным показателем Q , так и дополнительно введенные факторы: S , H , P , N , V . Все влияющие факторы, рассматриваются как лингвистические переменные, заданные на соответствующих универсальных множествах и оцениваются нечеткими термами. Интегральный показатель Q , в свою очередь, зависит от факторов: D_1 - тип дорожного покрытия; D_2 - состояние дорожного покрытия; T - тип шин. Это показано на древовидной структуре модели коэффициента сцепления (рис. 1) [4].

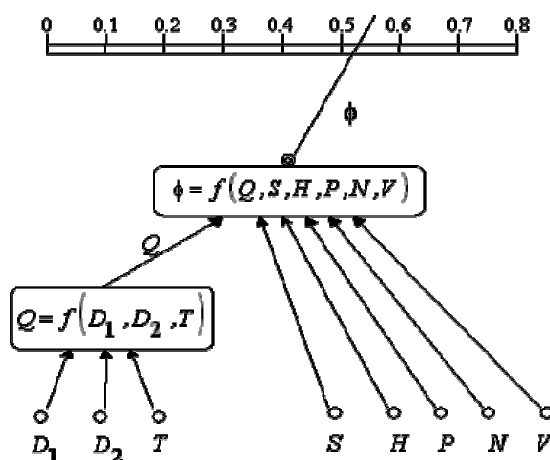


Рисунок 1 – Структурная идентификация
Дерево влияющих факторов

Программная реализация. Для построения системы нечеткого вывода использовалась программа FuzzyTECH, которая является специализированным средством, которое позволяет разрабатывать и исследовать разработанные нечеткие модели в графическом режиме, а также преобразовывать их в программный код на одном из языков программирования с возможностью последующей реализации в программируемых микроконтроллерах.

Основными шагами разработки программ на FuzzyTECH являются:

1. Формализация поставленной задачи - определение лингвистических переменных, сопоставление термов с конкретными физическими значениями;

2. Разработка базы правил, определяющей стратегию управления - задание метода дефаззификации выходных данных;

3. Оптимизация разработанной системы в режиме off-line - интерактивный анализ поведения системы с использованием заранее подготовленных данных при помощи программной модели объекта управления;

4. Оптимизация в режиме on-line - подключение созданной системы управления к реальному объекту и оптимизация различных компонентов системы в реальных условиях; т.к. в модели объекта управления невозможно учесть все тонкости процесса, то данный режим отладки весьма важен при создании систем управления;

5. Реализация - на этом этапе выбирается вариант генерируемого кода в зависимости от потребностей. Полученный код для микроконтроллера может быть связан с основной программой либо записан в ПЗУ системы управления [5].

Процесс разработки системы нечеткого вывода в среде fuzzyTECH состоит в выполнении следующих последовательных действий:

1. Создать новую систему нечеткого вывода;

2. В окне мастера создания новой модели задать количество входных лингвистических переменных, выходных лингвистических переменных и блок правил;

3. Присвоить название всех лингвистических переменных и их диапазон значений;

4. Определить свойства программы fuzzyTECH: метод дефазификации – центр максимума (Middle of Maxima = MOM) вида (1);

$$y_0 = \frac{\int_G y dy}{\int_G dy}, \quad (1)$$

где G - подмножество элементов, которые максимизируют C_Σ ; y_0 - переменная выхода.

В методе центра максимумов находится среднее арифметическое элементов универсального множества, имеющих максимальные степени принадлежности.

5. Спецификация термов и их функций принадлежности для входных и выходных лингвистических переменных;

6. Выбор формы и значений функций принадлежности входных лингвистических переменных;

7. Выбор формы и значений функций принадлежности выходных лингвистических переменных;

8. Определить базы правил для разрабатываемой модели.

На рисунке 2 представлен вид графического редактора проекта для нечеткой модели.

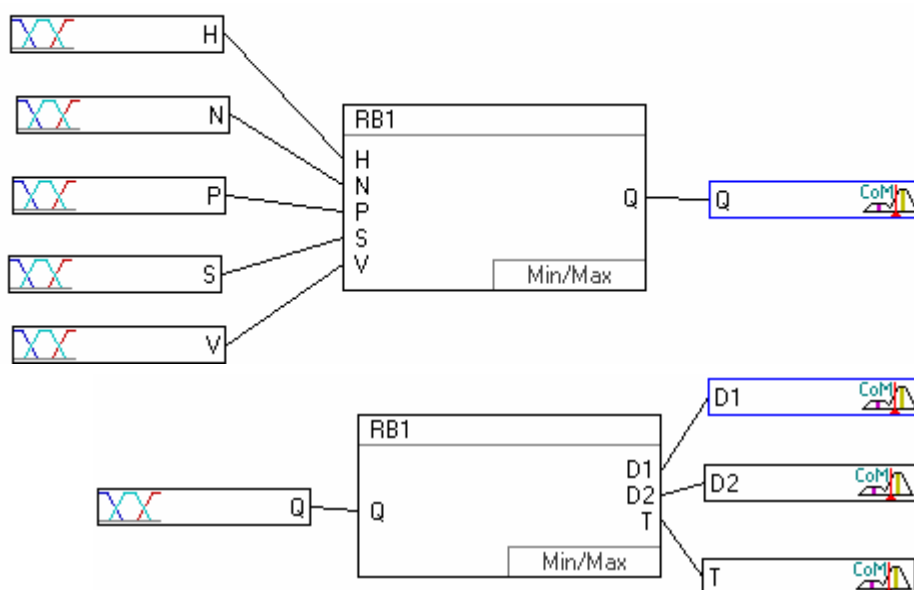


Рисунок 2 – Графическое окно редактора проекта для системы нечеткого вывода принятия решений

Ниже приведен фрагмент программного кода разработанной нечеткой модели:

```

MODEL {
  VARIABLE_SECTION {
    LVAR {
      NAME      = H;
      BASEVAR   = Units;
      LVRANGE   = MIN(0.0), MAX(100.0),
                MINDEF(0), MAXDEF(65535),
                DEFAULT_OUTPUT(50.0);
      RESOLUTION = XGRID(10.0), YGRID(0.1),
                SHOWGRID (ON), SNAPTOGRID(OFF);
      COLOR     = RED (0), GREEN (128), BLUE (0);
      INPUT     = CMBF;
      POS       = -185, -45;
      TERM {
        TERMNAME = low;
        POINTS   = (0.0, 0.0),
                  (24.998, 1.0),
                  (50.0, 0.0),
                  (100.0, 0.0);
        SHAPE    = LINEAR;
        COLOR    = RED (255), GREEN (0), BLUE (0);
      }
      TERM {
        TERMNAME = medium;
        POINTS   = (0.0, 0.0),
                  (24.998, 0.0),
                  (50.0, 1.0),
                  (75.0, 0.0),
                  (100.0, 0.0);
        SHAPE    = LINEAR;
        COLOR    = RED (0), GREEN (128), BLUE (0);
      }
    } и.т.д.
  }
}

```

Выводы. Точность определения коэффициента сцепления зависит от справедливости решения о вине или невиновности водителя, который совершил ДТП.

Методика позволяет определить только диапазон возможных значений коэффициента сцепления в зависимости от нескольких факторов. Поэтому, окончательная оценка определяется субъективно экспертом – авто-техником, принять в счет дополнительные факторы и условия, которые не являются частью методологии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Немчинов М.В. Сцепные качества дорожных покрытий и безопасность движения автомобилей. – М.: Транспорт, 1985. – 231 с.
2. Михалев А. И. Адаптивно - поисковые методы и алгоритмы оптимизации и идентификации динамических систем. Учебное пособие. - УМК ВО, Киев, 1992. – 68 с.
3. Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткая логика, генетические алгоритмы, нейронные сети. - Винница: УНИВЕРСУМ-Винница, 1999. - 320 с.
4. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и FuzzyTECH. – БХВ: Санкт - Петербург, 2003. – 716 с.

А.В. Рудакова, О.В. Поливода

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПОДСИСТЕМ МОНИТОРИНГА
РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ
МЕТОДАМИ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА**

Аннотация. Предложен метод оптимизации параметров функционирования подсистемы мониторинга территориально распределенной системы на основе применения методов одномерного и двумерного спектрального анализа. Данный метод позволяет избежать информационной избыточности и упростить техническую реализацию контура идентификации состояния распределенного объекта, эффективность работы которого обуславливает эффективность работы информационно-управляющей системы.

Ключевые слова: территориально распределенная система, подсистема мониторинга, спектральный анализ, корреляционная функция, оптимизация схемы размещения датчиков.

Постановка проблемы

Современные производственные комплексы представляют собой сложные территориально-распределенные объекты, для управления которыми используются интегрированные автоматизированные системы управления (ИАСУ) [1]. Функционирование информационно управляющих систем существенно зависит от слаженности и эффективности работы всех его подсистем, в особенности подсистемы мониторинга. Повышение эффективности функционирования подсистем мониторинга в значительной мере связано с совершенствованием методов и средств сбора и анализа данных.

Оптимизация подсистем мониторинга распределенных объектов заключается в определении оптимальной схемы размещения датчиков, их необходимого и достаточного количества, периодичности их опроса с целью уменьшения информационной избыточности измерений и, как следствие, уменьшения объема информации, предназначенной для хранения и обработки, снижения требований к вычислительным средствам и телекоммуникационным каналам связи.

Анализ публикаций по теме исследования

Оперативное управление на протяжении всего срока функционирования объекта, состоит из следующих периодически повторяющихся этапов: оценка текущего состояния объекта управления; определение отклонения движения объекта от заданной траектории; решение задачи нахождения оптимального управления (формирование управляющих воздействий) на предстоящий период; реализация управления (корректировка состояния системы – возвращение ее на заданную траекторию) [2].

В связи с наличием неопределенностей относительно состояния объекта, обусловленных стохастическим изменением внешних и внутренних условий функционирования системы, основной задачей подсистемы мониторинга является своевременная идентификация состояния объекта, на основе которой в ИАСУ формируется управление.

Расчет оптимального управления как правило осуществляется в АРМ диспетчера, с помощью системы поддержки принятия решений (СППР) [2], структура которой приведена на рис.1.

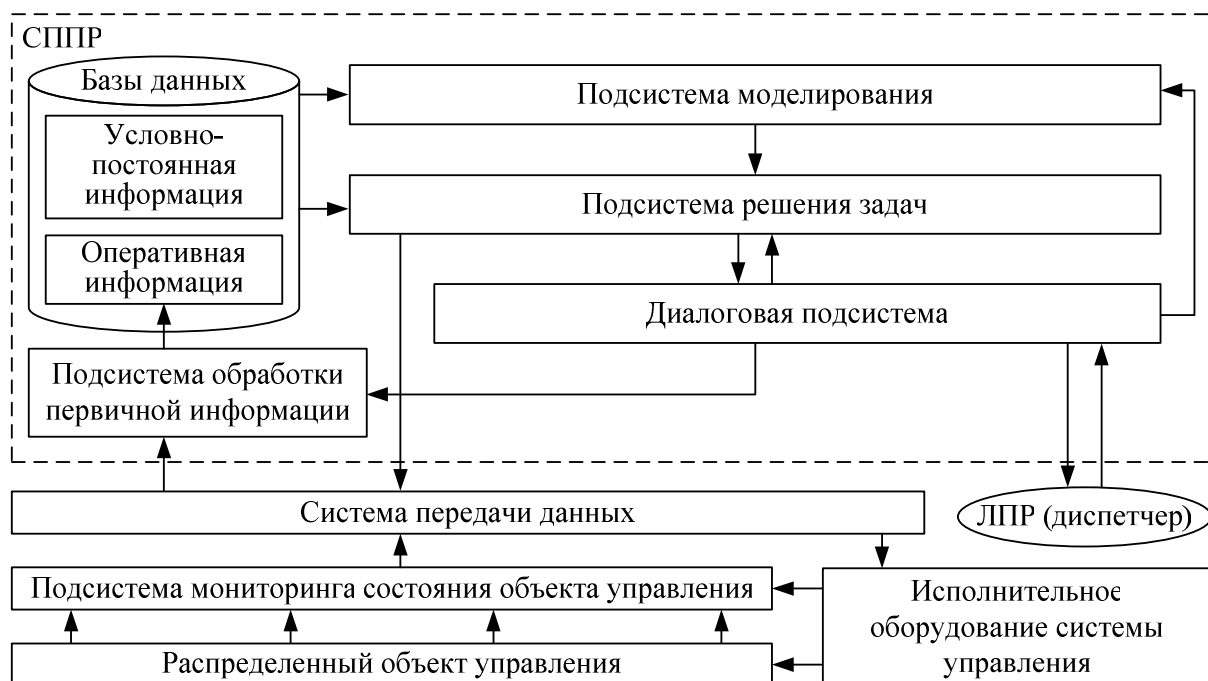


Рисунок 1 – Структура СППР для управления распределенным объектом

В интегрированной автоматизированной системе управления распределенным объектом необходимо наличие соответствующих моделей и программ для прогноза динамики состояния и планирования распределения ресурсов, системы мониторинга для оценки качества управления, участие управляющего персонала в процессе согласования принятых решений.

Подсистема мониторинга должна осуществлять систематическое измерение всех текущих параметров функционирования объекта, параметров окружающей среды, пополнение баз данных новой информацией и фиксировать изменения параметров системы для возможности дальнейшего прогноза. Таким образом, целью функционирования подсистемы мониторинга является обеспечение СППР оперативной информацией о состоянии объекта, а также информацией о режиме работы исполнительного оборудования.

Подсистема обработки первичной информации выполняет анализ внешней входной информации, обработку информации, получаемой от оператора, отображение данных в виде удобном для последующей обработки и передачу информации в базу данных.

Подсистема моделирования формирует модель динамики состояния распределенного объекта на основе условно-постоянной и оперативной информации из базы данных. Для упрощения анализа распределенного объекта можно использовать непрерывную модель в виде поверхности с использованием аппроксимирующих оболочек, которая дает возможность прогнозировать состояние в любой точке территориально-распределенной системы [3].

В подсистеме решения задач формируются режимы работы оборудования на предстоящий период с учетом прогноза динамики состояния объекта [4].

Система передачи данных, связывающая СППР с оборудованием системы и подсистемой мониторинга, может быть реализована на базе беспроводных телекоммуникационных технологий.

Для повышения эффективности функционирования территориально распределенной системы необходимым условием является эффективная работа подсистемы мониторинга. В первую очередь необходимо избегать информационной избыточности измерений и упростить техническую реализацию контура идентификации состояния распределенного объекта.

Постановка задачи

Для достижения поставленной цели необходимо разработать метод оптимизации параметров функционирования подсистемы мониторинга территориально распределенного объекта, который позволит определить схему размещения датчиков и периодичность их опроса, на основе применения методов одномерного и двумерного спектрального анализа.

Основная часть

На основе известной динамической модели функционирования территориально распределенного объекта $Z(x, y, t)$, построенной в виде аппроксимирующей оболочки [3], в каждой произвольной точке $(x, y) \in \Omega$ можно определить корреляционную функцию, которая характеризует скорость протекания процессов в системе, по формуле

$$r_Z(x, y, \tau) = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{\overset{\circ}{Z}(x, y, t) \cdot \overset{\circ}{Z}(x, y, t + \tau)}{D_Z(x, y)} dt, \quad (1)$$

где $\overset{\circ}{Z}(x, y, t) = Z(x, y, t) - m_Z(x, y)$ – центрированное значение контролируемого параметра в точке с координатами (x, y) ;

$m_Z(x, y) = \frac{1}{T} \int_0^T Z(x, y, t) dt$ – математическое ожидание;

$$D_Z(x, y) = \frac{1}{T} \int_0^T [Z(x, y, t) - m_Z(x, y)]^2 dt$$
 – дисперсия значений параметра; $Z(x, y, t)$ – конкретная реализация случайного процесса, которая может быть получена на основе статистической информации о функционировании объекта за продолжительный интервал времени T .

Для упрощения практических расчетов корреляции (1) можно воспользоваться дискретизированными формулами для нахождения автокорреляционной функции в виде [5]

$$r_Z(x, y, \tau) = \frac{1}{N - m} \sum_{i=0}^{N-m-1} \frac{\overset{\circ}{Z}(x, y, t_i) \cdot \overset{\circ}{Z}(x, y, t_i + m\Delta t_\partial)}{D_Z(x, y)}, \quad (2)$$

где $\Delta t_\partial = T / N$ – временной интервал между соседними отмеренными значениями параметров; N – количество расчетных точек (достаточно большое); $\tau = m\Delta t_\partial$ – корреляционный интервал $m = 0, 1, \dots, N$.

Для определения математического ожидания и дисперсии можно использовать следующие выражения

$$m_Z(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} Z(x, y, t_i), \quad D_Z(x, y) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} \left[Z(x, y, t_i) \right]^2. \quad (3)$$

Спектральный анализ позволяет оценить максимальные частоты спектра случайного процесса, на основе которых можно определить шаг дискретизации согласно теореме Котельникова как [5]

$$\Delta t \leq \frac{\pi}{\omega_c}, \quad (4)$$

где ω_c – максимальная частота спектра ограниченного сигнала в точке с заданными координатами (x, y) , для нахождения которой традиционно используют равенство Парсеваля

$$\frac{1}{\pi} \int_0^{\omega_c} [S(\omega)]^2 d\omega = \frac{\eta}{\pi} \int_0^{\infty} [S(\omega)]^2 d\omega, \quad (5)$$

где η – коэффициент, характеризующий точность воспроизведения, $\eta = 0,95$; $S(\omega)$ – спектральная плотность амплитуд случайного процесса, которая может быть найдена с помощью преобразования Фурье корреляционной функции

$$S_Z(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} r_Z(\tau) \cos \omega \tau d\tau. \quad (6)$$

Периоды опроса датчиков по всей территории распределенного объекта Ω можно определить как функцию в зависимости от координат

$$\Delta t(x, y) \leq \frac{\pi}{\omega_c(x, y)}, \quad (7)$$

или, что рациональнее из удобства практической реализации подсистемы мониторинга, как

$$\Delta t = \min_{(x, y) \in \Omega} \Delta t(x, y). \quad (8)$$

Моделирование проводилось для подсистемы мониторинга влажности почвы сельскохозяйственных угодий. Динамика изменения влажности в отдельных точках территории при различных режимах функционирования поливных систем, типах грунта и выращиваемых культур с учетом осадков на протяжении всего вегетационного периода, полученная на основе модели изложенной в [6], приведена на рис. 2.

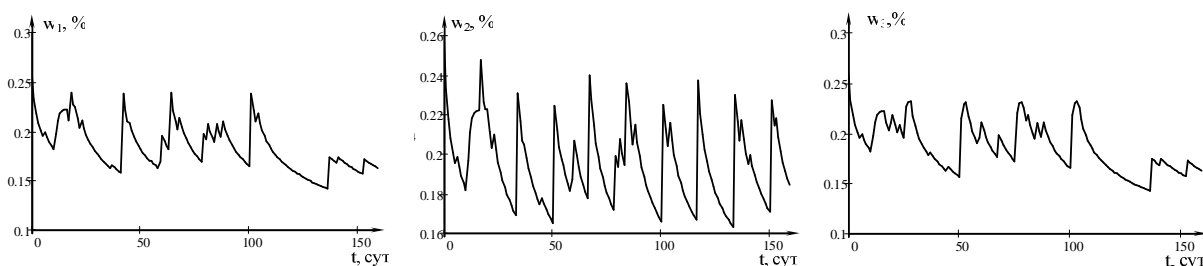


Рисунок 2 – Результаты моделирования влажности почвы

Автокорреляционные зависимости для приведенных процессов, рассчитанные согласно (2) и (3) показаны на рис. 3.

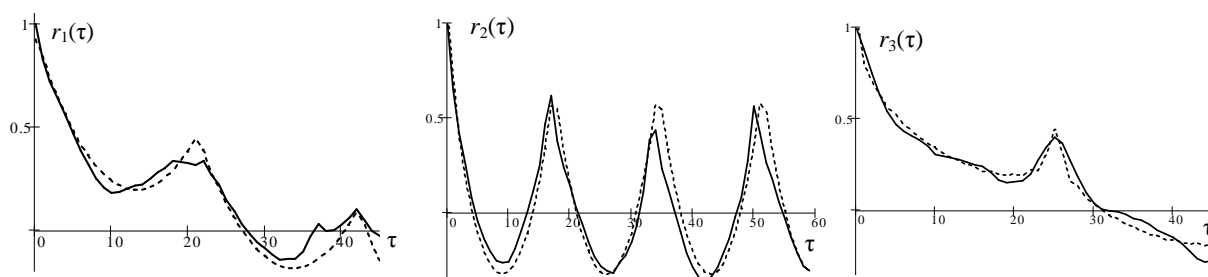


Рисунок 3 – Корреляционные зависимости:

(---- – расчетные значения; --- – аппроксимированные значения)

Для нахождения спектральной плотности процессов изменения влажности $S(\omega)$ корреляционные зависимости должны быть представлены в аналитической форме, которые можно получить из графиков с помощью метода наименьших квадратов [7]. В результате аппроксимации получены следующие зависимости:

$$\begin{aligned}
 r_1(\tau) &= -0,18 \cdot \sum_{n=1}^{10} (-1)^{n+1} \frac{\cos(n \cdot (0,37\tau - 9,5))}{n^2} + 0,65 - \left(\frac{\tau}{52}\right)^{0,8}, \\
 r_2(\tau) &= -0,4 \cdot \sum_{n=1}^{10} (-1)^{n+1} \frac{\cos(n \cdot (0,37\tau - 9,6))}{n^2} + 0,5e^{-\tau}, \\
 r_3(\tau) &= -0,11 \cdot \sum_{n=1}^{10} (-1)^{n+1} \frac{\cos(n \cdot (0,245\tau - 9,3))}{n} + 0,8 - \left(\frac{\tau}{48}\right)^{0,6}.
 \end{aligned} \tag{9}$$

В результате подстановки аналитических корреляционных зависимостей (9) в уравнения (5) и (6) были получены частоты срезов $\omega_{c1} = 0,324 \text{ сут}^{-1}$, $\omega_{c2} = 0,738 \text{ сут}^{-1}$, $\omega_{c3} = 0,475 \text{ сут}^{-1}$, и оценки шагов дискретизации согласно (7) $\Delta t_1 \leq 9,7 \text{ сут}$, $\Delta t_2 \leq 4,25 \text{ сут}$, $\Delta t_3 \leq 6,6 \text{ сут}$. В качестве периода опроса датчиков можно выбрать минимальное значение $\Delta t \leq 4,25 \text{ сут}$ для всех точек (x, y) территориально распределенной ирригационной системы.

Двумерный спектральный анализ поверхностной модели территориально распределенного объекта дает возможность определить схему расположения датчиков подсистемы мониторинга на плоскости $(x, y) \in \Omega$.

Степень зависимости значений распределенного параметра $Z(x, y, t)$ в направлении различных координат для любого фиксированного момента времени $t \in (0, T)$ можно оценить с помощью двумерной автокорреляционной функции вида

$$r(\tau_x, \tau_y) = \frac{1}{(N_1 - m_1)(N_2 - m_2)} \sum_{i=0}^{N_1 - m_1 - 1} \sum_{j=0}^{N_2 - m_2 - 1} \frac{Z^0(x_i, y_j) Z^0(x_i + \tau_x, y_j + \tau_y)}{D_Z}, \quad (10)$$

где N_1 и N_2 – количество отсчетов по координатам x и y ;

$\tau_x = m_1 \Delta x$, $\tau_y = m_2 \Delta y$ – интервалы отстояния точек процесса;

$Z^0(x_i, y_j) = Z(x_i, y_j) - m_Z$ – центрированные значения процесса $Z(x, y)$;

$m_Z = \frac{1}{N_1 \cdot N_2} \sum_{i=0}^{N_1 - 1} \sum_{j=0}^{N_2 - 1} Z(x_i, y_j)$ и $D_Z = \frac{1}{N_1 \cdot N_2 - 1} \sum_{i=0}^{N_1 - 1} \sum_{j=0}^{N_2 - 1} [Z^0(x_i, y_j)]^2$ – ма-

тематическое ожидание и дисперсия случайного процесса $Z(x, y)$.

