

УДК 622.785

Д.А. Ковалёв, Н.Д. Ванюкова, А.Ю. Худяков, М.Н. Бойко
**АНАЛІЗ РОБОТИ ОБПАЛЮВАЛЬНОЇ МАШИНИ ІЗ
ЗАСТОСУВАННЯМ РЕЖИМУ
ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ СУШКИ**

Анотація. За результатами моделювання роботи зони сушки обпалювальної машини ОК-1-520 у високотемпературному режимі показано, що даний режим дозволяє не тільки повністю провести видалення вологи з обкотишів, але і досить інтенсивно реалізувати їх окислення, оптимізувати розподіл температур в шарі, а також підвищити продуктивність обпалювальної машини.

Ключові слова: обпалювальна машина, обкотиш, високотемпературна сушка.

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

Враховуючи вищесказане, аналіз роботи обпалювальної машини із застосуванням високотемпературного режиму сушки представляє значний практичний інтерес вирішення завдання підвищення ефективності процесу обпалу обкотишів.

Аналіз досягнень і публікацій. Складність проблеми раціональної організації роботи зони сушки обпалювальної

конвеєрної машини обумовлює різноманіття підходів до її рішення. [3,4] Одним з таких підходів є, розглянута нами в роботі [5], високотемпературна сушка обкотишів, ефективність практичного застосування якої вимагає перевірки у виробничих, або ж в максимально наближених до них, умовах.

Постановка завдання. Метою даної статті є дослідження роботи обпалювальної конвеєрної