При анализе двумерного спектра можно оценить максимальные частоты спектра распределенного случайного процесса, на основе которого можно определить шаг дискретизации по координатам x и y согласно теореме Котельникова:

$$\Delta \bar{x}_i \leq \frac{\pi}{\omega_{cx_i}}, \quad \Delta \bar{y}_j \leq \frac{\pi}{\omega_{cy_j}}, \quad i = \overline{0, N_2 - 1}, \quad j = \overline{0, N_1 - 1}, \quad (11)$$

где ω_{cx_i} и ω_{cy_j} – максимальные частоты спектра для каждого сечения корреляционной функции по координатам x и y соответственно.

Пересчет к реальным координатам можно осуществить с учетом масштабирующего коэффициента k , зависящего от вида и радиуса действия исполнительного оборудования как $\Delta x = k \cdot \Delta \bar{x}$, $\Delta y = k \cdot \Delta \bar{y}$.

Расчеты максимальных частот спектра ω_{cx_i} и ω_{cy_j} проводятся как и для одномерного случая по соотношению Парсеваля (5), где спектральные плотности амплитуд случайного процесса определяется при помощи преобразования Фурье по корреляционной функции (6).

Шаг расстановки датчиков по всей территории распределенного объекта принимается как

$$\Delta x = \min(\Delta x_i) \text{ и } \Delta y = \min(\Delta y_j). \quad (12)$$

Моделирование предложенного метода определения оптимальной схемы расстановки датчиков проводилось в границах территории отдельного хозяйства. Вид поверхностной модели влажности почвы в относительных координатах в момент времени $t = 20$ суток от начала вегетационного периода представлен на рис. 4а. График рассчитанной корреляционной функции $r_Z(\tau_x, \tau_y)$ показан на рис. 4б.

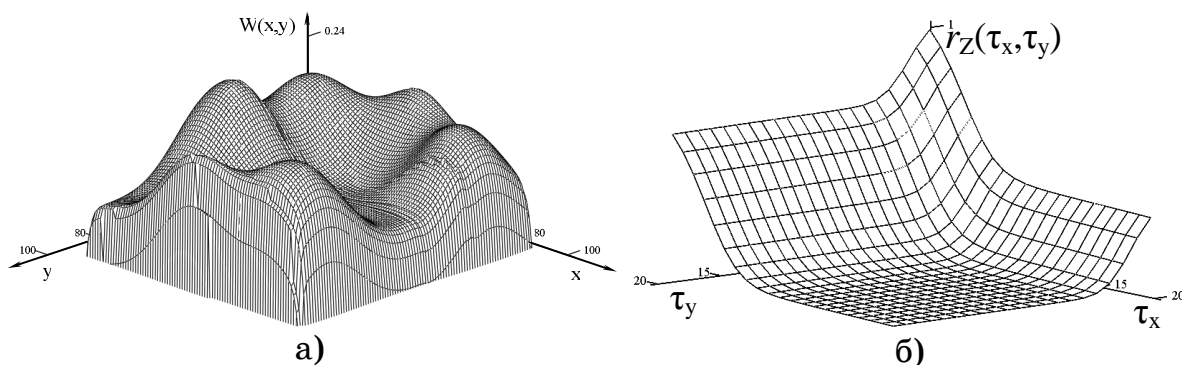
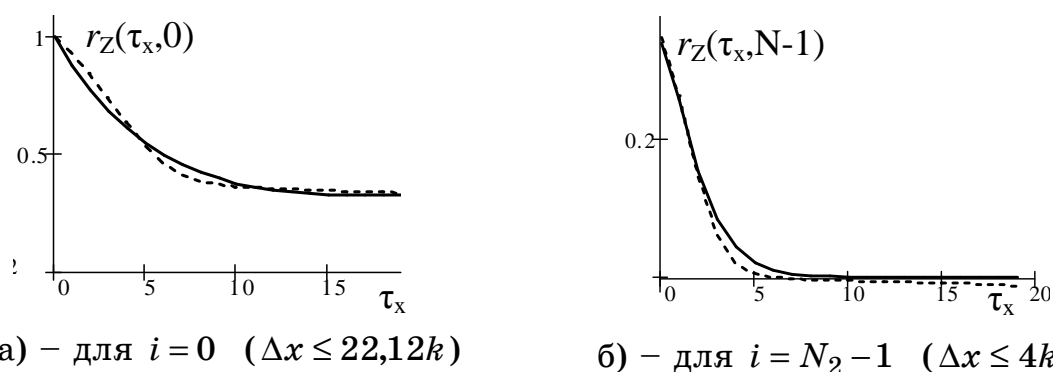


Рисунок 4 – Модели характерных параметров:

а) – влагосодержания почвы; б) – корреляционной функции

Аппроксимация сечений корреляционной функции по двум осям осуществлялась методом наименьших квадратов. Некоторые полученные зависимости приведены на рис. 5, рис. 6.



а) – для $i = 0$ ($\Delta x \leq 22,12k$)

б) – для $i = N_2 - 1$ ($\Delta x \leq 4k$)

Рисунок 5 – Аппроксимация сечений корреляционной функции по оси x

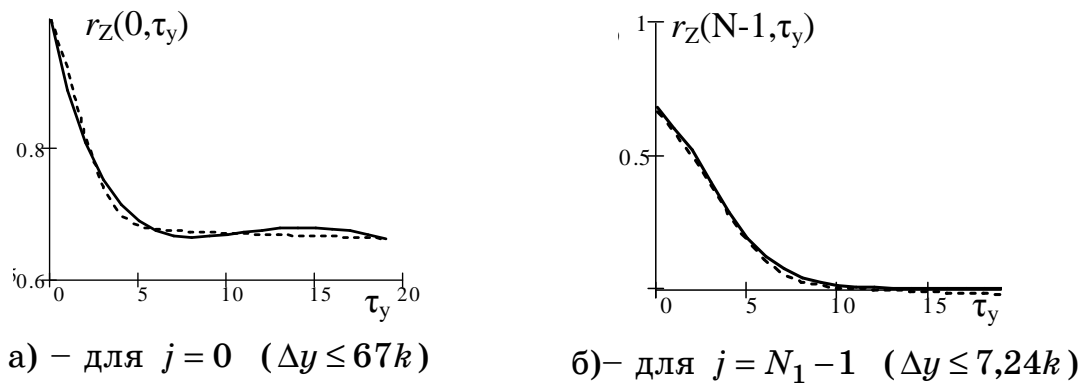


Рисунок 6 – Аппроксимация сечений корреляционной функции по оси y

Аналитические выражения для граничных (предельных) сечений корреляционных функций по двум осям получены в виде

$$r_Z(x, 0) = e^{-0,068x} \cdot (1 - 0,066x + 0,004x^2), \quad (13)$$

$$r_Z(x, N - 1) = e^{-0,875x} \cdot (0,338 + 0,273x + 0,0006x^2),$$

$$r_Z(0, y) = e^{-0,1y} \cdot (1 - 0,027y + 0,011y^2), \quad (14)$$

$$r_Z(N - 1, y) = e^{-0,76y} \cdot (0,681 + 0,37y + 0,23y^2).$$

На основе полученных аналитических зависимостей (13), (14) были определены максимальный и минимальный шаг по оси x и по оси y соответственно. При определении шага расположения датчиков влажности из соотношений (12) получилось, что $\Delta x \leq 4k$, а $\Delta y \leq 7,24k$.

Выводы

Применение динамической поверхностной модели позволяет оптимизировать схему размещения датчиков по территориально-распределенному объекту. Разработанная методика определения схемы оптимального размещения датчиков и периодичности их опроса на основе методов одномерного и двумерного спектрального анализа позволяет избежать информационной избыточности и упростить техническую реализацию контура идентификации состояния распределенного объекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рудакова А.В. Информационно-управляющая система для систем водораспределения / А.В. Рудакова, С.П. Шейник, О.В. Поливода // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2009. – №1(34). – С. 333–337.
2. Поливода О.В. Оптимизация управления влагообеспечением в ирригационных системах/ О.В. Поливода, А.В. Рудакова, С.П. Шейник // Международная научно-практическая конференция «Технические науки: современные проблемы и перспективы развития», 10 декабря 2012 г.: [материалы] / Приволжский научно-исследовательский центр. – Йошкар-Ола: Коллоквиум, 2013. – С. 120 – 123.
3. Поливода О.В. Использование непрерывных оболочек для моделирования влагосодержания почвы/ О.В. Поливода, С.П. Шейник, А.В. Рудакова // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2009. – №2(35). – С. 357–362.
4. Поливода О.В. Методы оперативного управления влагообеспечением в ирригационных системах с прогнозирующей моделью / О.В. Поливода, А.В. Рудакова // SAIT 2013: XV міжнародна науково-технічна конференція, Київ, 27-31 травня 2013 р.: тези доповідей. – К.: ННК «ІПСА» НТУУ «КПІ», 2013. – С.165.
5. Дмитриев В.И. Прикладная теория информации. – М.: Высшая школа, 1989. – 320 с.
6. Поливода О.В. Динамическая модель распределения влаги в пахотном слое/О.В. Поливода, Н.И. Рыженко, А.В. Рудакова // Вестник Херсонского национального технического университета.– 2010. – №3(39).– С. 374 – 380.
7. Дрейпер Н. Прикладной регрессионный анализ. Множественная регрессия / Н. Дрейпер, Г. Смит– 3-е изд.– М.:«Диалектика», 2007.– 912 с.

Eduard Bondarenko

**MODERN PARALLEL PROGRAMMING TOOLS FOR
SOLVING SYSTEM OF THE LINEAR EQUATIONS BY
CONJUGATE GRADIENT METHODS**

Annotation. The work is devoted to comparison the performance of programs which are executed on the CPU and GPU with shared memory space. OpenMP technology was used for increasing performance by parallelizing the code on the CPU. CUBLAS and OpenACC technologies were used for computing on the GPU. For performance tests several conjugate gradient methods for solving system of linear equations with the dense matrix were implemented. Within OpenMP technology, this paper contains a performance comparison of programs which were compiled using two compilers: PGCC and GCC. Also is viewed the performance boost through the use of the accelerator and various types of technologies for program acceleration. The primary purpose of this paper is to show the distinct advantages of using GPU-accelerator and make the conclusions associated with the use of various parallelization approaches.

Keywords: Accelerators; GPU; OpenACC; OpenMP; CUBLAS.

Introduction

In the development process of computer technology the idea of increasing the productivity of computer systems by increasing the number of processors was implemented more than one times. No exaggeration to say, that all history of the development of highly productive systems this history of implementations the ideas of parallel processing at a particular stage in the development of computer technology, of course, coupled with the increasing frequency of electronic circuits.

Today there are several approaches to increase the speed of data processing. They are classified by the type of devices, on which parallel computing are held.

The most common approach is to perform parts of code simultaneously on the multiple CPUs. OpenMP is the one of the most popular means of programming parallel applications for computers with shared memory. A sequential program is taken for basis, and for creating her

parallel version the user is given a set of directives, functions and environment variables. OpenMP technology is aimed at the opportunity to have one version of the program for parallel and sequential execution. Also an important advantage of this technology is the ability to incremental programming. Thus, not parallel part of the program is gradually decreased. That approach significantly facilitates the adaptation process of sequential programs for parallel computing as well as debugging and optimization.

But, restrictions on power consumption, heat release and fast approaching the physical limit of the transistor size are forcing researchers and manufacturers to seek a solution elsewhere.

Appearance on the market GPU with the programmable conveyor attracted the attention of many researchers to the possibility of using graphic devices not only for image rendering using OpenGL and DirectX. Because speed of performance of the arithmetic operations on the GPU was very high, results of the first experiments had predicted a bright future for GPU-computations. But the need to work within strict constraints on resources and programming methods was too serious obstacle to widespread acceptance of the technology.

Only with the advent of graphic devices from NVIDIA, which were built on the CUDA architecture and CUDA C compiler, programming on the GPU for the general purpose computing become much more affordable and accessible and thus covers the maximum number of developers.

This method of paralleling programs is less comfortable than OpenMP technology, but allows you to get a big performance boost by executing code on the video adapter. In this approach programmer needs to support both single-threaded and multithreaded versions of the codes.

OpenACC standard is a logical sequel of the development of heterogeneous software. Like OpenMP, he is based on the directive programming and therefore requires much less structural changes in the code, than low-level programming model on the display adapters (CUDA). In this approach, a developer can quickly determine the benefits of using the accelerator.

Today standard OpenACC has support in such commercial compilers as: PGI Accelerator C/C++ and Fortran [13], Cray CCE compilers for Cray systems [14], CAPS compilers [15]. There is a free version of the

OpenACC compiler – accULL [16]. Unfortunately the latter is not fully support standard OpenACC 1.0 [9], therefore not considered in this paper.

Problem Definition

Currently, parallelism is the main trend of the development of computer technology: any modern computer consists of several cores on the central processors and several hundred cores on the graphics processors. Development of the technologies is determines the development of numerical algorithms: more time is devoted to parallel numerical methods. Now, any algorithm is viewed through the prism of his ability to parallelization.

Partial differential equations is a widely used mathematical apparatus in different areas of science and technology. Unfortunately, the explicit solution of these equations in analytical form is only possible in special simple cases. Thus the possibility to analyze the mathematical models which are based on a large number of differential equations is provided by means of approximate numerical methods. The volume of the computation in this area of computational mathematics usually is very significant so the traditional approach in this case is to use high performance parallel computer systems.

Conjugate gradient methods are among the most efficient methods for solving the linear systems. The aim of this work is a consideration of several types of gradient methods for solving SLAE and consideration the range of issues, related to their parallelization on the CPU and GPU with usage of two compilers.

During the development of a parallel version of the conjugate gradient method for solving SLAE keep in mind, that the execution of the iterations performed sequentially, therefore, the most appropriate approach is to parallelize computations, implemented in the course of iterations.

Main Results

Common Details

Three conjugate gradient methods for solving SLAE with 10 000 double-precision variables were used for getting results in this work:

- Conjugate Gradient [2]
- Conjugate Gradient Squared [3]
- Generalized Product Bi-Conjugate Gradient [4]

The values presented in the matrix were generated symmetrically in range from 0 to 1. During computing two criteria were used for stopping: by accuracy (1) with parameter $E = 10^{-6}$ and by count of iterations.

$$\|x^{(s)} - x^{(s-1)}\| < E \quad (1)$$

The second criterion is determined by the maximum number of iterations N , to which the researcher is ready to go. If the number of iteration, which must be performed, is greater than N , iteration will not be executed, method finishes the work, vector $X(N)$ is interpreted as an approximate solution of the system.

Calculations were performed using infrastructure which is specified in Table I.

The simple Conjugate Gradient method requires 13 iterations for solving system of the linear equations. Stabilized Conjugate Gradient method requires 8 iterations. Generalized Product Bi-Conjugate Gradient method is more efficient than other methods, thus requires only 7 iterations.

Results of experiments are given in Table II, Table III, Table IV, Table V (running time of the algorithms is presented in seconds).

Table I

Infrastructure of the computer

Processor	Intel i5-3350P CPU @ 3.10GHz
RAM	8Gb
Graphic adapter	NVIDIA GeForce GTX 650 Ti 1Gb
Operating system	Windows 7
Compiler, debugger	cuda compilation tools 5.5 pgcc 13.10-0 64-bit gcc version 4.8.1
Math library	CUBLAS

Several compilers have been used at the work for completeness of the tests.

Comparison of PGCC and GCC Compilers

At the time of writing article, GCC was not support OpenACC standard, so it was used for comparing with PGCC compiler exclusively within the OpenMP technology.

From the data, specified in the Table II, Table III, we can conclude that the PGCC compiler much better optimizes the code of the program, which compiled without optimization, thereby increasing his productivity.

Using the PGCC compiler by developer, allows up to three times increasing the speed of the program, without optimization.

Table IV and Table V show that PGCC compiler optimizes the code two times better, than GCC in case of using optimization.

Table II

PGCC Compiler Without Optimization (seconds)

Method	1	2	3	4	5
CG	1.9562	1.0139	0.7051	0.6645	4.5490
CGS	2.4788	1.3258	1.0261	0.9558	4.5873
GPBiCG	2.2527	1.1407	0.7958	0.7053	6.0232

Table III

GCC Compiler Without Optimization (seconds)

Meth od	1	2	3	4	5
CG	5.7391	3.2139	2.3024	1.8460	1.8702
CGS	7.2587	3.9506	2.6844	2.1637	2.2199
GPBi CG	6.3615	3.4349	2.3929	1.9034	1.9436

Table IV

PGCC Compiler High Level Speed Optimization (seconds)

Method	1	2	3	4	5
CG	0.9439	0.6086	0.5702	0.5748	1.1577
CGS	1.1968	0.7517	0.7148	0.7263	1.3382
GPBiCG	1.0511	0.6751	0.6387	0.6453	1.4470

Table V

GCC Compiler High Level Speed Optimization (seconds)

Method	1	2	3	4	5
CG	1.6130	1.1045	0.9156	0.8798	0.8971
CGS	1.9874	1.2199	0.9593	0.9469	0.9813
GPBiCG	1.7658	1.0856	0.8765	0.8767	0.8766

Working time of program which uses five threads is increased. This explained by the insufficient computational load, which falls on each processor. It's disadvantageous to use more than four threads for this task on quad-core processor.

Despite the fact that PGCC compiler is generating faster code, execution of the program which was compiled by this compiler, on the five threads takes more time, than execution of program which was compiled using GCC. Perhaps, PGCC adapts the code to the physical number of processors in the system, thereby increasing speed of his work.

Comparison of OpenMP and OpenACC Technologies

The diagram Fig. 1 shows the work of the programs that are running on the CPU with usage several cores and the work of program that

is running on the graphic adapter. The diagram clearly shows, how program, written by using OpenACC is working faster, than her analogues, which are running on the central processor. Transferred into hardware thread scheduler, faster memory and more homogeneous processor provide an opportunity to get a big performance boost by using such type of accelerator. The bottleneck in this approach is the copying the data for processing to the device and back into memory. Thus, to get the maximum performance necessary to reduce the number of copy operation.

In the program, the results of which are shown above at the diagram, copying data occurs two times, at the beginning of work, to download initial data and upon completion, to obtain the result.

Unfortunately, memory of graphic adapter allows carrying out calculations only with 10 000 double-precision variables. When solving linear algebraic equations with more number of unknowns, increment of productivity in computations on the accelerator will be more explicit.

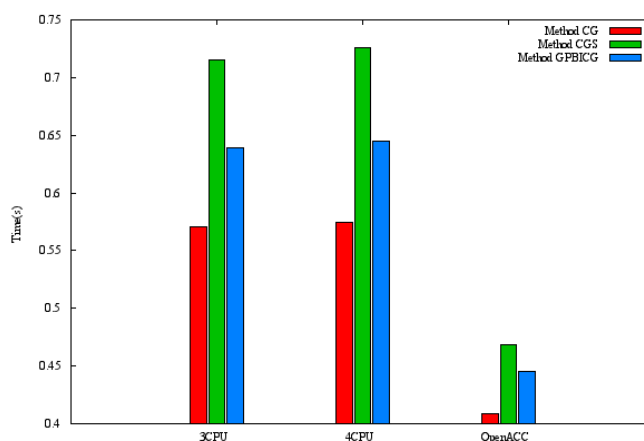


Figure 1 - Comparison of the computation time on the CPUs and GPU with usage OpenMP and OpenACC technologies

Comparison of OpenACC and CUBLAS Technologies

Testing several approaches of the programming on the graphic cards is concluded in comparing the performance of the program written using the mathematical library CUBLAS with the program, which uses standard OpenACC.

The results are shown in the diagram Fig. 2.

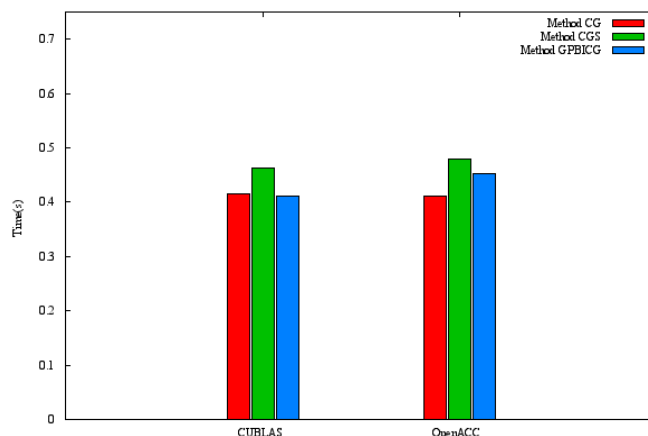


Figure 2. - Comparison of the computation time on the GPU with usage OpenACC and CUBLAS technologies

As expected, the work time of programs is approximately the same. Slight increase in operating time when using OpenACC is that the program is adapted for implementation in single-threaded mode on the CPU, and for multithreaded execution on the graphics card. In the latter case, the memory for working on the CPU will be allocated even if you use the version of the program, which running on the accelerator. If desired, the code of memory allocation can be enclosed in preprocessor directives, thereby to leave from unclaimed calls of allocator.

Using CUBLAS technology is time-consuming to change the code and to debug the application, therefore less justified than usage a high-level directive-based approach OpenACC.

CONCLUSIONS

The results of the study were shown that by count of iterations the generalized product bi-conjugate gradient method is the most effective method of solving the system of linear equations with dense matrix. But, by performance time, the usual method of conjugate gradients proved to be the fastest. Despite the fact that he is solving SLAE, using more number of iterations, than other methods, unlike them he is simpler and contains fewer operations with matrices and vectors. This leads to better optimization and increases the speed of work. In this paper was observed that the application of OpenMP for parallelization of computation allows not only create and support parallel versions of programs, with great convenience, but also allows increasing their performance. In this case, the performance boost was 40 percent. Modification of the existing program on OpenACC technology required minimum cost and gave

30 percent increase in productivity in comparison with the program on OpenMP.

Usage of OpenACC allows getting away from low-level API, thereby focusing developer's attention on the program's logic and saving time at debugging. In addition, the programmer receives the adapted program for various accelerators, whose support is included in the standard.

Importantly note that the use of various types of accelerators gives a performance boost only in case, if the work with the data takes much longer than copying them from the host to the device.

REFERENCES

1. Richard Barrett, Michael W. Berry, Tony F. Chan, James Demmel, June Donato, Jack Dongarra, Victor Eijkhout, Roldan Pozo, Charles Romine, Henk van der Vorst, "Templates for the Solution of Linear Systems: Building Blocks for Iterative Methods" SIAM, (1994).
2. M. Hestenes and E. Stiefel, Methods of conjugate gradients for solving linear systems, J. Res. Nat. Bur. Stand., 49 (1952).
3. P. Sonneveld, CGS, a fast Lanczos-type solver for nonsymmetric linear systems, SIAM J. Sci. Statist. Comput., 10 (1989).
4. S. L. Zhang, GPBi-CG: Generalized Product-type Methods Based on Bi-CG for Solving, Nonsymmetric Linear Systems. SIAM J. Sci. Comput., 18 (1997).
5. The Portland Group. PGI Accelerator Programming Model for Fortran & C, v1.3 (2010).
6. NVIDIA. CUDA C Programming Guide, v4.6 (2012).
7. PGI® Compiler User's Guide Parallel Fortran, C and C++ for Scientists and Engineers (2013).
8. PGI Accelerator Compilers OpenACC Getting Started Guide, v13.2 (2012-2013).
9. The OpenACC Application Programming Interface, v1.0 (2011). Available: <http://www.openacc-standard.org>
10. OpenMP Application Program Interface, v3.0 (2008).
11. Tutorial for studying courses "Parallel processing" and "Computing languages and cluster systems" M. M. Yas'ko – DNU, 2010.
12. CUDA CUBLAS Library (2007).
13. PGI Compilers & Tools <http://www.pgroup.com/index.htm>
14. Cray compilers <http://www.cray.com/Home.aspx>
15. CAPS compilers <http://www.caps-entreprise.com>
16. Acc ULL compiler <http://accull.wordpress.com>

АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ДВУХЭТАПНОЙ ЗАДАЧИ РАЗМЕЩЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВА С ПРЕДПОЧТЕНИЯМИ

Аннотация. В статье рассмотрена двухэтапная задача размещения производства с предпочтениями. Сформулирована математическая модель. Предложен алгоритм решения, основанный на генетическом алгоритме и методе потенциалов. Представленный алгоритм апробирован на модельной задаче.

Ключевые слова: задачи размещения-распределения, многоэтапные задачи размещения, генетический алгоритм, оптимизация, задачи размещения с предпочтениями.

Введение

Задачи оптимального размещения предприятий на заданной территории исследуются уже более ста лет, оставаясь в центре внимания многих исследователей, что подтверждается большим количеством публикаций, посвященных этой проблеме [1]. Такие задачи возникают при стратегическом планировании развития региона, представляют интерес для коммерческих (размещение складов, магазинов, точек обслуживания и пр.) и государственных (школы, больницы, пожарные станции и пр.) компаний и потому представляют практический интерес. В общем случае задачу размещения можно описать следующим образом: необходимо определить оптимальное, согласно некоторому критерию качества, расположение объектов, удовлетворяющих требования клиентов, и обеспечить выполнение заданных ограничений. Соответствующие математические модели могут быть описаны как в дискретной так и в непрерывной постановке [1, 2].

В данной работе рассмотрена двухэтапная задача размещения предприятий. Следует заметить, что существует целый ряд областей, где возникают задачи такого вида, поскольку они отображают последовательные процессы выпуска одного вида продукции, доставки его в промежуточные пункты и, затем, доставки ее конечным потребителям. В самых простых постановках таких задач рассматриваются два

продукта – “сырье” и “готовый продукт”, но возможно и большее число наименований: “сырье”, “полуфабрикат”, “готовый продукт”. Одним из примеров двухуровневого производственного процесса является добыча и обработка природного сырья – нефти, руды и т. п. Многоэтапные задачи размещения производства рассматривались в [1,3,4,5].

Формулировка задачи

Содержательную постановку многоэтапной задачи размещения производства можно сформулировать следующим образом: необходимо разместить производство, включающее в себя предприятия I этапа и предприятия II этапа в области, таким образом, чтобы суммарные затраты на доставку сырья и продукции были минимальны. Предполагается, что места возможного расположения предприятий I и II этапов, а также места расположения потребителей заранее известны.

Для построения математической модели введем следующие обозначения: Ω – область, в которой размещаются предприятия; N – необходимое количество предприятий I этапа; M_1, M_2 – множество возможных мест размещения предприятий I этапа и II этапа соответственно; K – множество потребителей; c_{ij}^I – стоимость доставки единицы сырья от i -го предприятия I этапа к j -му предприятию II этапа; c_{jk}^{II} – стоимость доставки от j -го предприятия II этапа к k -му потребителю; b_k – спрос k -го потребителя; A^r – затраты на установку i -го предприятия r -го этапа; v_{ij}^I – объём продукции доставляемой от i -го предприятия I этапа к j -му предприятию II этапа; v_{jk}^{II} – объём продукции доставляемой от j -го предприятия II этапа к k -му потребителю.

Положим

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{если в пункте } i \text{ размещается предприятие I-го этапа,} \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

$$\lambda_j = \begin{cases} 1, & \text{если в пункте } j \text{ размещается предприятие II-го этапа,} \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Тогда математическая модель может быть записана в виде:

Минимизировать

$$\sum_{i \in M_1} A_i^I x_i + \sum_{j \in M_2} A_j^II \lambda_j + \sum_{i \in M_1} \sum_{j \in M_2} c_{ij}^I v_{ij}^I + \sum_{j \in M_2} \sum_{k \in N} c_{jk}^II v_{jk}^II \quad (1)$$

при ограничениях

$$\sum_{j=1}^M v_{ij}^I \lambda_j = b_i^I, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N v_{ij}^I = b_j^II, \quad j = 1, 2, \dots, M. \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^M v_{jk}^II \lambda_j = b_k, \quad k = 1, 2, \dots, K, \quad (4)$$

$$v_{ij}^I \geq 0, \quad v_{jk}^II \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad j = 1, 2, \dots, M, \quad k = 1, 2, \dots, K, \quad (5)$$

$$x_i \in \{0; 1\}; \lambda_j \in \{0; 1\}, \quad (6)$$

Здесь ограничения (2) означают, что количество продукта, вывезенного из i -го предприятия I этапа должно соответствовать производственной мощности этого предприятия, ограничения (3), (4) – обеспечивают удовлетворение спроса предприятий II этапа и потребителей.

Подобная задача в дискретной постановке при наличии двух этапов на цепи рассматривалась в [4], методы решения сходных по постановкам задач были также рассмотрены в [1]. В работе [3], был предложен подход для решения задачи оптимального размещения, основанный на последовательном решении задачи ОРМ [2] и задачи в (1) – (6). Однако, при этом было выявлено, что для размещения предприятий I этапа выбираются ближайшие по расстоянию (стоимости) возможные места расположения по отношению к предприятиям II этапа без учета «качества» этих мест (рис. 1). Этот результат оправдан, если все возможные пункты размещения равноценны, однако если их «качество» различно, то полученный результат нельзя считать приемлемым. Таким образом, возникает необходимость учитывать различия между возможными местами размещения. Один из подходов к решению этой задачи, основанный на использовании теории игр, был предложен Бересневым В.Л. в работе [6].

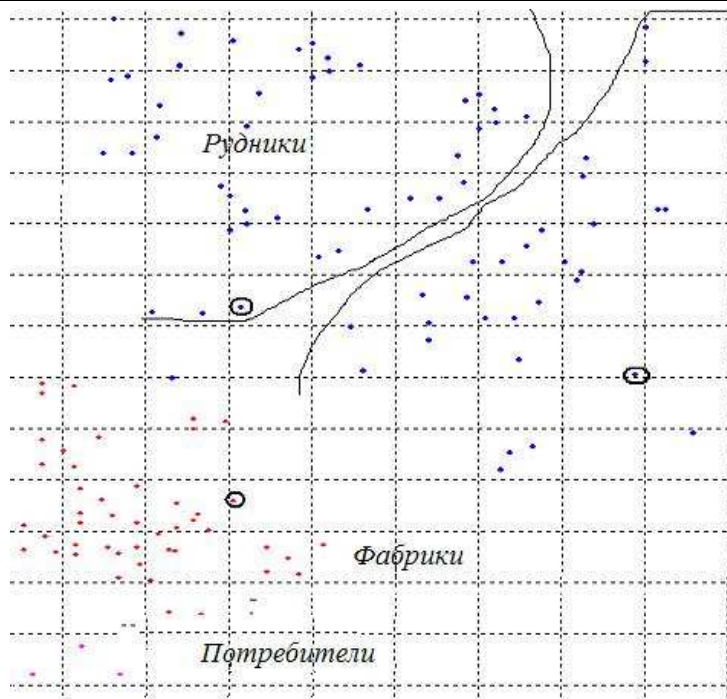


Рисунок 1 – Размещение обогащительного производства

Основная часть

В данной работе предлагается ввести коэффициенты «качества» β_i возможных мест размещения для учета предпочтений мест размещения предприятий. И решать задачу вида:

Минимизировать

$$\sum_{i \in M_1} A_i^I x_i + \sum_{j \in M_2} A_j^{II} \lambda_j + \sum_{i \in M_1} \sum_{j \in M_2} \beta_i c_{ij}^I v_{ij}^I + \sum_{j \in M_2} \sum_{k \in N} c_{jk}^{II} v_{jk}^{II}, \quad (7)$$

при ограничениях (2) – (6).

Для решения этой задачи предлагается алгоритм, основанный на генетическом алгоритме и методе потенциалов.

Алгоритм

1. Выбор начальной популяции состоящей из массивов с возможным начальным размещением предприятий I и II этапов.
2. Расчет расстояний от предприятий I этапа до предприятий II этапа и от предприятий II этапа до потребителей.
3. Решение транспортной задачи методом потенциалов для выбранных мест размещения предприятий I и II этапов.
4. Расчет значения целевой функции по формуле (7).

5. Сохранение в массив памяти лучшего значение целевого функционала и соответствующих номеров предприятий.

6. Выбор «родителей», кроссовер, а также мутация новых возможных вариантов размещения.

7. Повторение пунктов 2 – 4 для нового решения.

8. Добавление в массив памяти нового решения и удаление – худшего.

9. Проверка критерия окончания: если «да» – переход к следующему пункту, в противном случае возврат к пункту 6.

10. Вывод лучшего результата и графика.

Алгоритм описан.

Предложенный алгоритм был численно реализован и апробирован на следующей модельной задаче:

Пусть потребитель некоторой продукции находится в области $\Omega = \{(x, y) | 0 \leq x \leq 30, 10 \leq y \leq 30\}$. Координаты расположения потребителей известны. Производство продукции осуществляется в два этапа. Экспертами определены возможные места размещения предприятий I и II этапов: $M_1 = \{\tau_1^I, \tau_2^I, \dots, \tau_{20}^I\}$, $M_2 = \{\tau_1^{II}, \tau_2^{II}, \dots, \tau_{20}^{II}\}$ и оценено качество возможных мест размещения предприятий I этапа по 10-бальной шкале: $\alpha = \{4, 8, 1, 8, 3, 3, 8, 1, 7, 9, 3, 8, 6, 2, 3, 3, 8, 10, 4, 9\}$, где 1 – наименее предпочтительное место размещения, 10 – наиболее предпочтительное. Известны также мощности предприятий каждого этапа: $b^I = \{50, 150, 150, 100, 50, 100\}$ и $b^{II} = \{100, 200, 250, 50\}$ и спрос потребителей $b = \{100; 100; 100; 150; 50; 100\}$. Необходимо разместить 6 предприятий I этапа и 4 предприятия II этапа с учетом расположения 6 потребителей и определить объемы перевозок продукции на каждом из этапов таким образом, чтобы минимизировать функционал суммарных затрат на производство продукции и доставку ее потребителям:

$$F = \sum_{i=1}^{M_1} \sum_{j=1}^{M_2} \beta_i c^I_{ij} v^I_{ij} x_i + \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{M_2} c^{II}_{jk} v^{II}_{jk} \lambda_j$$

при условиях (6) – (8).

Для решения сформулированной задачи был применен алгоритм, описанный выше. В качестве критерия остановки было выбрано время работы программы $T = 30$ сек.

В табл. 1 и на рис. 2 представлены результаты работы алгоритма. Звездочками обозначены возможные места размещения предприятий I этапа (r_i) и соответствующие им оценки α_i , кругами – возможные места размещения предприятий II этапа (f_j), квадратами – места расположения потребителей (p_k). Выбранные места размещения предприятий выделены.

Полученные результаты показали, что решение двухэтапной задачи размещения дает достаточно качественное решение и такой метод решения в дальнейшем может быть применен.

Таблица 1

Численные результаты вычислений с помощью алгоритма 1 при наличии коэффициента «качества»

Предприятия I этапа			Предприятия II этапа			Потребители	
Координаты точки размещения	Объем перевозок I этапа	Мощность	Координаты точки размещения	Объем перевозок II этапа	Мощность	Координаты точки размещения	Спрос
(6, 23)	50	50	(9, 13)	100	100	(9, 10)	100
(26, 20)	100	150	(23, 11)	50	250	(25, 10)	100
(26, 20)	50	150	(26, 11)	50	50	(25, 10)	100
(21, 25)	150	150	(17, 12)	150	200	(19, 17)	150
(27, 23)	50	100	(17, 12)	50	200	(16, 10)	50
(27, 23)	50	100	(23, 11)	100	250	(24, 1)	100
(13, 25)	50	50	(9, 13)	100	100	(9, 10)	100
(29, 21)	100	100	(23, 11)	100	250	(14, 2)	100
Целевая функция					10815,2		

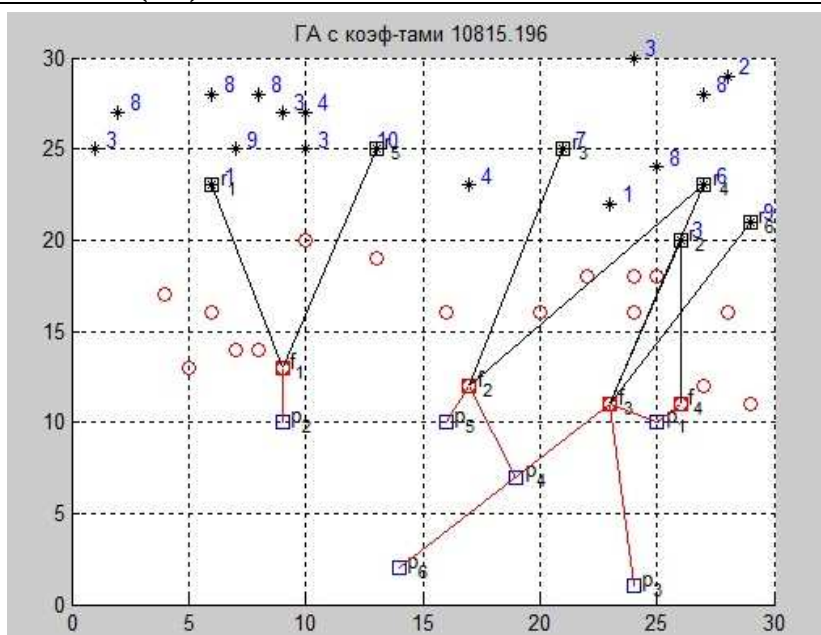


Рисунок 2 – Результат решения модельной задачи при наличии коэффициента «качества»

Для сравнения, эта задача была решена без учета качества возможных мест размещения предприятий I этапа. В табл. 2 и на рис. 3 представлены результаты работы алгоритма при условии равнозначности возможных мест размещения предприятий первого этапа.

Таблица 2

Численные результаты вычислений с помощью алгоритма 1 при отсутствии коэффициента «качества»

Предприятия I этапа			Предприятия II этапа			Потребители	
Координаты точки размещения	Объем перевозок I этапа	Мощность	Координаты Точки размещения	Объем перевозок II этапа	Мощность	Координаты точки размещения	Спрос
(10, 25)	50	50	(9, 13)	100	200	(9, 10)	100
(6, 23)	150	150	(9, 13)	100	200	(14, 2)	100
(26, 20)	150	150	(24, 16)	100	250	(25, 10)	100
(29,21)	50	100	(24, 16)	50	250	(24, 1)	100
(29,21)	50	100	(28, 16)	50	50	(24, 1)	100
(23, 22)	50	50	(24, 16)	100	250	(19, 7)	150
(17, 23)	100	100	(17, 12)	50	100	(19, 7)	150
(17, 23)	100	100	(17, 12)	50	100	(16, 10)	50
Целевая функция			9905				

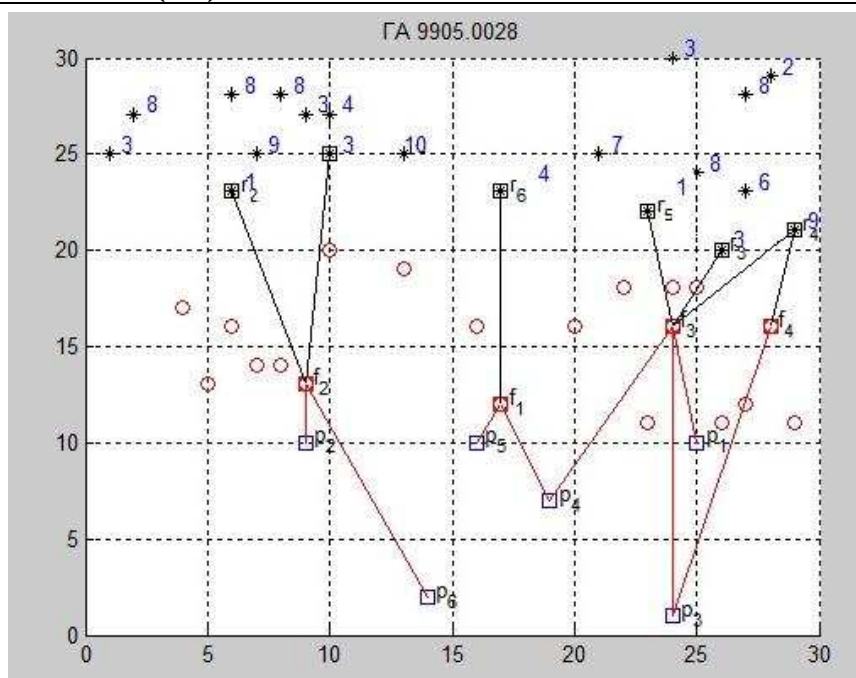


Рисунок 3 - Результаты вычислений
с помощью без учета «качества» мест размещения

Как видно из результатов численных экспериментов, использование коэффициентов качества, позволяет учитывать предпочтения при размещении предприятий.

Выводы

Двухэтапные задачи размещения предприятий является актуальными, поскольку открывают возможность для развития новых методов моделирования, инновационных алгоритмов решений и интересных приложений. В данной работе сформулирована математическая модель двухэтапной задачи размещения-распределения с предпочтениями и предложен алгоритм ее решения, основанный на генетическом алгоритме и методе потенциалов. Проведенные численные эксперименты позволяют говорить о возможности применения предложенного алгоритма.

ЛИТЕРАТУРА

1. R.Z. Farahani, «Facility Location: Concepts, Models, Algorithms and Case Studies» / R.Z. Farahani, M. Hekmatfar // Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2009, p 549
2. Киселева Е.М. Шор Н.З. Непрерывные задачи оптимального разбиения множеств: теория, алгоритмы, приложения: Монография – К.: Наукова Думка 2005 – 564 с.
3. Ус С.А. Про один підхід до розв'язання задачі оптимального розміщення збагачувального виробництва / С.А. Ус // «Інформаційні технології та інформаційна безпека в науці, техніці та навчанні «Інфотех-2011». Матеріали міжнародної науково-практичної конференції (Севастополь, 05–10 вересня 2011р). С. 118 – 119.
4. Гимади Э.Х, Эффективные алгоритмы для решения многоэтапной задачи размещения на цепи / Э.Х Гимади // Дискретный анализ и исследование операций, Октябрь—декабрь 1995. Том 2, № 4, с 13-3
5. Us S., Multi-stage problem of concentration plant location / S.Us, O.Stanina // Computer Science & Engineering: Proceedings of the 6th International Conference of Young Scientists CSE-2013. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2013., pp 130 – 131.
6. Береснев В.Л., Верхние оценки для целевых функций дискретных задач конкурентного размещения предприятий, / В.Л Береснев // Дискретный анализ и исследование операций, Июль-август 2008. Том 15, № 4. с 3 – 24

УДК 004.032.26

Е.В. Бодянский, Е.А. Винокурова, П.П. Мулеса, И.Г. Перова

**ДИАГНОСТИРУЮЩАЯ НЕЙРО-ФАЗЗИ-СИСТЕМА
И ЕЕ АДАПТИВНОЕ ОБУЧЕНИЕ
В ЗАДАЧАХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ
МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Аннотация. Интеллектуальный анализ данных является мощным инструментарием при решении широкого спектра задач, и прежде всего диагностирования, классификации, распознавания образов и т.п. В статье предложена диагностирующая нейро-фаззи система для ситуаций, когда размерность входных сигналов имеет один порядок с объемом обучающей выборки, а сами данные поступают на вход системы в последовательном on-line режиме.

Ключевые слова: нейро-фаззи-система, адаптивное обучение, интеллектуальная обработка данных, медико-биологическая диагностика

Введение

Для решения широкого круга задач интеллектуального анализа данных (Data Mining), связанных прежде всего, с диагностикой, классификацией, распознаванием образов и т.п., все чаще используется искусственные нейронные сети (ANN) [1], благодаря их универсальным аппроксимирующим возможностям и способности обучения по имеющимся экспериментальным данным. И хотя для решения подобных задач наибольшее распространение получил классический многослойный персептрон (MLP), нельзя не отметить такие его основные недостатки, как достаточно большой объем обучающей выборки, низкая скорость сходимости процесса обратного распространения ошибок, необходимость использования большого количества эпох обучения. И если сугубо вычислительные проблемы можно обойти, необходимость наличия репрезентативной обучающей выборки существенно осложняет использование этой нейронной сети при решении многих практических задач. Особенно остро эта проблема возникает в медико-биологических исследованиях, где выборка данных короткая

© Бодянский Е.В., Винокурова Е.А., Мулеса П.П., Перова И.Г., 2014

и при этом объект описывается множеством разноплановых характеристик [2, 3].

В данной ситуации более предпочтительными представляются радиально-базисные нейронные сети (RBFN) [1], чей выходной сигнал линейно зависит от настраиваемых синаптических весов. Это обстоятельство позволяет использовать для обучения этих сетей широкий арсенал хорошо известных подходов, от стандартного метода наименьших квадратов до популярных алгоритмов линейной адаптивной идентификации [4]. И хотя специфика задач диагностики-классификации ограничивает возможности использования традиционного квадратичного критерия обучения, применение специализированного критерия Дж. Шинка [5], ориентированного на задачи распознавания образов с двоичным обучающим сигналом, позволило синтезировать достаточно простую и эффективную диагностирующую радиально-базисную нейронную сеть [6, 7].

Несмотря на все свои достоинства, радиально-базисные сети все же не являются панацеей, поскольку их возможности ограничиваются, так называемым, «проклятием размерности», ведущему к экспоненциальному росту числа настраиваемых синаптических весов в зависимости от размерности пространства входных сигналов-образов.

Для преодоления этой проблемы чаще всего используется процедура предварительной установки центров радиально-базисных функций с помощью того или иного метода кластеризации. Таким образом, контролируемое обучение сети дополняется самообучением ее центров, что делает такое обучение излишне громоздким. В [8] для решения задач обработки текстовых документов в рамках проблемы Text Mining, характеризующейся высокой размерностью входных сигналов, была введена иерархическая радиально-базисная нейронная сеть с многослойной архитектурой, в каждом узле использующая обычную RBFN, на вход которой подается только некоторая часть признаков, что позволило преодолеть проблему «проклятия размерности». Главное, что удалось добиться в данной ситуации – это возможность работы в условиях, когда размерности входных образов соизмеримы с объемом обучающей выборки. Вместе с тем, нельзя не отметить громоздкость этой системы, невозможность работы в последовательном on-line режиме, высокий уровень субъективизма при разби-

нии входного образа на множество подвекторов-входов для каждого узла сети.

Так или иначе, проблема обработки данных с высокой размерностью вектора признаков в условиях, когда объем обучающей выборки соизмерим с этой размерностью, представляет несомненный интерес и особенно для задач классификации и диагностики для Text Mining, Web Mining, медико-биологических приложений.

Весьма перспективным здесь представляется использование нейро-фаззи-систем (NFS) [9], которые наряду с аппроксимирующими возможностями и способностью к обучению, позволяет обеспечить лингвистическую интерпретацию результатов. Нельзя также не отметить и их эквивалентность с точки зрения получаемых результатов радиально-базисным нейронным сетям [10], что позволяет использовать для их обучения те же алгоритмы, что и в RBFN. Синтезу такой диагностирующей нейро-фаззи системы для ситуаций, когда размерность входных сигналов имеет один порядок с объемом обучающей выборки, а сами данные поступают на вход системы в последовательном on-line режиме, посвящена настоящая статья.

Архитектура диагностирующей нейро-фаззи системы

Архитектура рассматриваемой NFS приведена на рис. 1 и состоит из шести последовательно соединенных слоев. На входной (нулевой, рецепторный) слой NFS подается $(n \times 1)$ -мерный вектор входных сигналов-образов $x(k) = (x_1(k), x_2(k), \dots, x_n(k))^T$, где $k = 1, 2, \dots, N$ - номер наблюдения в исходном массиве данных. При этом предполагается, что все компоненты $x_i(k)$ предварительно преобразованы так, что

$$0 \leq x_i(k) \leq 1, \quad \forall i = 1, 2, \dots, n,$$

а двоичные входные признаки принимают значения 0 или 1.

Первый скрытый слой содержит nh функций принадлежности $\mu_{li}(x_i(k))$, $i = 1, 2, \dots, n$; $l = 1, 2, \dots, h$ и выполняет фаззификацию входных переменных, при этом чем большее число h , тем лучше аппроксимирующие свойства NFS, хотя для двоичных признаков достаточно иметь и $h = 2$.

Второй скрытый слой производит агрегирование уровней принадлежности, вычисленные в первом слое, и состоит из h блоков умножения Π .

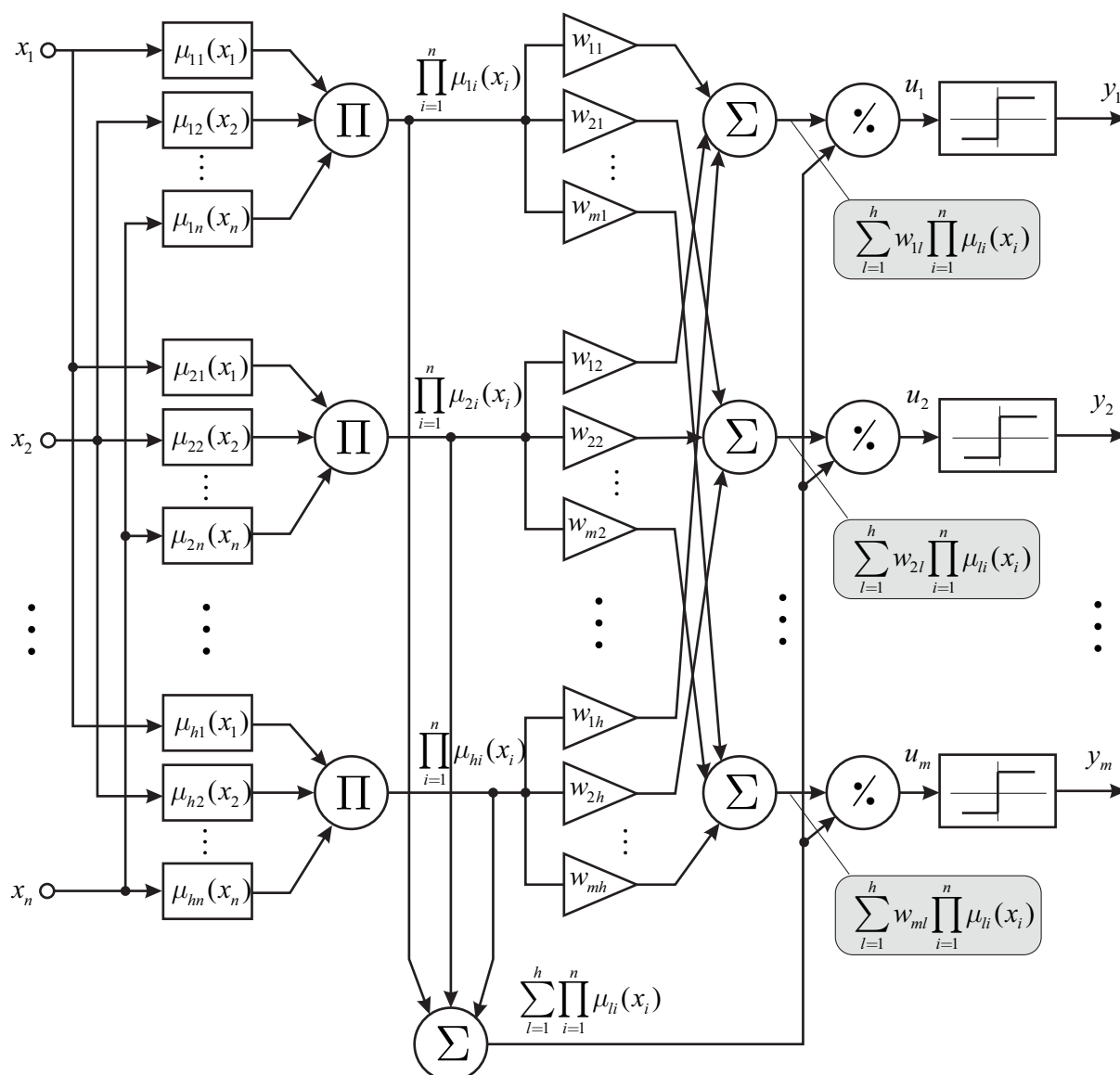


Рисунок 1 – Диагностирующая нейро-фаззи система

Третий скрытый слой – это слой синаптических весов $w_{jl}, j = 1, 2, \dots, m$, подлежащих обучению в процессе обучения. Рассматриваемая NFS содержит mh настраиваемых весов, где m – количество возможных классов-диагнозов, по одному на каждый выход системы. Понятно, что $mh \ll e^n$, т.е. количество весов NFS существенно меньше числа весов RBFN.

Четвертый скрытый слой образован $m+1$ сумматорами Σ , вычисляющих суммы сигналов на выходах второго и третьего скрытых слоев.

В пятом скрытом слое, образованном m блоками деления \cdot/\cdot , производится нормализация выходных сигналов четвертого слоя.

И, наконец, выходной (шестой) слой содержит m нелинейных активационных функций, при этом в задачах диагностики целесообразно использование простейших сигнум-функций, принимающих значение $+1$ в случае правильного диагноза и -1 - в противном случае. Таким образом выходные сигналы системы $y_j(k)$ могут принимать только два значения ± 1 .

Таким образом, при подаче на вход NFS векторного сигнала $x(k)$, элементы первого слоя вычисляют уровни принадлежности $\mu_{li}(x_i(k))$, при этом обычно в качестве функций принадлежности используются колоколообразные (ядерные) конструкции с нестрогим локальным рецепторным полем, что позволяет избежать возникновения «дыр» в фаззифицированном пространстве [11]. Чаще всего – это традиционные гауссианы

$$\mu_{li}(x_i(k)) = \exp\left(-\frac{(x_i(k) - c_{li})^2}{2\sigma_i^2}\right), \quad (1)$$

где c_{li} - параметр центра (в простейшем случае центры равномерно размещаются на интервале $[0,1]$ с шагом $(h-1)^{-1}$), σ_i - параметр ширины, выбираемый эмпирически или настраиваемый с помощью обратного распространения ошибок [12]. На рис. 2 показан вид таких функций принадлежности.

Понятно, что для двоичных переменных $x_i(k)$ достаточно всего двух треугольных функций принадлежности

$$\begin{cases} \mu_{1i}(x_i(k)) = 1 - x_i(k), \\ \mu_{2i}(x_i(k)) = x_i(k), \end{cases} \quad (2)$$

приведенных на рис. 3.

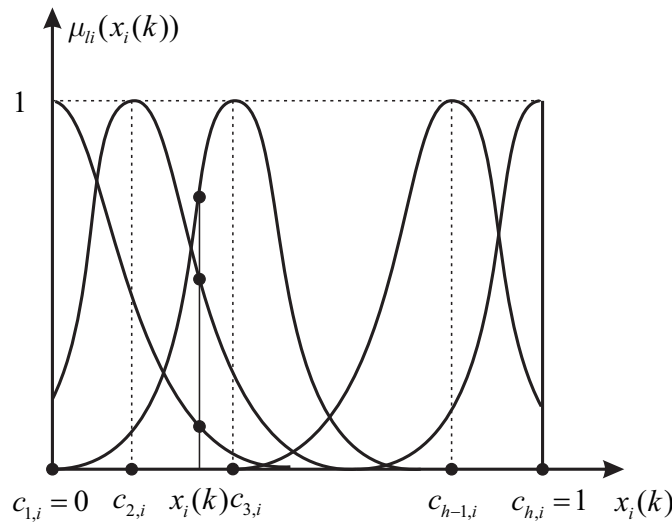


Рисунок 2 – Колоколообразные функции принадлежности

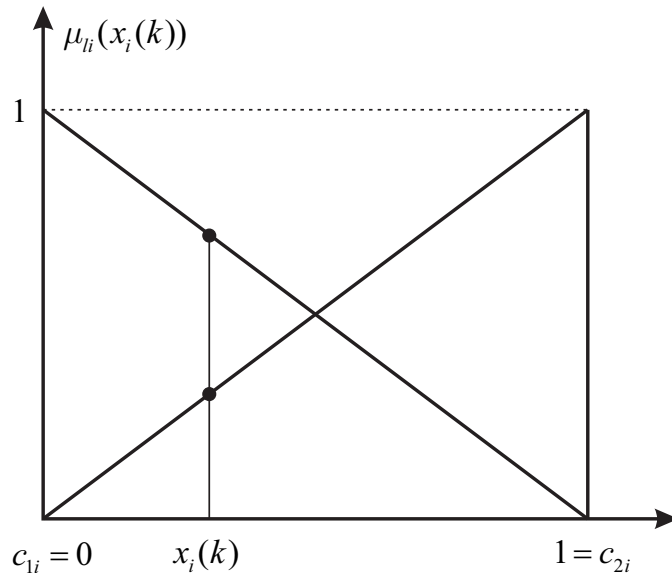


Рисунок 3 – Функции принадлежности для двоичных переменных

Заметим также, что функции принадлежности (2) в ряде случаев с успехом могут быть использованы и для признаков, принимающих произвольное количество значений (см. рис. 3), а число настраиваемых синаптических весов принимает минимально возможное значение $2m$.

На выходах второго скрытого слоя появляются агрегированные значения $\prod_{i=1}^n \mu_{li}(x_i(k))$, при этом несложно заметить, что, если параметры ширины σ_i одинаковы для всех признаков, т.е. $\sigma_i = \sigma$, то

$$\prod_{i=1}^n \mu_{li}(x_i(k)) = \prod_{i=1}^n \exp\left(-\frac{(x_i(k) - c_{li})^2}{2\sigma^2}\right) = \exp\left(-\frac{\|x_i(k) - c_{li}\|^2}{2\sigma^2}\right),$$

(здесь $c_l = (c_{l_1}, c_{l_2}, \dots, c_{l_n})^T$), т.е. реализуется нелинейное преобразование аналогичное RBFN.

Выходами третьего скрытого слоя являются сигналы $w_{jl} \prod_{i=1}^n \mu_{li}(x_i(k))$, четвертого $\sum_{l=1}^h w_{jl} \prod_{i=1}^n \mu_{li}(x_i(k))$ и $\sum_{l=1}^h \prod_{i=1}^n \mu_{li}(x_i(k))$, пятого

$$u_j(k) = \frac{\sum_{l=1}^h w_{jl} \prod_{i=1}^n \mu_{li}(x_i(k))}{\sum_{l=1}^h \prod_{i=1}^n \mu_{li}(x_i(k))} = \sum_{l=1}^h w_{jl} \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{li}(x_i(k))}{\sum_{l=1}^h \prod_{i=1}^n \mu_{li}(x_i(k))} =$$

$$= \sum_{l=1}^h w_{jl} \varphi_l(x(k)) = w_j^T \varphi(x(k))$$

$$\text{(здесь } \varphi_l(x(k)) = \prod_{i=1}^n \mu_{li}(x_i(k)) \left(\sum_{l=1}^h \prod_{i=1}^n \mu_{li}(x_i(k)) \right)^{-1},$$

$$w_j = (w_{j1}, w_{j2}, \dots, w_{jh})^T, \quad \varphi(x(k)) = (\varphi_1(x(k)), \varphi_2(x(k)), \dots, \varphi_h(x(k)))^T \text{) и,}$$

наконец, шестого

$$y_j(k) = \text{sign } u_j(k).$$

Несложно видеть, что рассматриваемая NFS есть модификация системы Л.Ванга-Дж. Менделя [13, 14], ориентированная на решения задач on-line диагностики-классификации.

Обучение диагностирующей нейро-фаззи системы

Для обучения синаптических весов введенной системы будем использовать метод обучения, основанный на специализированном критерии [5], который предназначен для решения задач распознавания образов, классификации, диагностики и т.п.

Введем в рассмотрение m ошибок обучения

$$e_j(k) = d_j(k) - y_j(k) = d_j(k) - \text{sign } u_j(k)$$

и m критериев, основанных на этих ошибках

$$\begin{aligned} E_j(k) &= e_j(k)u_j(k) = d_j(k)u_j(k) - |u_j(k)| = \\ &= \left(d_j(k) - \text{sign} w_j^T \varphi(x(k)) \right) \cdot w_j^T \varphi(x(k)), \end{aligned} \quad (3)$$

где $d_j(k) \in \{-1, 1\}$ - обучающий сигнал, принимающий значения 1, если входной вектор $x(k)$ относится к j -му диагнозу, и -1 в противном случае.

Для настройки синаптических весов используем стандартную градиентную процедуру минимизации критерия (3)

$$w_{jl}(k+1) = w_{jl}(k) - \eta(k) \frac{\partial E_j(k)}{\partial w_{jl}}$$

(здесь $\eta(k)$ - параметр шага обучения), которая в векторной форме может быть переписана в виде

$$\begin{aligned} w_j(k+1) &= w_j(k) + \eta(k) e_j(k) \varphi(x(k)) = \\ &= w_j(k) + \eta(k) \left(d_j(k) - \text{sign} w_j^T \varphi(x(k)) \right) \cdot \varphi(x(k)), \\ j &= 1, 2, \dots, m. \end{aligned} \quad (4)$$

Вводя далее общий критерий для всех выходов системы

$$E(k) = \sum_{j=1}^m E_j(k) = \sum_{j=1}^m e_j(k) u_j(k),$$

можно записать алгоритм обучения всех синаптических весов системы в виде

$$W(k+1) = W(k) + \eta(k) \left(d(k) - \text{sign} W(k) \varphi(x(k)) \right) \cdot \varphi^T(x(k)), \quad (5)$$

где $\text{sign}(u_1(k), u_2(k), \dots, u_m(k))^T = (\text{sign} u_1(k), \text{sign} u_2(k), \dots, \text{sign} u_m(k))^T$,
 $d(k) = (d_1(k), d_2(k), \dots, d_m(k))^T$,

$$W(k) = \begin{pmatrix} w_1^T(k) \\ w_2^T(k) \\ \vdots \\ w_m^T(k) \end{pmatrix} - (m \times h) \text{ - матрица настраиваемых синаптических}$$

весов.

Известно, что градиентные алгоритмы типа (3)-(5) обеспечивают сходимость в достаточно широком диапазоне варьирования параметра шага $\eta(k)$ [15], однако при этом скорость сходимости может оказаться недостаточной. Увеличить эту скорость можно, воспользовавшись квазиньютоновскими процедурами обучения [16], например,

$$w_j(k+1) = w_j(k) + \left(\varphi(x(k))\varphi^T(x(k)) + \eta I \right)^{-1} e_j(k)\varphi(x(k)), \quad (6)$$

где $\eta > 0$ - регуляризующий параметр, $I - (h \times h)$ - единичная матрица.

Воспользовавшись далее леммой обращения матриц, несложно показать, что [7]

$$\left(\varphi(x(k))\varphi^T(x(k)) + \eta I \right)^{-1} \varphi(x(k)) = \frac{\varphi(x(k))}{\eta + \|\varphi(x(k))\|^2},$$

и переписать (6) компактной форме

$$w_j(k+1) = w_j(k) + \frac{e_j(k)\varphi(x(k))}{\eta + \|\varphi(x(k))\|^2}, \quad (7)$$

или

$$W(k+1) = W(k) + \frac{d(k) - \text{sign}W(k)\varphi(x(k))}{\eta + \|\varphi(x(k))\|^2} \varphi^T(x(k)), \quad (8)$$

что при $\eta = 0$ является многомерным вариантом оптимального по быстродействию алгоритма обучения, введенного в [17].

Выводы

Предложенная диагностирующая нейро-фаззи система и адаптивный алгоритм ее обучения предназначены для решения задач распознавания образов, классификации, диагностики и т.п. в условиях когда объем обучающей выборки соизмерим с размерностью входных образов, а сами эти образы поступают на обработку последовательно в on-line режиме. Особенностью предлагаемой системы являются существенно меньшее количество настраиваемых параметров по сравнению с искусственными нейронными сетями, решающими тут же задачу.

Система характеризуется простотой численной реализации, высоким быстродействием при обучении, возможностью обработки информации, задаваемой в различных шкалах (количественной, ранговой, бинарной), что за частую возникает в задачах интеллектуальной обработки медицинских данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Haykin S. Neural Networks. A Comprehensive Foundation / S. Haykin. - Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall. - 1999. - 842 p.
2. Rizzo R. Computational Intelligence Methods for Bioinformatics and Biostatistics / Rizzo R. - In Lecture Notes in Bioinformatics (7th International Meeting, CIBIB 2010, Palermo, Italy, September 16-18, 2010). - Springer. - 2011. - 301 p.
3. Kountchev R. Advances in Intelligent Analysis of Medical Data and Decision Support Systems (Studies in Computational Intelligence) / Kountchev R. and etc - Springer. - 2013. - 246 p.
4. Ljung L. System Identification: Theory for the User / L. Ljung. - PTR Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J., 1999. - 672 p.
5. Shynk J.J. Performance surfaces of a single-layer perceptron / Shynk J.J. // IEEE Trans. on Neural Networks. - 1990. - 1. - P. 268-274.
6. Бодянский Е.В. Диагностика и прогнозирование временных рядов с помощью многослойной радиально-базисной нейронной сети / Бодянский Е.В., Кучеренко Е.И., Чапланов А.П. // Труды 8 Всероссийской конф. с междунар. Участием «Нейрокомпьютеры и их применение». - Москва, 2002. - С. 209-213.
7. Бодянский Е.В. Нейро-фаззи сети Петри в задачах моделирования сложных систем / Бодянский Е.В., Кучеренко Е.И., Михалев А.И. - Днепропетровск: Системные технологии, 2005. - 311 с.

8. Бодянский Е.В. Семантическое аннотирование текстовых документов на основе иерархической радиально-базисной нейронной сети / Бодянский Е.В., Шубкина О.В. // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2010. - Вып. 9 (90). – С. 70-74.
9. Jang J.-S.R. Neuro-Fuzzy and Soft Computing / J.-S.R. Jang, C.-T. Sun, E. Mizutani. - Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ. - 1997. - 640 p.
10. Jang J.S.R. Functional equivalence between radial basis function networks and fuzzy inference systems / J.S.R. Jang, C.T. Sun // IEEE Trans. on Neural Networks. - 1993. - 4. - P. 156-159.
11. Friedman J. The Elements of Statistical Learning. Data Mining, Inference and Prediction / Friedman J., Hastie T., Tibshirani R. – Berlin: Springer, 2003. – 552 p.
12. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский. -М.: Финансы и статистика, 2002. - 344 с.
13. Wang L.X. Fuzzy basis functions, universal approximation, and orthogonal least squares learning / L.X. Wang, J.M. Mendel // IEEE Trans. on Neural Network. - 1992. - 3. - P. 807-814.
14. Wang L.-X. Adaptive Fuzzy Systems and Control: Design and Stability Analysis / L.-X. Wang. - New Jersey: Prentice Hall. - 1994. - 256 p.
15. Деревецкий Д.П. Прикладная теория дискретных адаптивных систем управления / Деревецкий Д.П., Фрадков А.Л. – М.: Наука, 1981. – 216 с.
16. Shepherd A.J. Second-Order Methods for Neural Networks / A.J. Shepherd. - London: Springer-Verlag. - 1997. - 145 p.
17. Цыкин Я.З. Основы теории обучающихся систем / Цыкин Я.З. – М.: Наука, 1984. – 320 с.

Г.Л. Евтушенко, А.С. Воюев, А.О. Градовский,
Н.А. Грачев, В.Г. Макаров, Ю.С. Штефан

**РАЗРАБОТКА ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ
«СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ
NOOTRON 3.0»**

Аннотация. Разрабатывается третий релиз веб-приложения «СППР NooTron» по методологии Scrum, с использованием современных инструментов разработки. Основная задача третьего релиза – разработка режима доступа зарегистрированного пользователя (хранение проектов задач, генерация отчетов). Это позволит решать комплексные многокритериальные задачи такие, как многокритериальная оптимизация технологических процессов, многокритериальное ранжирование большого количества объектов и т.п.

Ключевые слова: СППР, МКА, Scrum, MVC.

Введение

Разработка системы поддержки принятия решений для многокритериального анализа и оптимизации технологических, организационных систем является перспективным направлением работы кафедры информационных технологий и систем НМетАУ. В процессе дипломирования на кафедре совместно с предприятием Exigen Services в рамках программы «Exigen Agile Practice» уже выпущено два релиза веб-приложения «Система поддержки принятия решений NooTron», которое находится в свободном доступе (<http://nootron.net.ua>) [1].

Разработанная система поддержки принятия решений (СППР) NooTron содержит библиотеку методов, в которую вошли как известные методы, так и оригинальные интегрированные методы многокритериального анализа, система содержит подробную справочную информацию.

Веб-приложение «СППР NooTron» используется в учебном процессе в НМетАУ при прохождении курса «Системный анализ». Также СППР NooTron применяется:

1) для решения ряда прикладных задач, таких как многокритериальный анализ эффективности сотовых заполнителей [2], сравнительный анализ эффективности технологий использования вторичных энергетических ресурсов;

2) для проведения компьютерных экспериментов при разработке механизма формирования команды научного проекта высшего учебного заведения на основе метода взвешенных сумм [3], при разработке модели составления рейтинга подразделений вуза [4].

В результате выполнения третьего релиза в СППР NooTron можно будет решать такие комплексные задачи, как многокритериальная оптимизация технологических процессов, многокритериальное ранжирование большого количества объектов, распределение ресурсов производства, оценка эффективности проектов и т.п.

Основная часть

Система поддержки принятия решений NooTron – это информационно-аналитическая система на базе методов многокритериального анализа (МКА). К настоящему времени в библиотеку методов системы вошли следующие методы МКА: метод анализа иерархий, метод взвешенных сумм, метод матрицы решений, метод анализа сетей, интегрированный метод МАИ+ММР, интегрированный метод МВС+МАИ, метод распознавания образов, методология ВОСР, МАИ в абсолютных измерениях, метод ранжированных весов критериев [5].

Веб-приложение «СППР NooTron» позволяет в режиме доступа «Гость» ознакомиться с методами многокритериального анализа, сформулировать проблему, решить любым из встроенных в библиотеку методов достаточно объёмную задачу и получить результат решения задачи в виде таблиц и наглядных диаграмм. Ограничение режима доступа «Гость» – ввод данных вручную.

В третьем релизе веб-приложения «СППР NooTron» планируется:

- разработать модуль регистрации пользователей, которые смогут на любом шаге решения задачи сохранять в своей учетной записи проекты расчетов, генерировать и сохранять отчеты по решению задачи;

- разработать англоязычную и украинскую версии сайта;
- улучшить дизайн сайта;
- проводить контроль качества разработки приложения;
- разработать тестовую документацию, спецификацию требований для релиза.

Проект «СППР NooTron» преследует несколько целей:

1) разработка системы, которая позволит проводить моделирование, поддержку принятия решений и многокритериальную оптимизацию технологических (например, использование вторичных энергетических ресурсов в металлургической промышленности) и организационных систем (распределение ресурсов производства, оценка эффективности проектов).

2) использование в учебном процессе: изучение методов многокритериального анализа, приобретение студентами (дипломниками) практических навыков разработки современных информационных систем.

Для проведения разработки третьего релиза веб-приложения «СППР NooTron» предусмотрены такие мероприятия:

1. Отбор студентов для участия в проекте (формирование Scrum-команды) совместно с компанией Exigen Services в рамках программы «Exigen Agile Practice».

2. Выбор варианта тестового сервера для разработки приложения и его конфигурация, согласно выбранным информационным технологиям.

3. Разработка концепции релиза продукта.

4. Разработка функциональных требований продукта по методологии Scrum.

5. Организация итеративного процесса разработки и тестирования продукта.

6. Демонстрация готовой функциональности веб-приложения.

7. Размещение третьего релиза веб-приложения «СППР NooTron» во всемирной сети Internet.

Программные средства разработки web-приложения СППР NooTron

Методология Scrum, по которой ведётся разработка веб-приложения «СППР NooTron», основной упор делает на управлении проектами и не задает никаких технических практик (технологий и

инструментов). Техническое обеспечение выбирает команда, опираясь на свой опыт и навыки. В рамках программы Exigen Agile Practice экспертами от предприятия были предложены следующие инструменты разработки.

1. Redmine – открытое серверное веб-приложение для управления проектами и отслеживанием ошибок. Эта система была дополнена плагином Redmine Backlogs, который позволил использовать эту систему при разработке в качестве инструмента методологии Scrum.

2. IntelliJ IDEA – интегрированная среда разработки программного обеспечения на многих языках программирования, в частности Java, JavaScript и др., разработанная компанией JetBrains.

3. PostgreSQL – свободная объектно-реляционная система управления базами данных (СУБД). PostgreSQL базируется на языке SQL и поддерживает многие из возможностей стандарта SQL:2003 (ISO/IEC 9075).

4. Spring Framework – легкий открытый фреймворк, который упрощает разработку корпоративных (J2EE) приложений и нацелен на использование простых JavaBean объектов.

5. Hibernate — библиотека для языка программирования Java, предназначенная для решения задач объектно-реляционного отображения. Она представляет собой свободное программное обеспечение с открытым исходным кодом (open source). Данная библиотека предоставляет легкий в использовании каркас (фреймворк) для отображения объектно-ориентированной модели данных в традиционные реляционные базы данных.

6. Subversion (SVN) – свободная централизованная система управления версиями, выпущенная компанией CollabNet Inc. SVN – программное обеспечение для облегчения работы с изменяемой информацией. Система управления версиями позволяет хранить несколько версий одного и того же документа (проекта), при необходимости возвращаться к более ранним версиям, определять, кто и когда сделал то или иное изменение, и многое другое.

7. Tomcat (в старых версиях – Catalina) – контейнер сервлетов с открытым исходным кодом, разрабатываемый Apache Software Foundation. Реализует спецификацию сервлетов и спецификацию JavaServer Pages (JSP). Написан на языке Java. Tomcat позволяет за-

пускать веб-приложения, содержит ряд программ для самоконфигурирования.

8. Apache Maven – фреймворк для автоматизации сборки проектов, специфицированных на XML-языке POM (Project Object Model). Maven обеспечивает декларативную сборку проекта. То есть, в файлах проекта pom.xml содержится его декларативное описание, а не отдельные команды. Все задачи по обработке файлов Maven выполняет через плагины.

9. Sonar – это инструмент статического анализа кода, который существенно упрощает нахождение ошибок в коде, и, следовательно, качество кода обеспечивать намного легче. Sonar вобрал в себя все известные инструменты для статического анализа и отчетности по коду. Это open source инструмент с отличным пользовательским интерфейсом, множеством полезных отчетов, возможностью проводить детальный анализ кода.

10. Jenkins – инструмент непрерывной интеграции, написанный на Java. В нашем проекте, где над разными частями системы разработчики трудятся независимо, стадия интеграции является заключительной и она может задержать окончание работ. Переход к непрерывной интеграции с помощью Jenkins позволил снизить трудоемкость интеграции и сделать ее более предсказуемой за счет наиболее раннего выявления и устранения ошибок и противоречий.

Также во время разработки команда может предлагать к использованию другие технологии и фреймворки. Так, например, при реализации блока регистрации пользователей в приложении NooTron для валидации данных на стороне сервера был предложен Spring Security Framework, который обеспечивает безопасность приложений на основе Spring Framework [6]. Spring Security Framework реализует возможность аутентификации и авторизации, как на уровне запросов, так и на уровне вызовов методов.

Архитектура веб-приложения «СППР NooTron»

Веб-приложение «СППР NooTron» построено на базе MVC-модели: это подразумевает использование трех отдельных компонентов, которые построены по принципу минимального воздействия друг на друга.

Model-view-controller (MVC, «модель-представление-контроллер») – это схема использования нескольких шаблонов проек-

тирования, с помощью которых модель данных приложения, пользовательский интерфейс и взаимодействие с пользователем разделены на три отдельных компонента таким образом, чтобы модификация одного из компонентов оказывала минимальное воздействие на остальные (рисунок 1). Данная схема проектирования часто используется для построения архитектурного каркаса, когда переходят от теории к реализации в конкретной предметной области [7].



Рисунок 1 – Взаимодействие модулей MVC модели

Основная цель применения этой концепции состоит в разделении работы веб-приложения на три отдельные функциональные роли:

1. Модель (англ. Model). Модель предоставляет знания: данные и методы работы с этими данными, реагирует на запросы, изменяя своё состояние. Не содержит информации, как эти знания можно визуализировать.

2. Представление, вид (англ. View). Отвечает за отображение информации (визуализацию). Часто в качестве представления выступает форма (окно) с графическими элементами.

3. Контроллер (англ. Controller). Обеспечивает связь между пользователем и системой: контролирует ввод данных пользователем, использует модель и представление для реализации необходимой реакции.

Таким образом, изменения, внесенные в один компонент, минимально влияют на другие компоненты.

В нашем проекте модель представлена блоком `persist`, представление блоком `view`, а контроллер блоком `service`. В третьем релизе будет значительно наполнен блок `persist` (будет реализована работа с базой данных: учетные записи пользователей, хранение проектов и т.п.), а так же дополнены блоки `service` и `view`.

Проектирование и разработка клиентской части

Одной из задач третьего релиза проекта является улучшение дизайн сайта. В этой задаче разрабатывается обновление внешнего вида страниц, а также блок вывода подсказок пользователю при работе с приложением. При этом будут использоваться такие средства разработки: JSP, JavaScript (особенно, набравшая популярность библиотека jQuery), CSS, HTML. Также для визуализации данных будем использовать элементы инфографики (рисунок 2).

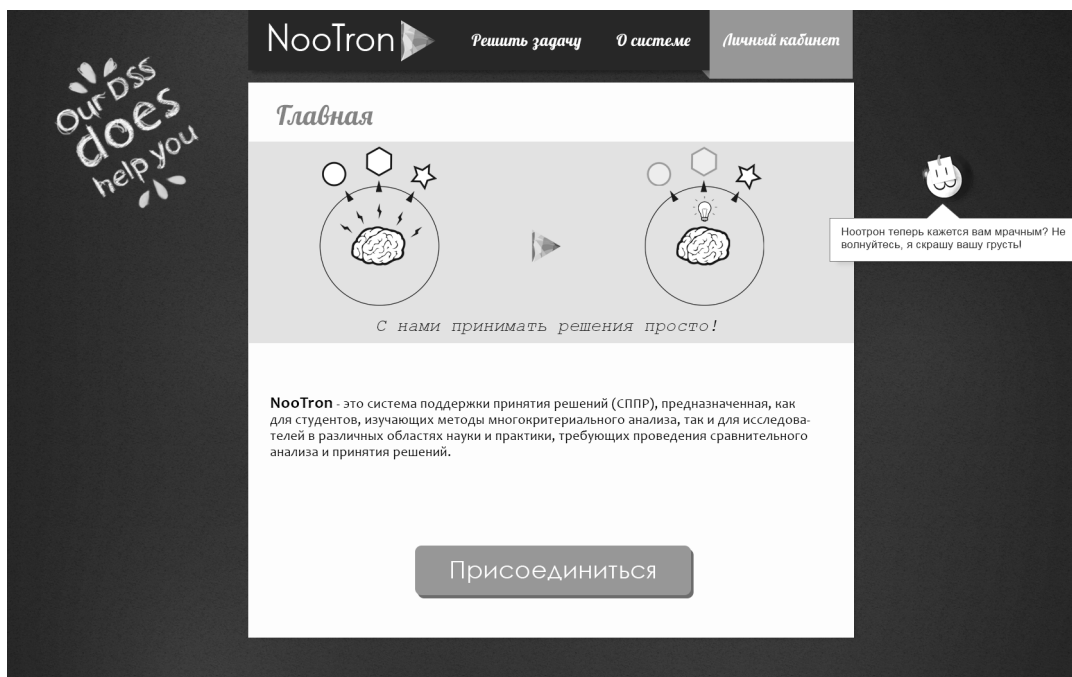


Рисунок 2 – Макет пользовательского интерфейса для NooTron 3.0

Контроль качества разработки приложения

Тестирование – это одна из основных техник контроля качества программного обеспечения (ПО), на которую он опирается. Простыми словами – это процесс, позволяющий проверить соответствие между реальным и ожидаемым результатом работы ПО, который базируется на тестовой документации (тест-планах, тест-кейсах, тестовых сценариях). Тестирование является обязательным процессом, сопровождающим разработку и внедрение новых функциональностей ПО, так как выявляет все ошибки и недоработки в процессе работы над проектом, а не после релиза [8].

Целью тестирования проекта NooTron 3.0 является выявление как можно большего числа его багов (несоответствие требованиям, ошибки) до релиза, согласно выработанной тестовой стратегии. Стра-

тегия подразумевает разбиение тестирования на такие этапы: инициирование, планирование, разработка тест-кейсов и автотестов, выполнение тестов, анализ результатов, написание отчетов и завершение.

В процессе тестирования будут задействованы такие типы тестирования, как:

- функциональное тестирование (тестирование взаимодействия, безопасности);
- нефункциональное тестирование (тестирование производительности, установки, удобства пользования, конфигурационное тестирование);
- регрессионное тестирование (регрессия багов, старых багов и регрессия побочного эффекта).

В качестве инструментов для тестирования проекта NooTron 3.0 были выбраны веб-сервер FitNesse и Selenium Server. С помощью этих инструментов будут выполняться автотесты (автоматизированное тестирование), которое позволяет сократить время, затрачиваемое на тестирование реализованных ранее функциональностей и регрессионное тестирование.

Для контроля за процессом тестирования будут использованы метрики, как количественные меры, позволяющая получить численное значение качества тестирования ПО.

Выводы

В процессе дипломирования на кафедре совместно с предприятием Exigen Services в рамках программы «Exigen Agile Practice» уже выпущено два релиза веб-приложения «Система поддержки принятия решений NooTron» (<http://nootron.net.ua>). Система позволяет в режиме доступа «Гость» ознакомиться с методами многокритериального анализа, сформулировать проблему, выбрать метод и получить результат решения задачи в виде таблиц и наглядных диаграмм. Ограничение режима доступа «Гость» - ввод данных вручную.

В рамках третьего релиза веб-приложения «Система поддержки принятия решений NooTron» разрабатывается следующая функциональность: режим доступа «исследователь» (регистрация пользователя), управление проектами многокритериальных задач на странице пользователя, генерация отчетов, разработка англоязычной и украинской версии сайта, улучшение дизайна.

Разрабатываемая система имеет следующие направления использования:

1. Сравнительный анализ и оценка эффективности проектов.
2. Поддержка принятия решений.
3. Многокритериальная оптимизация технологических процессов.
4. Развитие интегрированных методов многокритериального анализа и моделирования.
5. Развитие методов многокритериального ранжирования для составления рейтингов.

Разработка веб-приложения «СППР NooTron» проводится по методологии Scrum, с использованием современных инструментов разработки: Redmine, IntelliJ IDEA, Spring Framework, Tomcat, Apache Maven, Sonar, Jenkins и др. Использование таких технологий обеспечивает не только качество разработки приложения, но и получение дипломниками (Scrum-командой) опыта работы в IT-компаниях в реальных производственных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Теплякова Г.Л., Кузнецов В.И., Дмитриева И.С. Проектирование системы поддержки принятия решений на базе методов многокритериального анализа // Проблемы недропользования: Сборник научных трудов. Часть II / Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». СПб, 2013. С. 261-263. (Международный форум-конкурс молодых ученых).
2. Сливинский В.И., Михалёв А.И., Кузнецов В.И., Теплякова Г.Л. Многокритериальный анализ сотовых заполнителей в системе поддержки принятия решений NooTron // Эффективность сотовых конструкций в изделиях авиационно-космической техники: Сборник материалов V Международной научно-практической конференции. – г.Днепропетровск, 2013. – С. 141-151.
3. Драч І.Є., Теплякова Г.Л. Формування команди наукового проекту вищого навчального закладу на основі методу зважених сум // Управління розвитком складних систем. Збірник наукових праць. – Випуск 15, 2013. – Київ, 2013. – С. 11-20. ISSN 2219-5300
4. Теплякова Г.Л. Модель построения рейтинга кафедр интегрированным многокритериальным методом МВС+МАИ // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 3 (86). – Дніпропетровськ, 2013. – С. 135-141.
5. Справка СППР NooTron [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://nootron.net.ua/Help.htm>
6. Уоллс К. Spring в действии. – М.: ДМК Пресс, 2013. – 752 с.: ил. ISBN 978-5-94074-568-6
7. Рогачёв С. Обобщенный Model-View-Controller [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rsdn.ru/article/patterns/generic-mvc.xml>
8. Тестирование программного обеспечения - основные понятия и определения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.protesting.ru/testing/>

УДК 004.032.26

А.А. Дейнеко, Ж.В. Дейнеко, А.П. Турута, Е.В. Бодянский
**АДАПТИВНЫЙ МЕТОД КОМБИНИРОВАННОГО
ОБУЧЕНИЯ-САМООБУЧЕНИЯ НЕЙРО-ФАЗЗИ СИСТЕМ**

Аннотация. Предложен подход к комбинированному обучению синаптических весов и центров функций принадлежности нейро-фаззи систем, основанный на использовании как правил обучения с учителем, так и самообучения.

Полученные результаты могут быть использованы при решении широкого класса задач, возникающих в Dynamic Data Mining.

Введение. В настоящее время искусственные нейронные сети (ANN) получили широкое распространение для решения различных задач Data Mining, интеллектуального управления, прогнозирования, идентификации и эмуляции и т. п. в условиях неопределенности, нелинейности, стохастичности и хаотичности, различного рода возмущений и помех, благодаря своим универсальным аппроксимирующим возможностям и способности обучаться на основании данных, характеризующих функционирование исследуемого явления или объекта. В случае необходимости обработки информации в последовательном on-line режиме на первый план выходит вопрос скорости сходимости процесса обучения, существенно ограничивающий класс ANN, пригодных для работы в этих условиях. С точки зрения оптимизации по скорости процесса обучения весьма эффективными являются ANN, использующие ядерные (радиально-базисные, колоколообразные, потенциальные) функции активации. Здесь наибольшее распространение получили радиально-базисные нейронные сети (RBFN), выходной сигнал которых линейно зависит от синаптических весов, что позволяет использовать для их обучения алгоритмы адаптивной идентификации такие, как рекуррентный метод наименьших квадратов, алгоритм Качмажа (Уидроу-Хоффа) и т.п.. Вместе с тем RBFN подвержены, так называемому, «проклятию размерности», порождаемому экспоненциальным ростом количества настраиваемых параметров (весов) с увеличением размерности пространства входов.

© Дейнеко А.А., Дейнеко Ж.В., Турута А.П., Бодянский Е.В., 2014

В сравнении с нейронными сетями большими возможностями обладают нейро-фаззи системы (NFS) [1-4], объединяющие в себе возможности обучения, аппроксимации и лингвистической интерпретации получаемых результатов. Наибольшее распространение среди NFS получили ANFIS и TSK-системы, выходной сигнал которых также зависит линейно от синаптических весов, что позволит использовать для их обучения множество оптимальных адаптивных алгоритмов линейной идентификации. Вместе с тем, для избежания возникновения «дыр» в пространстве входов, порождаемого рассеянным разбиением (scatter partitioning) [5], используемым в ANFIS и TSK-системах, производится настройка параметров функций принадлежности в первом скрытом слое NFS. Для этого используется алгоритм обратного распространения ошибок, реализуемый на множестве эпох [6] так, что говорить об обучении в реальном времени в данном случае не приходится.

Для управления параметрами активационных функций (центров и матриц рецепторных полей) RBFN в режиме реального времени в [7-9] было предложено использовать самоорганизующуюся карту Т. Кохонена [10], обеспечивающую в процессе своего самообучения в on-line режиме настройку этих параметров.

Представляется целесообразным распространить этот подход для адаптивной настройки параметров функций принадлежности нейро-фаззи систем.

1. Архитектура нейро-фаззи системы и обучение параметров выходного слоя. Архитектура рассматриваемой системы, приведенная на рис. 1, состоит из пяти последовательно соединенных слоев.

На входной (нулевой) слой NFS подается $(n \times 1)$ -мерный вектор входных сигналов-образов $x(k) = (x_1(k), x_2(k), \dots, x_n(k))^T$ (здесь $k = 1, 2, \dots$ – текущее дискретное время), подлежащих обработке. Первый скрытый слой содержит nh (по h на каждый вход) функций принадлежности $\mu_{il}(x)$, $i = 1, 2, \dots, n$; $l = 1, 2, \dots, h$ и выполняет фаззификацию входного пространства. Второй скрытый слой обеспечивает агрегирование уровней принадлежности, рассчитанных в первом слое, и состоит из h блоков умножения. Третий скрытый слой – это слой синаптических весов, подлежащих определению в процессе обучения. Четвертый слой образован двумя сумматорами и вычисляет суммы выходных сигналов

второго и третьего слоев. И, наконец, в пятом (выходном) слое производится нормализация, в результате которой вычисляется выходной сигнал системы \hat{y} .

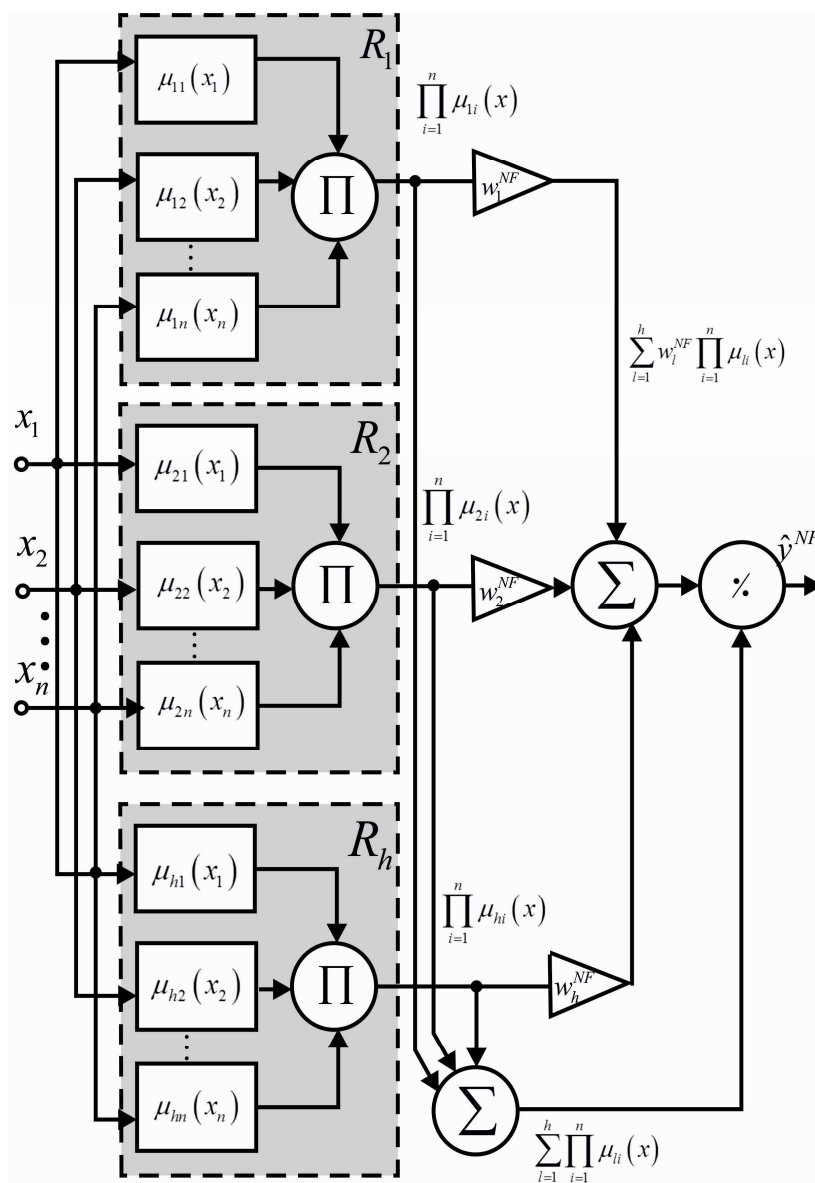


Рисунок 1 – Архитектура нейро-фаззи системы

Таким образом, если на вход NFS подан векторный сигнал $x(k)$, элементы первого скрытого слоя вычисляют уровни принадлежности $0 \leq \mu_{ii}(x(k)) \leq 1$, при этом в качестве функций принадлежности чаще всего используются традиционные гауссианы

$$\mu_{ii}(x_i(k)) = \exp\left(-\frac{(x_i(k) - c_{li})^2}{2\sigma_i^2}\right),$$

где c_{li} , σ_i – параметры центров и ширины соответственно.

Во втором скрытом слое вычисляются агрегированные значения $\prod_{i=1}^n \mu_{li}(x_i(k))$, при этом для гауссианов с одинаковыми параметрами ширины σ

$$\prod_{i=1}^n \mu_{li}(x_i(k)) = \prod_{i=1}^n \exp\left(-\frac{(x_i(k) - c_{li})^2}{2\sigma^2}\right) = \exp\left(-\frac{\|x(k) - c_l\|^2}{2\sigma^2}\right),$$

(здесь $c_l = (c_{l1}, c_{l2}, \dots, c_{ln})^T$), т.е. сигналы на выходах блоков умножения второго скрытого слоя аналогичны сигналам на выходах нейронов первого скрытого слоя радиально-базисных нейронных сетей.

Выходами третьего скрытого слоя есть значения $w_l \prod_{i=1}^n \mu_{li}(x_i(k))$

(здесь w_l , $l=1, 2, \dots, h$ – синаптические веса, подлежащие определению),

четвертого – $\sum_{l=1}^h w_l \prod_{i=1}^n \mu_{li}(x_i(k))$ и $\sum_{l=1}^h \prod_{i=1}^n \mu_{li}(x_i(k))$ и, наконец, на выходе

де системы (пятого слоя) появляется сигнал

$$\begin{aligned} \hat{y}(x(k)) &= \frac{\sum_{l=1}^h w_l \prod_{i=1}^n \mu_{li}(x_i(k))}{\sum_{l=1}^h \prod_{i=1}^n \mu_{li}(x_i(k))} = \sum_{l=1}^h w_l \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{li}(x_i(k))}{\sum_{l=1}^h \prod_{i=1}^n \mu_{li}(x_i(k))} = \\ &= \sum_{l=1}^h w_l \varphi_l(x(k)) = w^T \varphi(x(k)), \end{aligned}$$

где

$$\varphi_l(x(k)) = \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{li}(x_i(k))}{\sum_{l=1}^h \prod_{i=1}^n \mu_{li}(x_i(k))},$$

$$w = (w_1, w_2, \dots, w_h)^T,$$

$$\varphi(x(k)) = (\varphi_1(x(k)), \varphi_2(x(k)), \dots, \varphi_h(x(k)))^T.$$

Несложно заметить, что рассматриваемая система реализует нелинейное отображение входного пространства в скалярный выходной сигнал подобно нормализованной RBFN [11], а по архитектуре

совпадает с системой Такаги-Сугено-Канга нулевого порядка, т.е. архитектурой Л. Ванга – Дж. Менделя [3].

Как уже отмечалось, для настройки синаптических весов NFS могут быть использованы известные адаптивные алгоритмы идентификации-обучения такие, как, например, экспоненциально-взвешенный рекуррентный метод наименьших квадратов

$$\begin{cases} w(k) = w(k-1) + \frac{P(k-1)(y(k) - w^T(k-1)\varphi(x(k)))}{\beta + \varphi^T(x(k))P(k-1)\varphi(x(k))} \varphi(x(k)) = \\ = w(k-1) + \frac{P(k-1)(y(k) - \hat{y}(k))}{\beta + \varphi^T(x(k))P(k-1)\varphi(x(k))} \varphi(x(k)), \\ P(k) = \frac{1}{\beta} \left(P(k-1) - \frac{P(k-1)\varphi(x(k))\varphi^T(x(k))P(k-1)}{\beta + \varphi^T(x(k))P(k-1)\varphi(x(k))} \right), \quad 0 < \beta \leq 1, \end{cases}$$

(здесь $y(k)$ – внешний обучающий сигнал, β – параметр забывания устаревшей информации), оптимальный по быстродействию градиентный одношаговый алгоритм Качмажа-Уидроу-Хоффа:

$$w(k) = w(k-1) + \frac{y(k) - w^T(k-1)\varphi(x(k))}{\|\varphi(x(k))\|^2} \varphi(x(k)), \quad (2)$$

алгоритм обучения, обладающий как следящими, так и сглаживающими свойствами [12,13]

$$\begin{cases} w(k) = w(k-1) + p^{-1}(k)(y(k) - w^T(k-1)\varphi(x(k)))\varphi(x(k)), \\ p(k) = \beta p(k-1) + \|\varphi(x(k))\|^2, \quad 0 \leq \beta \leq 1, \end{cases} \quad (3)$$

и тому подобные процедуры.

Интересно отметить, что процедура (3) связана с алгоритмом (1) соотношением

$$p(k) = \text{Tr } P(k),$$

а при $\beta = 0$ – приобретает форму алгоритма (2).

2. Самообучение функций принадлежности первого скрытого слоя. Процесс настройки функций принадлежности первого скрытого слоя проиллюстрируем на примере двумерного вектора входов $x(k) = (x_1(k), x_2(k))^T$ и пяти функций принадлежности $\mu_i(x_i(k))$, $i = 1, 2, 3, 4, 5$; $i = 1, 2$ на каждом из входов. В этом случае NFS содержит $nh = 10$ функций принадлежности. Начальные положения

центров $c_{li}(0)$ равномерно распределены по координатным осям x_1, x_2 , а расстояние между ними определяется соотношением

$$\Delta(0) = \frac{x_{i\max} - x_{i\min}}{h-1} = \frac{2}{h-1} = 0,5$$

для $-1 \leq x_i \leq 1$.

Данная ситуация иллюстрируется рис. 2.

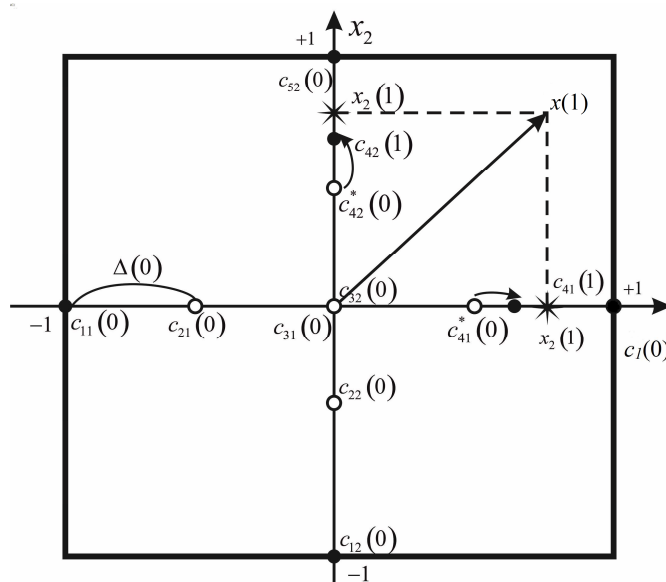


Рисунок 2 – Самообучение функций принадлежности на первом шаге

В случае многомерного вектора входов $x(k) \in R^n$, центры $c_{li}(0)$ распределяются равномерно по осям гиперкуба $[-1, 1]^n$.

Пусть на вход системы подан первый вектор-образ x_1 (на рис. 2 – $x(1) = (x_1(1), x_2(2))^T$). Далее на каждой из осей находятся центры «победители» $c_{li}^*(0)$ ближайšie к $x_i(1)$ в смысле расстояния

$$d_{li} = |x_i(1) - c_{li}(0)|,$$

т.е.

$$c_{li}^*(0) = \arg \min \{d_{1i}, d_{2i}, \dots, d_{hi}\}.$$

Заметим, что данная процедура по сути является реализацией процесса конкуренции по Т. Кохонену [10] с той лишь разницей, что «победители» по каждой из осей могут принадлежать функциям принадлежности с различными индексами l . На рис. 2 такими «победителями» оказались $c_{41}^*(0)$ и $c_{42}^*(0)$.

Далее эти «победители» подтягиваются к компонентам входного сигнала $x_i(1)$ согласно правилу самообучения Т. Кохонена «Победитель получает все» (WTA), которое для ситуации на рис. 2 может быть записано в виде

$$c_{li}(1) = \begin{cases} c_{li}^*(0) + \eta_{li}(1)(x_i(1) - c_{li}^*(0)) - \text{для победителя } l=4, \\ c_{li}(0) - \text{для всех остальных, } l=1,2,3,5; \end{cases}$$

а для общего случая:

$$c_{li}(k) = \begin{cases} c_{li}^*(k-1) + \eta_{li}(k)(x_i(k) - c_{li}^*(k-1)) - \text{для победителя } l=1,2,\dots,h; i=1,2,\dots,n; \\ c_{li}(k-1) - \text{для всех остальных.} \end{cases}$$

При этом в качестве значения параметра шага обучения в простейшем случае может быть принято значение

$$\eta_{li}(k) = \frac{1}{k_{li}},$$

где k_{li} – число раз, когда $c_{li}(k)$ был «победителем», что соответствует популярному методу кластеризации К-средних.

В более общем случае может быть использована оценка, предложенная для стандартной карты Т. Кохонена, вида [14]:

$$\begin{cases} \eta_{li}(k) = p_{li}^{-1}, \\ p_{li}(k) = \beta p_{li}(k-1) + x_i^2, \quad 0 \leq \beta \leq 1. \end{cases}$$

Как можно заметить, предлагаемый подход является модификацией правила самообучения Т. Кохонена с той разницей, что стандартное самообучение реализуется на гипершаре $\|x(k)\|=1$, а в нашем случае – на гиперкубе $[-1,1]^n$.

На рис. 3 приведена структурная схема комбинированного обучения-самообучения нейро-фаззи системы.

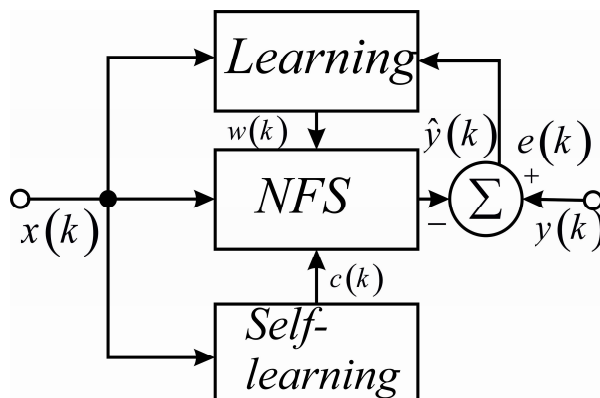


Рисунок 3 – Комбинированное обучение – самообучение

Процесс функционирования этой системы происходит следующим образом. При поступлении на вход вектора-образа $x(k)$ сначала в блоке самообучения происходит коррекция функций принадлежности $\mu_i(x_i(k))$, т.е. рассчитываются центры $c_i(k)$. Далее на основании уточненных функций принадлежности

$$\mu_i(x_i(k)) = \exp\left(-\frac{(x_i(k) - c_i(k))^2}{2\sigma^2}\right)$$

и ранее рассчитанного вектора синаптических весов $w(k-1)$ с помощью алгоритмов обучения с учителем ((1) или (2), или (3)) происходит расчет весов выходного слоя NFS $w(k)$.

Выводы. Предложен подход к комбинированному обучению синаптических весов и центров функций принадлежности нейрофаззи систем, основанный на использовании как правил обучения с учителем, так и самообучения. Основным преимуществом развиваемого подхода является возможность его использования в on-line режиме, когда обучающая выборка на вход системы подается последовательно, а ее объем заранее не фиксирован. Полученные результаты могут быть использованы при решении широкого класса задач, возникающих в Dynamic Data Mining.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rutkowski L. Computational Intelligence. Methods and Tehniques. / Rutkowski L. // Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, – 2008. – 514 p.
2. Jang J.-S. Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Maching Intelligence. / Jang J.-S., Sun C.-T., Mizutani E. // Upper Saddle River: Prentice Hall – 1997. – 640 p.
3. Wang L.-X. Fuzzy basis functions, universal approximation and orthogonal least squares learning. / Wang L.-X., Mendel J. M. // IEEE Trans. on Neural Networks – 1993. – 3. – P. 807-814.
4. Cios K. J. Neuro-fuzzy algorithms. / Cios K. J., Pedrycz W. – Oxford: IOP Publishing Ltd and Oxford University Press. // Handbook of Neural Computation, – 1997. – D1. 3:1 – D1. 3:7.
5. Friedman J. The Elements of Statistical Learning. Data Mining, Inference and Prediction. / Friedman J., Hastie T., Tibshirani R. // Berlin: Springer, – 2003.–552 p.
6. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации. / Осовский С. // М.: Финансы и статистика. – 2002. – 344 с.

7. Бодянский Е.В. Адаптивное обучение архитектуры и параметров радиально-базисной нейронной сети / Бодянский Е.В., Дейнеко А.А. // Системные технологии. – Днепропетровск, 2013. – 4. – 87. – С. 166-173.
8. Бодянский Е.В. Эволюционирующая радиально-базисная нейронная сеть и ее обучение с помощью карты Кохонена / Бодянский Е.В., Дейнеко А.А. // Научно-техническая конференция: «Информационные технологии в металлургии и машиностроении.» – Днепропетровск, 2013. – С. 75-77.
9. Torres J.A. The problem of organizing and partition large data sets in learning algorithms for SOM-RBF mixed structure / Torres J.A., Martinez S., Martinez F.J., Peralta M. // Proc. 5th Int. Joint Conf. on Computational Intelligence. – Vilamoura, Algarve, Portugal – 2013 – P 497-501.
10. Kohonen T. Self-Organizing Maps / Kohonen T. – Berlin: Springer-Verlag. – 1995. – 362 p.
11. Nelles O. Nonlinear System Identification. / Nelles O. // Berlin: Springer, – 2001. – 785p.
12. Bodyanskiy Ye. An adaptive learning algorithm for a neuro-fuzzy network / Bodyanskiy Ye., Kolodyazhniy V., Stephan A. / Ed. by B. Reusch "Computational Intelligence. Theory and Applications." – Berlin – Heidelberg – New York: Springer, 2001. – P. 68-75.
13. Otto P. / A new learning algorithm for a forecasting neuro-fuzzy network. / Otto P., Bodyanskiy Ye., Kolodyazhniy V. // Integrated Computer-Aided Engineering. – 2003. – 10. – № 4. – P. 399-409.
14. Бодянский Е.В. Искусственные нейронные сети: архитектуры, обучение, применение. / Бодянский Е.В., Руденко О.Г. – Харьков: ТЕЛТЕХ. – 2004. – 372 с.

A.I. Guda, A.I. Mikhalyov

**INFLUENCE OF INPUT AND MEASUREMENT NOISE
TO LORENZ SYSTEM ADAPTIVE-SEARCHING
IDENTIFICATION**

Abstract. In this article the influence of input and measurement errors to the process of adaptive-searching identification is researched. Ranges of workability are investigated.

Keywords: Lorenz chaotic system, adaptive-searching identification, simulation.

Introduction

Identification of the chaotic dynamic system [1] is a valuable challenge in real-time identification system synthesis. Adaptive-searching identification methods proved own ability to deal with such systems. In case of chaotic systems, correct choose of identification criterion is required. Set of articles [2–5] was devoted to creation and justification of different criterions to many chaotic systems. Namely, in [2] was proposed a criterion for Lorenz system. But all simulations were limited to one level of measurement error. Moreover, influence of additional noise on system input was neglected. In real chaotic systems, small disturbance on input will lead to essential changes in output. So, the question of identification system workability is important and actual.

Model and identification system

Let's consider Lorenz system with additional disturbance:

$$\begin{cases} \dot{x} = \sigma(y - x) + w_x(t); \\ \dot{y} = x(r - z) - y; \\ \dot{z} = xy - bz. \end{cases}, \quad (1)$$

where x, y, z – system state variables, σ, b, r – parameters, $w_x(t)$ – Gaussian noise on “ x ” channel with parameters σ_x and τ_{wx} . One of output signals, namely “ x ”, is measured with measurement error $w_e(t)$ – Gaussian noise too, with parameters σ_e and τ_{we} .

We consider task as identification of “ r ” parameter, with determines dynamics of considered system. In [2] identification criterion was proposed as:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{1}{\tau_q} (x^2(t) - Q(t)). \quad (2)$$

where τ_q – filter time constant. Generators variable frequency defined as:

$$F(Q) = \exp\left(-\frac{(Q_o - Q_m)^2}{q_\gamma^2}\right) \quad (3)$$

$$\omega = \omega_o (1 + Fk_\omega) \quad (4)$$

Identification process simulation

Simulation of if dynamic system (1) adaptive-searching identification was conducted by the means of developed computer simulation program “qmo2x” [2–5]. The view of the system simulation is shown in fig. 1.

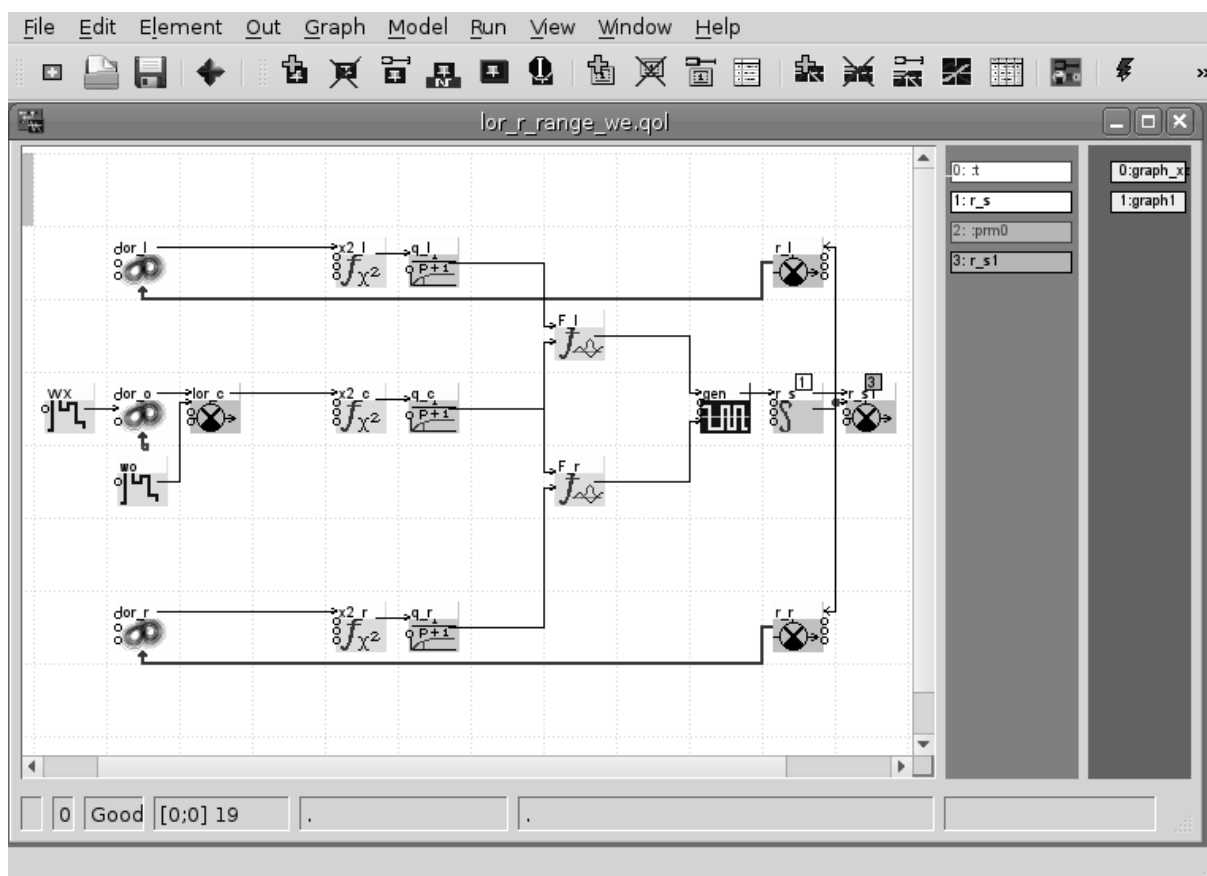


Figure 1 – Identification of system (1) in “qmo2x” program

There are 2 noise generators in this model: one (with label “wx”) for input, and one (“wo”) – for measurement error. The values of τ_x and τ_e was given as equal: $\tau_x = \tau_e = 0.05$, and values of σ_x and σ_e was variable. Parameters of identification system itself was chosen: $\tau_q = 50$, $q_\gamma = 20$, $\omega_0 = 0.1$, $k_\omega = 1$, $k_i = 0.3$, $A = 1$ [3].

In fig. 2 shown an example on identification process simulation with different values of σ_x . Value of parameter r in model was fixed at value $r_o = 40$. This figure demonstrates, that initial phase of identification seems similar, but in case of stringer input noise, searching process stops far from model’s value.

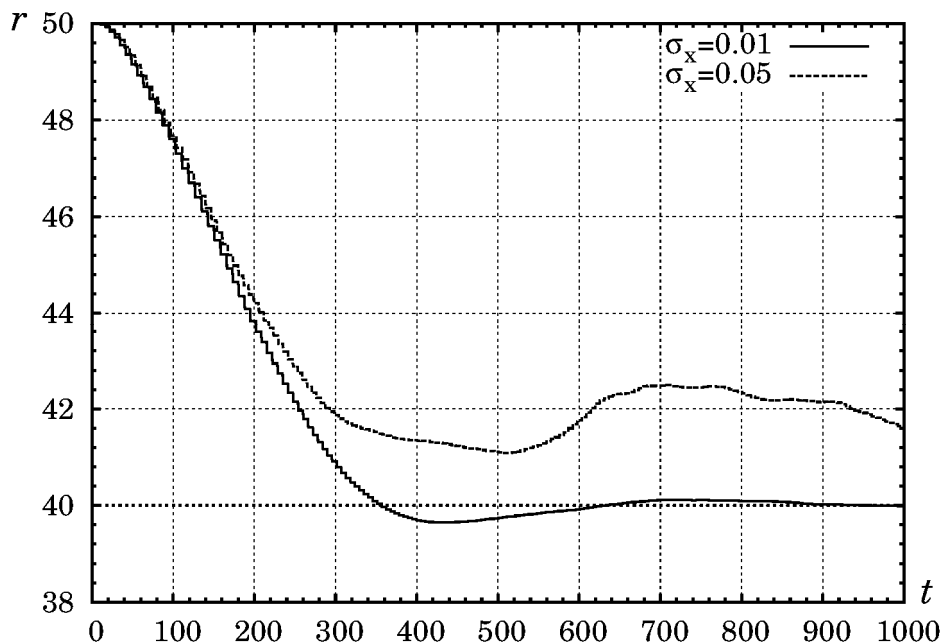


Figure 2 – Identification process simulation

To explore applicability of adaptive-searching identification system with different levels and sources of noise, a series of experiments was conducted. At first, a value of σ_x or σ_e was selected. Than, with fixed stating point $r_s = 40$ model value of parameter was iterated in quite wide range. Final values of coefficient “r” was stored and analyzed.

The results of first experiment series is shown in fig. 3. In this case the level of input noise was zero, and σ_e was iterated. On “y” axes the value of identification error $e_r = e_o - e_m$ is presented. We can see

“plateau”, where identification process works. And at relatively large values of σ_e we receive an essential systematic identification error.

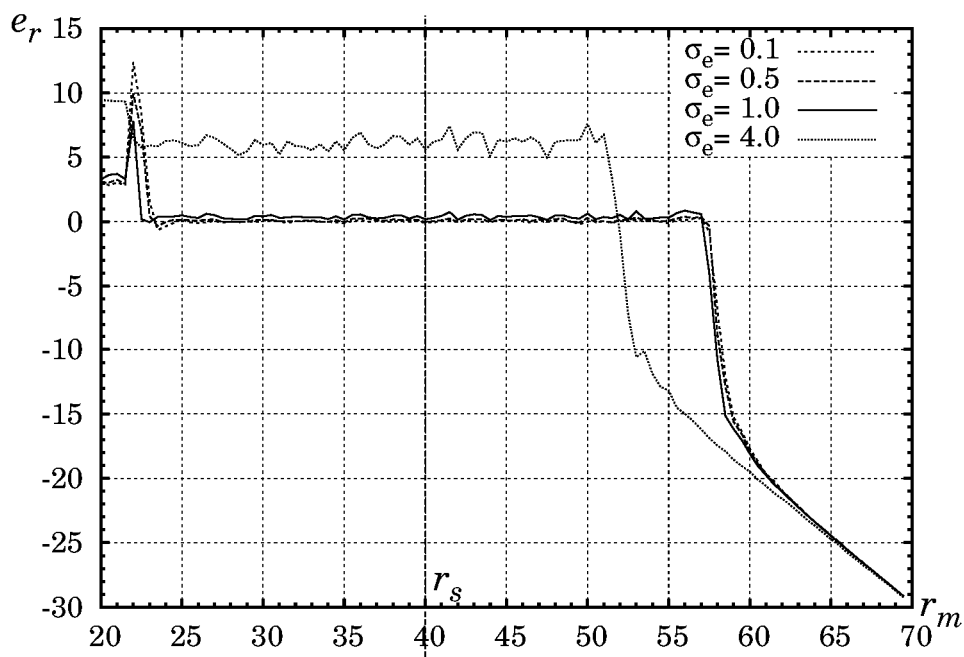


Figure 3 – Dependence $e_r(r_m, \sigma_e)$

Fig. 4 represents the similar results, but in case of $\sigma_e = 0$, and σ_x varies. We can see similar results with the same “plateau”, but the values of σ_x is much smaller, then σ_e in previous plot.

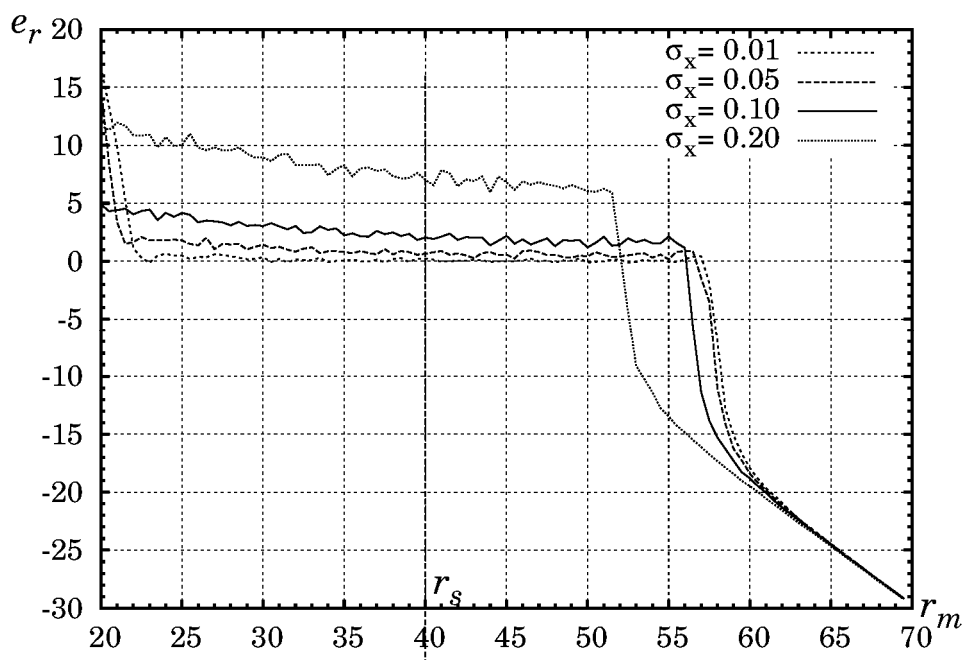


Figure 4 – Dependence $e_r(r_m, \sigma_e)$

This phenomena can be grounded by the fact, that strong filtering properties both criterion filter and generators can suppress even large measurement noise, but noise in Lorenz system itself change the system dynamic.

Conclusions

Results of identification process simulation allow us to make some conclusions:

- identification system able to acquire correct values of parameter r in wide range of noise power;
- system is much vulnerable to input noise, than measurement one;
- expanding of identification system adaptive prosperities is required.

REFERENCES

1. Moon F. Chaotic vibrations: An introduction for applied scientists and engineers. – M.: Mir, 1990. – 312 p (in russian).
2. A.I. Guda, A.I. Mikhalyov. Physical principles on adaptive-search identification criterion synthesis for Lorentz dynamic system // System technologies № 2(79). - Dnepropetrovsk, 2012. - p. 13—10 (in russian).
3. Adaptive-search system identification adjusting in application to chaotic objects / Guda A.I., Mikhalyov A.I. // Adaptive systems of automatic control. – 2013. – № 22(42). – P. 134–139. (in russian)
4. Mikhalyov A.I., Guda A.I. The choice of criterion for adaptive-search identification of a Van der Pol dynamic system // Adaptive systems of automatic control. – 2010. – № 16(36). – P. 154–160 (in russian).
5. Mikhalyov A.I., Guda A.I., Novikova K.Yu. Synthesis of criterion of nonlinear dynamic systems identification on physical principles // Adaptive systems of automatic control. – 2007. – № 11(31). – P. 136–142 (in russian).
6. Magnitskii N.A. Sidorov S.V. New methods if chaotic dynamic M.: Edutorial URSS, 2004 – 320 p (in russian).

В.В. Гнатушенко, О.О. Кавац, Ю.О. Кібукевич

АЛГОРИТМ ПІДВИЩЕННЯ ІНФОРМАТИВНОСТІ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ МІКРОСТРУКТУРИ СТАЛІ

Анотація. Робота присвячена розробці алгоритму підвищення якості цифрових фотограмметричних зображень мікроструктури сталі. Застосування запропонованого алгоритму дозволяє підвищити інформативність вихідного кольорового зображення мікроструктури сталі. Проведено візуальний та чисельний аналіз якості зображень мікроструктури дуплексної двофазної сталі.

Ключові слова: цифрове зображення, фотограмметрія, кольорова модель HSV, вейвлет – перетворення, ентропія, індекс структурної схожості SSIM.

Постановка проблеми

Сучасний металографічний аналіз базується на вивченні макроструктури і мікроструктури металів, дослідження закономірності утворення структури і залежностей впливу структури на механічні, фізико - механічні, електричні та інші властивості металу. В свою чергу мікроскопічний аналіз металів полягає в дослідженні їх структури за допомогою оптичного або електронного мікроскопів або за цифровими зображеннями на спеціально підготовлених зразках. За допомогою методів мікроаналізу визначають форму і розміри кристалічних зерен та інші важливі показники [1, 2].

Якісний аналіз мікроструктури металів на пряму залежить від якості зображень, отриманих за допомогою мікроскопів. Саме тому сьогодні актуальною є задача підвищення якості вихідних зображень мікроструктури металів. Одним з ефективних підходів підвищення інформативності даних є методи їх об'єднання.

Сьогодні існують різноманітні методи об'єднання фотограмметричних зображень, що дозволяють підвищити їх інформативність. Такі методи повинні задовольняти деяким критеріям, в першу чергу це підвищення інформативності зображення та відсутність колірних спотворень [3, 4]. Оскільки існуючі методи у тій чи іншій мірі не в

повному обсязі відповідають зазначеним критеріям, виникає необхідність розробки нового алгоритму підвищення інформативності цифрових зображень мікроструктури металу.

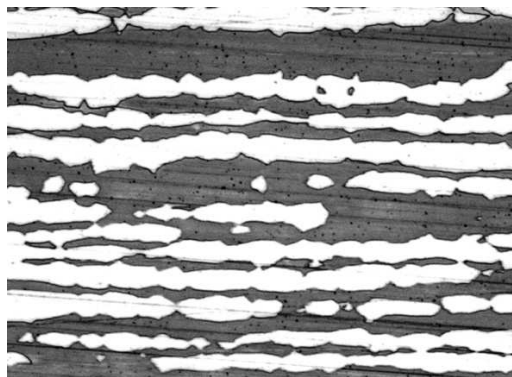
Аналіз останніх досліджень

Використання кольору при металографічних дослідженнях є одним із найбільш важливих аспектів, що напряму пов'язані з обробкою зображення. Колір можна використовувати не тільки для відображення, але і для вилучення необхідної інформації. При описі свого сприйняття кольорового зображення зазвичай використовуються такі поняття як «інтенсивність», «тон» і «насиченість». Саме тому вихідні цвітові компоненти RGB корисно перетворювати у компоненти, що відповідають тону, насиченості та інтенсивності (HSV або HSI).

Основна частина

Головна ідея розробленого алгоритму полягає у використанні кольорової моделі HSV та вейвлет-перетворення з метою підвищення інформативності зображення.

На рисунку 1 представлені первинні зображення мікроструктур дуплексної (аустенітно - феритної) двофазної сталі UNS S31803.



а)



б)

Рисунок 1 – Зображення мікроструктур дуплексної (аустенітно -феритної) двофазної сталі UNS S31803:

а) зображення в градаціях сірого, б) кольорове зображення

За візуальним аналізом первинних вихідних зображень, можна зробити висновок, що первинне кольорове зображення не відрізняється чіткістю на відміну від зображення у градаціях сірого. Отже суть задачі полягає у застосуванні алгоритму з метою підвищення інформативності кольорового зображення.

Першим кроком алгоритму є переведення кольорових компонент RGB у HSV (тон, насиченість, інтенсивність). Наступним кроком алгоритму є об'єднання зображень. Для того щоб отримати результат об'єднання двох зображень, вхідні зображення розкладаються на горизонтальну, вертикальну, діагональну і апроксимуючу складові. Для цього застосовується вейвлет – перетворення [5]. Основною особливістю даних методів є застосування до вихідних зображеннях дискретного вейвлет-перетворення, подальша заміна отриманих коефіцієнтів і виконання зворотного перетворення (IDWT, inverse DWT). Результатом є синтезоване зображення з більш високою інформативністю. Деталі процесу такого злиття, вибір виду вейвлет - перетворення і рівня декомпозиції залежать від конкретного методу [5]. На рисунку 2 наведено графічне подання алгоритму підвищення інформативності цифрових зображень.

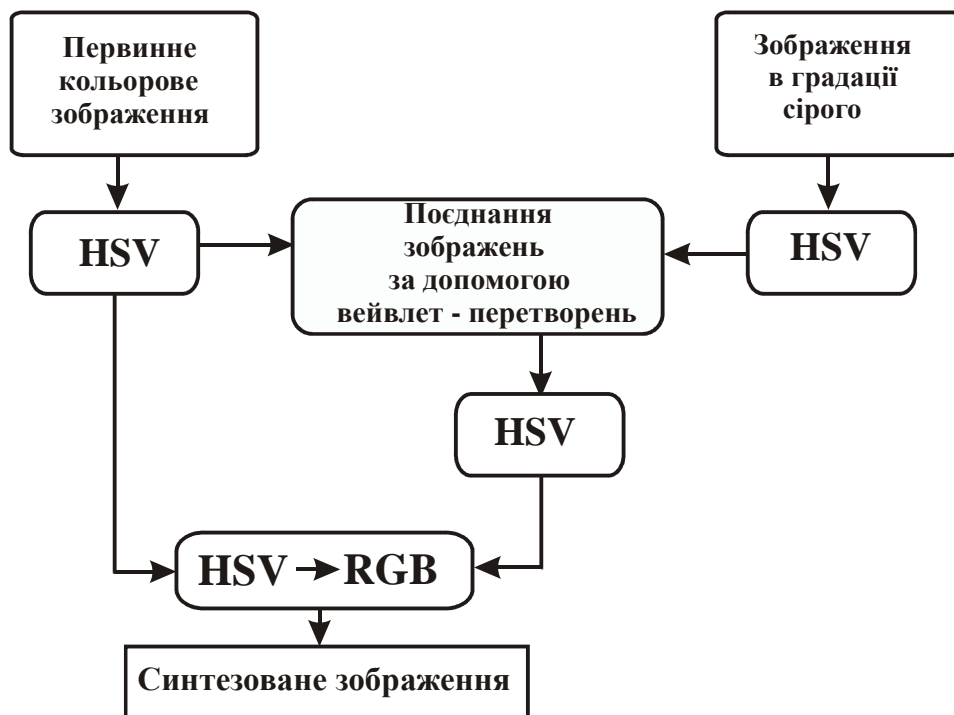


Рисунок 2 – Схема алгоритму

При переведенні з HSV в кольорову модель RGB пропонуємо обрати компоненту V після вейвлет – перетворення. Результатом роботи алгоритму є синтезоване кольорове зображення з більш високою інформативністю. На рисунку 3 наведено синтезоване зображення, отримане за результатом роботи алгоритму.

При роботі з візуальною інформацією завжди доводиться задаватися питанням про її якість. Якість такого складного об'єкта як зо-

ображення є дуже важливим, але водночас і досить нечітким поняттям. Воно оцінюється різними способами у зв'язку з різними завданнями. У даній роботі пропонується використовувати ентропію, що характеризує середню кількість інформації, втраченої при обробці, тобто в нашому випадку ступінь згладжування контурного малюнка і структурних деталей на зображенні. Формула для обчислення ентропії має наступний вигляд:

$$\varepsilon = \sum_{(i,j) \in L} (P(i,j) \log_2 P(i,j)) / \log_2(nm), \quad (1)$$

де $P(i,j) = \frac{H(L(i,j))}{n \times m}$, $H(L(i,j))$ - значення гістограми для елемента з значенням яскравості $L(i,j)$, $n \times m$ - розмірність.

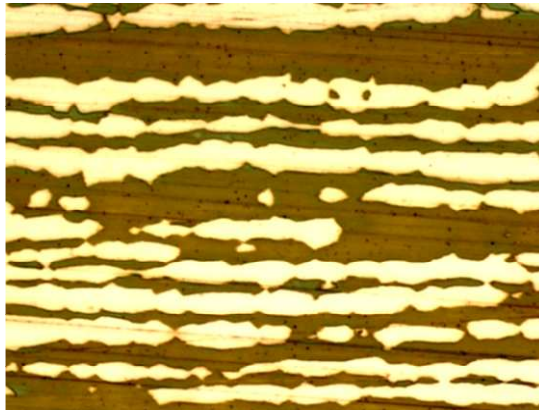


Рисунок 3 – Синтезоване зображення за допомогою розробленого алгоритму

У роботі проведено аналіз зображень мікроструктури дуплексної (аустенітно -феритної) двофазної сталі UNS S31803, отримано значення ентропії та доведено, що на етапі вейвлет-перетворення найефективнішим є застосування вейвлета Добеши. Із попередніх досліджень [5], зроблено висновок, що при об'єднанні зображень найефективнішим є використання вейвлета Добеши порядком вище двадцятого. Отримані результати свідчать про збільшення значення ентропії з 7.375 до 7.801 (і відповідно інформативності первинного кольорового зображення) при застосуванні запропонованого алгоритму. Відповідні значення ентропії представлені на рисунку 4.

Ще одним показником якісного аналізу зображення є індекс структурної схожості (SSIM). Ідея знаходження SSIM полягає у на-

ступному [6]. Нехай є два сигнали однієї розмірності $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ та $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_n)$. Тоді SSIM-індекс визначається за виразом:

$$SSIM = \frac{2\bar{x}\bar{y}}{\bar{x}^2 + \bar{y}^2} \cdot \frac{2\sigma_x\sigma_y}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \cdot \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x\sigma_y}, \quad (2)$$

де дисперсія та коваріація дорівнюють, відповідно

$$\sigma_{xy} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}),$$

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad \sigma_y^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2,$$

\bar{x} , \bar{y} — середні значення інтенсивностей x , y відповідно.

У роботі значення індексу структурної схожості обчислювалися стосовно панхромного з одного боку та первинного й синтезованого зображень з іншого. Отримані дані наведені у таблиці 1.

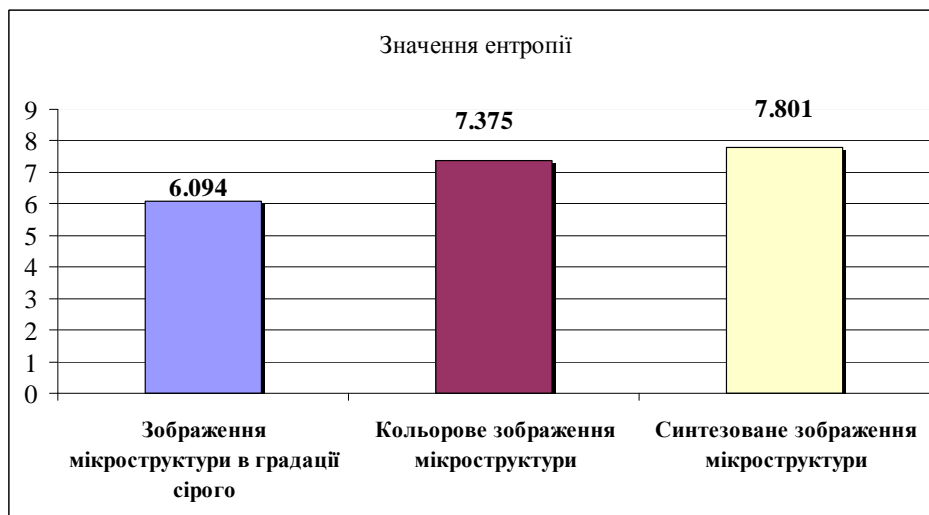


Рисунок 4 – Графічне представлення значень ентропії

Таблиця 1

Значення SSIM

Показник/Канали	R	G	B
SSIM первинного зображення	0.7268	0.7395	0.7612
SSIM синтезованого зображення	0.9311	0.8415	0.8873

Висновки

Проведені дослідження підтвердили ефективність застосування нового алгоритму з метою підвищення якості цифрових зображень мікроструктури металів. За результатами візуального та чисельного аналізу визначено, що застосування нового алгоритму приводить до підвищення інформативності первинних кольорових даних.

ЛІТЕРАТУРА

1. Чубов А. А. Автоматизация металлографического анализа и контроля сплавов с использованием методов цифровой обработки оптических изображений микроструктур: Дис. канд. техн. наук: 05.13.06; - Защищена 09.12.2005; Утв.09.03.2006. - М., 2007. –359 с.: ил.-Библиогр.: с. 14-33, 49-55.
2. Перфильев Д. А. Описание структуры и алгоритм анализа микроструктурных металлографических изображений деформируемых алюминиевых сплавов: Дис. канд. техн. наук: 05.13.17; - Защищена 09.12.2005; Утв.09.03.2006. - Красноярск, 2007. – 124 с.: ил.-Библиогр.: с.5-48.
3. Hnatushenko V. Computer technology more informative multispectral images of the earth surface / V. Hnatushenko, A. Safarov // Applied Geometry and Engineering Graphics. - К.: KNUBA, 2012. - Vol. 89. – С. 140-144.
4. Pohl C. Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications / C. Pohl, J.L. Van Genderen // International journal of remote sensing. – 1998. – Vol. 19. – No. 5. – P. 823-854.
5. Гнатушенко В.В. Дослідження впливу характеристик вейвлетів на ефективність об'єднання фотограмметричних зображень /О. О. Кавац, В.В.Гнатушенко, О.О.Сафаров // «Прикладна геометрія та інженерна графіка», Праці Таврійський державний агротехнічний університет - Випуск №4, Том №56, м. Мелітополь - 2013. стр. 33-40.
6. Wang Z. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity / Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh, and E. P. Simoncelli // IEEE Trans. Image Processing. – 2004. – Vol. 13. – P. 600-612.

СОДЕРЖАНИЕ

Ivaschenko V.P., Shvachych G.G., Tkach M.A. Specifics of constructing of maximally parallel algorithmic forms of the solving of the applied tasks	3
Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Татарченко М.О., Хоменко В.В. Многокритериальный синтез многомассовых электромеханических систем на основе стохастических мультиагентных алгоритмов оптимизации роем частиц	10
Федорович А.И. Исследование непараметрических критериев сдвига в задачах неразрушающего контроля	18
Храмов Д.А. Компьютерное моделирование развертывания весомой нити с помощью физических движков	23
Ivaschenko V.P., Shvachych, M.A. Tkach G.G. Prospects of network interface infiniband in multiprocessor computer systems for solving tasks of calcuations' area spreading.....	32
Skrupskaya L. Oliinyk A., Polyakov M. The method of failure prediction in the high voltage transformer equipment based on the metric classification of diagnostic features' trends.....	44
Бахрушин В., Дудко І.О. Визначення критичних значень критерію типу Колмогорова-Смирнова для деяких типів розподілу методом Монте-Карло	53
Ермакова В., Селиверстова Т.В. Исследование фонетических алгоритмов с помощью оценки Jaro	59
Кириченко Л.О. Сравнительный анализ информационной сложности хаотических и стохастических временных рядов	67
Кирия Р.В., Мищенко Т.Ф., Бабенко Ю.В. Математические модели функционирования систем конвейерного транспорта угольных шахт.....	74
Михайловский Н.В., Бейцун С.В. Исследование чувствительности модели теплового состояния системы «Расплав–Ковш»	88
Островская Е.Ю., Колбун Д.А. Нечеткая модель оценки коэффициента сцепления «Автомобиль-Дорога»	92

Рудакова А.В., Поливода О.В.

Оптимизация подсистем мониторинга распределенных объектов методами спектрального анализа 98

Bondarenko E.

Modern parallel programming tools for solving system of the linear equations by conjugate gradient methods..... 108

Ус С.А., Станина О.Д.

Алгоритм решения двухэтапной задачи размещения производства с предпочтениями 116

Бодянский Е.В., Винокурова Е.А., Мулеса П.П., Перова И.Г.

Диагностирующая нейро-фаззи-система и ее адаптивное обучение в задачах интеллектуальной обработки данных медико-биологических исследований 125

Евтушенко Г.Л., Воюев А.С., Градовский А.О., Грачев Н.А., Макаров В.Г., Штефан Ю.С.

Разработка веб-приложения «Система поддержки принятия решений Nootron 3.0» 136

Дейнеко А.А., Дейнеко Ж.В., Турута А.П., Бодянский Е.В.

Адаптивный метод комбинированного обучения-самообучения нейро-фаззи систем 145

Guda A.I., Mikhalyov A.I.

Influence of input and measurement noise to lorenz system adaptive-searching identification..... 154

Гнатушенко В.В., Кавац О.О., Кібукевич Ю.О.

Алгоритм підвищення інформативності цифрових зображень мікроструктури сталі 159

РЕФЕРАТЫ

УДК 681.3.012:621.1

Іващенко В.П. **Особливості конструювання максимально паралельних паралельних алгоритмічних форм розв'язування прикладних задач** / В.П. Іващенко, Г.Г. Швачич, М.О. Ткач // Системні технології. Регіональний міжвузовський збірник наукових праць. – Випуск 2(91). – Дніпропетровськ, 2014. – С. 03 – 09.

Розглядаються особливості побудови максимально паралельних алгоритмів розв'язування рівнянь теплопровідності методом прямих задач Дірихле та Неймана. Розпаралелювання трьохдіагональних систем рівнянь дозволяє конструювати абсолютно стійкі алгоритми, які мають максимально паралельну структуру. Досягається мінімально можливий час розв'язання прикладних задач на паралельних обчислювальних системах.

Бібл. 13.

УДК 621.3.076

Кузнецов Б.І., Нікітіна Т.Б., Татарченко М.О., Хоменко В.В. **Багатокритеріальний синтез багатомасових електромеханічних систем на основі стохастичних мультіагентних алгоритмів оптимізації роєм часток** // Системні технології. Регіональний міжвузовський збірник наукових праць. – Випуск 2(91). – Дніпропетровськ, 2014. – С. 10 – 17.

Розроблено метод багатокритеріального синтезу анізотропійних регуляторів багатомасових електромеханічних систем, що дозволяє задовольнити різноманітним вимогам, які пред'являються до роботи багатомасових електромеханічних систем в різних режимах. Обґрунтований і розроблений метод вибору матриць, за допомогою яких формується вектор мети стохастичного робастного управління шляхом вирішення задачі нелінійного програмування на основі стохастичних мультіагентних алгоритмів оптимізації роєм часток. Мінімізація анізотропійної норми стохастичної системи дозволяє отримати мінімальну чутливість синтезованої системи до зміни параметрів моделей об'єктів керування і зовнішніх впливів. Результати експериментальних досліджень двомасової електромеханічної системи показали, що застосування синтезованих анізотропійних регуляторів порівняно з типовими регуляторами дозволило скоротити час першого узгодження, підвищити плавність руху на низьких швидкостях, зменшити дисперсію помилки відпрацювання випадкового задаючого впливу.

Бібл. 15.

УДК 620.179

Федорович А.І. **Дослідження непараметричних критеріїв зсуву в задачах неруйнівного контролю** // Системні технології. Регіональний міжвузовський збірник наукових праць. – Випуск 2(91). – Дніпропетровськ, 2014. – С. 18 – 22.

Розглянута задача виявлення змін статистичних закономірностей вибірок вимірювань, які містять інформацію про стан технічних об'єктів, за допомогою критеріїв непараметричної статистики зсуву. Шляхом проведення обчислювальних експериментів дослідженні ймовірності характеристики виявлення цих змін, та отриманні данні для порівняння різних критеріїв. А також для випадків, коли дослідженні вибірки мають різні закони розподілу та кореляцію.

Бібл.2, іл.2.

УДК 629-78

Храмов Д.О. **Комп'ютерне моделювання розгортання вагової нитки за допомогою фізичних движків** // Системні технології. Регіональний міжвузовський збірник наукових праць. – Випуск 2(91). – Дніпропетровськ, 2014. – С. 23 – 31.

Фізичні движки — бібліотеки комп'ютерного моделювання руху систем тіл, що дозволяють додавати і видаляти тіла безпосередньо в ході розрахунків — являють собою зручний інструмент для дослідження динаміки систем, структура яких змінюється під час руху. У роботі запропоновано алгоритм розгортання вагової нитки, складеної з шарнірно зв'язаних твердих тіл, що додаються по мірі розгортання. Моделювання виконано за допомогою движків Box2D і Bullet. Показано можливості верифікації результатів розрахунків.

Бібл.18.

УДК 004.272.43.003.13

Иващенко В.П. **Перспективы применения сетевого интерфейса InfiniBand в многопроцессорных вычислительных системах при решении задач с расширяемой областью вычислений** / В.П. Иващенко, Г.Г. Швачич, М.А. Ткач // Системні технології. Регіональний міжвузовський збірник наукових праць. – Випуск 2(91). – Дніпропетровськ, 2014. – С. 32 – 43.

Статья посвящена исследованию особенностей применения сетевого интерфейса InfiniBand в многопроцессорных вычислительных системах при решении задач, направленных на расширение области вычислений. Выявлены основные закономерности относительно времени счета задачи в зависимости от изменения области вычислений многопроцессорной системы. Выполнены исследования, направленные на определение коэффициента замедления вычислений, связанного с увеличением области вычислений многопроцессорной системы, по сравнению с вариантом компьютера с неограниченной областью вычислений.

Библ. 13, ил. 2, табл. 2.

УДК 621.3.048.1 : 004.93

Скрупська Л.С., Олійник А.О., Поляков М.О. **Метод прогнозування відмов у високовольтному трансформаторному обладнанні на основі метричної класифікації трендів діагностичних ознак** // Системні технології. Регіональний міжвузовський збірник наукових праць. – Випуск 2(91). – Дніпропетровськ, 2014. – С. 44 – 52.

Проаналізовано процес діагностування високовольтного трансформаторного обладнання. Розв'язана задача кластеризації вимірювань діагностичних ознак трансформаторів. Запропоновано метод, який на основі метричної класифікації дозволяє прогнозувати залишковий ресурс високовольтного трансформаторного обладнання. Виконано експериментальне дослідження запропонованого методу, яке підтвердило його ефективність застосування на практиці.

Бібл. 70, іл. 1, табл. 2.

УДК 519.25

Бахрушин В.Е., Дудко И.А. **Определение критических значений критерия типа Колмогорова – Смирнова для некоторых типов распределения методом Монте-Карло** // Системні технології. Регіональний міжвузовський збірник наукових праць. – Випуск 2(91). – Дніпропетровськ, 2014. – С. 53 – 58.

В статье рассмотрен вопрос об оценивании критических значений критерия Колмогорова-Смирнова методом Монте-Карло для случая, когда параметры модели распределения рассчитываются путем минимизации расчетного значения этого критерия.

Библ. 5, ил. 1, табл. 2.

УДК 004.424.62/43

Єрмакова В.О. **Дослідження фонетичних алгоритмів за допомогою оцінки Јаго** // Системні технології. Регіональний міжвузовський збірник наукових праць. – Випуск 2(91). – Дніпропетровськ, 2014. – С. 59 – 66.

Досліджуються існуючі фонетичні алгоритми пошуку за прізвищами, адаптовані для російської мови. Створено програмний продукт, що дозволяє аналізувати роботу алгоритмів: Daitch - Mokotoff Soundex, Soundex, MetaPhoneRU, а також продукт для створення бази даних, яка містить стовпець з вихідними даними і ключі, що дозволяють робити швидший пошук за кожним алгоритмом.

Для оцінки ефективності алгоритмів за допомогою метрики Јаго були взяті дві категорії прізвищ: рідкісні і більш загальні. Окремо порівнювалися прізвища різної довжини. Показані результати роботи програм для кожної категорії.

Бібл. 4, іл. 3, табл. 7.

УДК 519.2:004.9

Кіріченко Л.О. **Порівняльний аналіз інформаційної складності хаотичних і стохастичних часових рядів** // Системні технології. Регіональний міжвузовський збірник наукових праць. – Випуск 2(91). – Дніпропетровськ, 2014. – С. 67 – 73.

У роботі проведено порівняльний рекурентний та ентропійний аналіз реалізацій хаотичних і стохастичних процесів, які мають різну кореляційну структуру. Отримано залежності мір інформаційної складності часових рядів від параметрів процесів. Досліджено часові ряди, які відповідають різним складним динамічним системам.

Бібл.12, табл.3.

УДК 622.647.2

Кирія Р. В. **Математичні моделі функціонування систем конвеєрного транспорту вугільних шахт** / Р. В. Кирія, Т. Ф. Міщенко, Ю. В. Бабенко // Системні технології. Регіональний міжвузовський збірник наукових праць. – Випуск 2(91). – Дніпропетровськ, 2014. – С. 74 – 87.

На підставі методу динаміки середніх для марківських процесів розроблено математичну модель функціонування систем конвеєрного транспорту з послідовним і паралельним з'єднанням конвеєрів і бункерів, а також з деревовидною віяловою і самоподібною структурами. В результаті для цих систем конвеєрного транспорту отримано рекурентний алгоритм визначення їх пропускної спроможності при різних співвідношеннях вантажопотоків, що поступають з лав, і продуктивності живильників. Отримано оцінки мінімальних і максимальних значень пропускної спроможності розглянутих систем конвеєрного транспорту, приведено приклад розрахунку.

Бібл. 12, іл. 7, табл. 2.

УДК 681.88.4

Михайловський М.В., Бейцун С.В. **Дослідження чутливості моделі теплового стану системи «розплав-ківш»** // Системні технології. Регіональний міжвузовський збірник наукових праць. – Випуск 2(91). – Дніпропетровськ, 2014. – С. 88 – 91.

Розроблено математичну модель нестационарного теплопереносу через багатощарову футеровку, а також за рахунок випромінювання з поверхні розплаву. На основі аналізу впливу конструктивних та теплофізичних факторів як основних параметрів для ідентифікації моделі обрані наведені значення внутрішнього діаметра футеровки ковша і ступеня чорноти поверхні розплаву.

Бібл. 5.

УДК 681.3.06

Островська К.Ю., Колбун Д.О. **Нечітка модель оцінки коефіцієнта зчеплення «автомобіль-дорога»** // Системні технології. Регіональний міжвузовський збірник наукових праць. – Випуск 2(91). – Дніпропетровськ, 2014. – С. 92 – 97.

Розглянуто задачу оцінки коефіцієнта зчеплення коліс автомобіля з дорожнім покриття, яка виникає у зв'язку з проведенням автотехнічної експертизи при розслідуванні дорожньо-транспортних пригод.

Існуюча методика дозволяє визначити тільки діапазон можливості значень коефіцієнта зчеплення в залежності від ряду факторів, що впливають.

Бібл. 4.

УДК 681.518

Рудакова Г.В., Поливода О.В. **Оптимізація підсистем моніторингу розподілених об'єктів методами спектрального аналізу** // Системні технології. Регіональний міжвузовський збірник наукових праць. – Випуск 2(91). – Дніпропетровськ, 2014. – С. 98 – 107.

Запропоновано метод оптимізації параметрів функціонування підсистеми моніторингу територіально розподіленої системи на основі застосування методів одновимірного і двовимірного спектрального аналізу. Даний метод дозволяє уникнути інформаційної надмірності і спростити технічну реалізацію контуру ідентифікації стану розподіленого об'єкту, ефективність роботи якого зумовлює ефективність роботи інформаційно-керуючої системи.

Бібл. 7, іл. 6.

УДК 624.04

Бондаренко Е.М. **Сучасні засоби паралельного програмування для вирішення систем лінійних рівнянь методами сполучених градієнтів** // Системні технології. Регіональний міжвузовський збірник наукових праць. – Випуск 2(91). – Дніпропетровськ, 2014. – С. 108 – 115.

Дана робота присвячена порівнянню продуктивності програм які виконуються на CPU і GPU із загальною пам'яттю. Для проведення порівняльних тестів було реалізовано кілька методів сполучених градієнтів для вирішення СЛАР з щільною матрицею. У роботі розглядається приріст продуктивності за рахунок використання акселератора і різних видів технологій для підвищення продуктивності програм. Основна мета даної роботи показати явні переваги використання GPU-акселератора і зробити висновки пов'язані з використанням різних підходів паралелізації.

Літ. 16, іл. 2, табл. 5.

УДК 519.8

Ус С.А., Станина О.Д. **Алгоритм рішення двоетапного завдання розміщення виробництва з перевагами** // Системні технології. Регіональний міжвузовський збірник наукових праць. – Випуск 2(91). – Дніпропетровськ, 2014. – С. 116 – 124.

У статті розглянута двоетапна завдання розміщення виробництва з перевагами. Сформульована математична модель. Запропоновано алгоритм рішення, заснований на генетичному алго-ритмі і методі потенціалів. Представлений алгоритм апробовано на модельній задачі.

Бібл. 6.

УДК 004.032.26

Бодяньський Є.В., Винокурова О.А., Мулеса П.П., Перова І.Г. **Діагностуюча нейрофаззі-система та її адаптивне навчання у задачах інтелектуальної обробки даних медично-біологічних досліджень** // Системні технології. Регіональний міжвузовський збірник наукових праць. – Випуск 2(91). – Дніпропетровськ, 2014. – С. 125 – 135.

Інтелектуальний аналіз даних є потужним засобом при розв'язанні широкого спектру задач, і насамперед діагностування, класифікації, розпізнавання образів тощо. У статті запропоновано діагностичну нейро-фаззі систему для ситуацій, коли розмірність вхідних сигналів має один порядок з обсягом навчальної вибірки, а самі дані надходять на вхід системи у послідовному on-line режимі.

Бібл.: 15, Рис.: 3.

УДК 669.168

Євтушенко Г.Л., Воюєв О.С., Градовський О.О., Грачов М.А., Макаров В.Г., Штефан Ю.С. **Розробка веб-додатку «Система підтримки прийняття рішень NooTron 3.0»** // Системні технології. Регіональний міжвузовський збірник наукових праць. – Випуск 2(91). – Дніпропетровськ, 2014. – С. 136 – 144.

Розглядається процес розробки третього релізу веб-додатка «СППР NooTron» (<http://nootron.net.ua>) за методологією Scrum, з використанням сучасних інструментів розробки. Основне завдання третього релізу – розробка режиму доступу зареєстрованого користувача (зберігання проектів задач, генерація звітів). Це дозволить вирішувати комплексні багатокритеріальні задачі такі, як багатокритеріальна оптимізація технологічних процесів, багатокритеріальне ранжування великої кількості об'єктів тощо.

Бібл. 8, іл. 2

УДК 004.032.26

Дейнеко А.А., Дейнеко Ж.В., Турута А.П., Бодянський Є.В. **Адаптивний метод комбінованого навчання-самонавчання нейро-фаззі систем** // Системні технології. Регіональний міжвузовський збірник наукових праць. – Випуск 2(91). – Дніпропетровськ, 2014. – С. 145 – 153.

Запропоновано підхід до комбінованого навчання синаптичних ваг і центрів функцій приналежності нейро-фаззі систем, заснований на використанні як правил навчання з учителем, так і самонавчання.

Бібл. 14.

УДК 681.876.2

Гуда А.И. **Вплив вхідного шуму та шуму вимірювання при адаптивно-пошукової ідентифікації системи Лоренса** / Михальов О.И. // Системні технології. Регіональний міжвузовський збірник наукових праць. – Випуск 2(91). – Дніпропетровськ, 2014. – С. 154 – 158.

У статті розглядається вплив вхідного шуму та шуму вимірювання на процес адаптивно-пошукової ідентифікації. Визначаються діапазони придатності метода, що розглядається.

Бібл: 6. ілл: 4.

УДК 528.8:004

Гнатушенко В.В. **Алгоритм повышения информативности цифровых изображений микроструктуры стали** / В.В. Гнатушенко, А.А. Кавац, Ю.О. Кибукевич // Системні технології. Регіональний міжвузовський збірник наукових праць. – Випуск 2(91). – Дніпропетровськ, 2014. – С. 159 – 164.

Стаття посвящена розробці нового алгоритма підвищення візуального качества цифровых фотограмметрических изображений микроструктуры стали. По результатам проведенного анализа определено, что применение нового алгоритма приводит к повышению информативности изображений микроструктуры стали.

Библ. 6, рис. 4, табл. 1.

UDC 681.3.012:621.1

Ivaschenko V.P. **Specifics of constructing of maximally parallel algorithmic forms of the solving of the applied tasks** / V.P. Ivaschenko, G.G. Shvachych, M.A. Tkach // System technologies. N 2(91) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.3 - 09.

The features of construction of maximally parallel algorithms of thermal conductivity equation's solution with the method of direct tasks of Dirichlet and Neumann are considered. Parallelization of the three-diagonal systems of equations allows to construct absolutely steady algorithms, having a maximal parallel form. It is achieved minimum time period of solving the applied tasks on parallel computing devices.

Bibl. 13.

UDC 621.3.076

Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Tatarchenko M.O., Khomenko V.V. **Multicriterion synthesis of multimass electromechanical systems based on stochastic multiagents optimization algorithms by particle swarm** // System technologies. N 2(91) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.10 - 17.

A method of multicriterion anisotropic regulators synthesis by multimass electromechanical systems that can satisfy various requirements that apply to the work of multimass electromechanical systems in different modes is developed. Proved and developed a method of selecting the matrices with which formed the target vector stochastic robust control by solving a nonlinear programming problem based on stochastic multiagents optimization algorithms by particle swarm. Minimizing the anisotropic norm of a stochastic system provides a minimum sensitivity of the synthesized system to modify the plant models and external influences. The results of experimental studies of two-mass electromechanical system showed that the use of synthesized anisotropic regulators compared with standard controls has reduced the time of the first agreement, to increase the smoothness of motion at low speeds, to reduce the variance of the random errors mining master control.

Ref. 15.

UDC 620.179

Fedorovich A.I. **Study nonparametric shift in problems NDT** // System technologies. N 2(91) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.18 - 22.

The problem of detecting a change in the statistical regularities of measurement samples, containing information about the state of technical objects, using the criteria of nonparametric statistics shifts. By conducting computational experiments investigated the probabilistic characteristics of detecting these changes and new data to compare different criteria. And also for the cases when the initial sample of random variables have different laws of probability distributions and correlation.

Bibl. 2, ill. 2.

UDC 629-78

Khramov D. A. **Computer simulation of heavy rope's deployment with use of physics engines** // System technologies. N 2(91) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.23 - 31.

Physical engines are the computer libraries for simulation of multibody systems motion, which can add or remove the body directly in the calculations runtime. They are a useful tool for studying the dynamics of systems whose structure changes during movement. An algorithm of heavy rope's deployment composed of pivotally connected rigid bodies that adds in deployment sequence has been proposed. Simulations were performed using the Box2D and Bullet engines. The possibilities of verifying the results were demonstrated.

Bibl. 18.

UDC 004.272.43.003.13

Ivaschenko V.P. **Prospects of network interface infiniband in multiprocessor computer systems for solving tasks of calculations' area spreading** / V.P. Ivaschenko, G.G. Shvachych, M.A. Tkach // System technologies. N 2(91) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.32 - 43.

The article investigates the specific application InfiniBand network interface in a multiprocessor computer system for tasks aimed at increasing the computational domain. The main patterns regarding the computing time of a task depending on changes in the field of computing in a multiprocessor system. The carried out researches had the aim to determine the deceleration rate calculations. The rate is connected with an increase in the computational domain of multiprocessor system in comparison with a computer having the unlimited field of computing.

Bibl. 13, ill. 2, tabl. 2.

UDC 621.3.048.1 : 004.93

Skрупskaya L.S., Oliinyk A.A., Polyakov M.A. **The Method of failure prediction in the high voltage transformer equipment based on the metric classification of diagnostic features' trends** // System technologies. N 2(91) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.44 - 52.

The process of diagnosing of high-voltage transformers has been analyzed. The problem of measurements clustering of transformers' diagnostic features has been solved. The method which is based on the metric classification and allows predicting the residual life of the high-voltage transformer equipment has been proposed. An experimental study of the proposed method which confirmed its effectiveness in practice has been performed.

Bibl. 7, il. 1, tabl. 2.

UDC 519.25

Bakhrushin V.E., Dudko I.O. **Determination of critical values of the Kolmogorov - Smirnov type criterion for some types of distribution by the Monte-Carlo method** // System technologies. N 2(91) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.53 - 58.

In the article it is considered the problem of the critical values estimating for the Kolmogorov – Smirnov type criterion by Monte Carlo method in the case when the parameters of distribution models are obtained by minimizing the calculated values of this criterion.

Bibl. 5, figs. 1, tabl. 2.

UDC 004.424.62/43

Yermakova V.O. Selivyorstova T.V. **Study of Phonetic Search Algorithms** // System technologies. N 2(91) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.59 - 66.

Existing phonetic search algorithms by surnames, adapted for Russian language are investigated in the article. Software that allows to analyze the work of: Daitch-Mokotoff Soundex, Soundex, MetaPhoneRU algorithms, as well as a product which creates a database containing a column with the original data having keys corresponding to the above mentioned algorithms are created.

To evaluate the efficiency of algorithms using the Jaro distance two categories of names: rare and more common are taken. Surnames of different lengths were compared. The work results for each category are shown.

Bibl.: 4, im.3, tab. 7.

UDC 519.2:004.9

Kirichenko L.O. **Comparative analysis of the complexity of chaotic and stochastic time series** // System technologies. N 2(91) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.67 - 73.

The comparative analysis of the statistical properties of realizations of chaotic and stochastic processes having different correlation structure. Depending on complexity measures of time series of process parameters were obtained. The time series corresponding to a variety of complex dynamical systems were investigated.

Bibl. 12, tab.3.

UDK 622.647.2

Kiriya R. **Mathematical models of coal mines conveyer transport systems functioning** / R. Kiriya, T. Mishenko, Yu. Babenko // System technologies. N 2(91) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.74 - 87.

Based on dynamics of average method for Markov processes we developed mathematical model of functioning of conveyer transport systems with serial and parallel connection of conveyer and hoppers, and also with dendritic harp and self-similar structures. As result for these conveyer transport systems we obtained recursive algorithm to determine their carrying capacity at various ratios of incoming cargo traffic from lavas and productivity of batcher. We obtained minimum and maximum values of carrying capacity of mentioned above conveyer transport systems, also was given example of calculations.

Bibl. 12, ill. 7, tabl. 2.

UDK 681.88.4

Mikhajlovskiy N.V., Beitsoun S.V. **Sensitivity analysis model of the thermal state of the system "melt-ladle"** // System technologies. N 2(91) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.88 - 91.

A mathematical model of unsteady heat transfer through a multilayer lining, as well as due to the radiation from the surface of the melt. On the basis of analysis of the impact of

structural and thermal factors as the main parameters for identifying the model selected values given inner diameter ladle lining and the emissivity of the surface of the melt.

Bibl. 5.

UDC 681.3.06

Ostrovsky K., Kolbun D. **Fuzzy estimation model of clutch coefficient «car - road»** // System technologies. N 2(91) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.92 - 97.

Task of evaluating the coefficient of vehicle traction with the road surface arises in connection with the autotechnical expertise in investigating traffic accidents.

The current method allows you to specify only the range of possible values of the friction coefficient depending on a number of influencing factors.

Bibl. 4.

UDC 681.518

Rudakova G.V., Polivoda O.V. **Optimization of monitoring subsystems of the distributed objects by methods of the spectral analysis** // System technologies. N 2(91) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.98 - 107.

The method of functioning parameters optimization subsystem of territorially distributed monitoring system which basis on application of spectral analysis methods (one-dimensional and bidimensional) is offered. The given method allows to avoid information redundancy and to simplify technical realization of state identification contour of the distributed object which efficiency causes an information-control system efficiency.

Bibl. 7, il. 6.

UDC 624.04

Bondarenko E. **Modern Parallel Programming Tools for Solving System of the Linear Equations by Conjugate Gradient Methods** // System technologies. N 2(91) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.108 - 115.

The work is devoted to comparison the performance of programs which are executed on the CPU and GPU with shared memory space. For performance tests several conjugate gradient methods for solving system of linear equations with the dense matrix were implemented. At the work is viewed the performance boost through the use of the accelerator and various types of technologies for program acceleration. The primary purpose of this paper is to show the distinct advantages of using GPU-accelerator and make the conclusions associated with the use of various parallelization approaches.

Bibl. 16, fig. 2, tab. 5.

UDC 519.8

Us S.A., Stanina O.D. **Algorithm for solving two-step problem of locating production with preferences** // System technologies. N 2(91) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.116 - 124.

The article describes a two-step task of locating production with preferences. The mathematical model. Proposed solution algorithm based on genetic algorithm and the method of potentials. The algorithm is tested on a model problem.

Bibl. 6.

UDC 004.032.26

Bodyanskiy Ye.V., Vynokurova O.A., Mulesa P.P., Perova I.G. **Диагностирующая neuro-fuzzy system and its adaptive learning algorithm in the medical and biological Data Mining tasks** // System technologies. N 2(91) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.125 - 135.

Data Mining is powerful tools for solving a wide range of applications, primarily for diagnosis, classification, pattern recognition, etc. Diagnosing neuro-fuzzy-system for case, when input signals dimensionality size has the same order as learning set one, and signals are fed in system input in on-line mode.

Item: 15, Fig.: 3.

UDC 669.168

Evtushenko G.L., Voyuev A.S., Gradovskiy A.O., Grachev N.A., Makarov V.G., Shtefan J.S. **The development of the web-application «Decision Support System NooTron 3.0»** // System technologies. N 2(91) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.136 - 144.

The development process of the third release of the web-application «DSS NooTron» (<http://nootron.net.ua>) with methodology Scrum and using modern development tools is considered. The main task of the third release is the developing of the logged on user mode (for projects tasks saving, reports generating). It will allow solving complex multi-criteria problems such as multi-criteria optimization of technological processes, multi-criteria ranking of a large number of objects and etc.

Refs. 8, ill. 2

UDC 004.032.26

Deyneko A.A. Deyneko J.V., Turuta A.P., Bodyanskiy E.V. **Adaptive method combined learning self-learning neuro-fuzzy systems** // System technologies. N 2(91) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.145- 153.

An approach to the combined training synaptic weights and centers of membership functions of the neuro-fuzzy systems based on the use of rules as supervised learning, and self.

Bibl. 14.

UDC 681.876.2

Guda A.I. **Influence of input and measurement noise to Lorenz system adaptive-searching identification** / Mikhalyov A.I. // System technologies. N 2(91) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.154- 158.

In this article the influence of input and measurement errors to the process of adaptive-searching identification is researched. Ranges of workability are investigated.

Bibl: 6. ill: 4.

UDC 528.8:004

Hnatushenko V.V. **Algorithm to improve the informativeness of photogrammetric images of the steel microstructure** / V.V. Hnatushenko, A.A Kavats, I.O. Kibukevych // System technologies. N 2(91) - Dnipropetrovsk, 2014.- P.159- 164.

Article is devoted to improve of quality of digital photogrammetric images of the steel microstructure. According to the results of visual and numerical analysis determined that the application of the new algorithm leads to more informative images of the steel microstructure.

Bibl. 6, Fig. 4, Tabl. 1.

АВТОРЫ ВЫПУСКА

Иващенко Валерій Петрович - д.т.н., проф., перший проректор НМетАУ.

Швачич Геннадій Григорович - д.т.н., проф., НМетАУ.

Ткач Максим Олександрович - НМетАУ.

Кузнецов Борис Иванович - д.т.н., проф., заведующий отделом проблем управления магнитным полем Института технических проблем магнетизма.

Никитина Татьяна Борисовна - д.т.н., профессор кафедры системного анализа и управления Национального технического университета «Харьковский политехнический институт».

Татарченко Максим Олегович - аспирант кафедры системного анализа и управления Национального технического университета «Харьковский политехнический институт».

Хоменко Виктор Витальевич - аспирант кафедры системного анализа и управления Национального технического университета «Харьковский политехнический институт».

Федорович Анна Ігорівна - Дніпропетровський національний університет ім. Олесья Гончара, викладач кафедри Радіоелектронної автоматики, фізико-технічного факультету.

Храмов Дмитрий Александрович - старший научный сотрудник, к.т.н., Институт технической механики НАН Украины и НКА Украины, Отдел системного анализа и проблем управления.

Скрупская Людмила Степановна - аспирант, ассистент кафедры электрических и электронных аппаратов Запорожского национального технического университета.

Олейник Андрей Александрович – к.т.н., доцент кафедры программных средств Запорожского национального технического университета.

Поляков Михаил Алексеевич – к.т.н., доцент кафедры электрических и электронных аппаратов Запорожского национального технического университета.

Бахрушин Володимир Євгенович - академік АН вищої школи України, д.фіз.-мат.н., професор, Класичний приватний університет, м. Запоріжжя.

Дудко Іван Олександрович - аспірант, Класичний приватний університет, м. Запоріжжя.

Ермакова В.О. – студентка 4-ого курса Национальной металлургической академии Украины, кафедра Информационных технологий и систем.

Селиверстова Т.В. – к.т.н, доцент Национальной металлургической академии Украины, кафедра Информационных технологий и систем.

Кириченко Людмила Олеговна – д.т.н., профессор кафедры прикладной математики Харьковского национального университета радиоелектроники.

Кирия Руслан Виссарионович - к.т.н., ст. научн. Сотрудник, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины.

Мищенко Тамара Федоровна - ведущий инженер, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины.

Бабенко Юлия Васильевна – аспирантка, Национальная металлургическая академия Украины.

Бейцун Сергей Викторович - к.т.н., доцент кафедры автоматизации производственных процессов НМетАУ.

Михайловский Николай Владимирович - к.т.н., доцент кафедры автоматизации производственных процессов НМетАУ.

Островская Екатерина Юрьевна – к.т.н., доцент кафедры Информационных технологий и систем, НМетАУ.

Колбун Дмитрий Александрович – студент 5-курса кафедры Информационных технологий и систем, НМетАУ.

Рудакова Ганна Володимирівна – к.т.н., доцент кафедры «Технічна кібернетика», Херсонський національний технічний університет.

Поливода Оксана Валеріївна - ассистент кафедры «Технічна кібернетика», Херсонський національний технічний університет.

Бондаренко Эдуард Николаевич – бакалавр, Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара.

Станіна Ольга Дмитрівна - аспірант каф. САіУ, ДВНЗ «Національний гірничий університет».

Бодянский Евгений Владимирович – д.т.н., профессор, научный руководитель Проблемной научно-исследовательской лаборатории АСУ, профессор кафедры штучного интеллекта, Харьковский национальный университет радиоэлектроники.

Винокурова Елена Анатоліївна – д.т.н., ведущий научный сотрудник Проблемной научно-исследовательской лаборатории АСУ, профессор кафедры безопасности информационных технологий, Харьковский национальный университет радиоэлектроники.

Мулеса Павло Павлович – викладач кафедри кібернетики і прикладної математики, ДВНЗ «Ужгородський національний університет».

Перова Ирина Геннадіївна – к.т.н., старший викладач кафедри біомедичної інженерії, Харьковский национальный университет радиоэлектроники.

Евтушенко Галина Львовна - аспирант кафедры информационных технологий и систем НМетАУ.

Воюев Александр Сергеевич - студент кафедры информационных технологий и систем НМетАУ.

Градовский Александр Олегович - студент кафедры информационных технологий и систем НМетАУ.

Грачев Николай Анатольевич - студент кафедры информационных технологий и систем НМетАУ.

Макаров Владимир Геннадьевич - студент кафедры информационных технологий и систем НМетАУ.

Штефан Юлия Сергеевна - студент кафедры информационных технологий и систем НМетАУ.

Дейнеко Анастасия Александровна - аспирантка кафедры искусственного интеллекта, Харьковский национальный университет радиоэлектроники.

Дейнеко Жанна Валентиновна - доцент кафедры медиасистем и технологий, Харьковский национальный университет радиоэлектроники.

Турута Алексей Петрович - доцент кафедры программной инженерии, Харьковский национальный университет радиоэлектроники.

Гуда Антон Игоревич – к.т.н, доцент кафедры ІТС НМетАУ.

Михальов Олександр Ілліч – д.т.н, професор, зав. кафедри ІТС НМетАУ.

Гнатушенко Володимир Володимирович - д.т.н., професор, завідувач кафедри автоматизованих систем обробки інформації Дніпропетровського національного університету імені Олеся Гончара.

Кавац Алена Александровна - доцент кафедры «Информационных технологий и систем», Национальная металлургическая академия Украины.

Кибукевич Юлия Олеговна - аспирант кафедры «Информационных технологий и систем», Национальная металлургическая академия Украины.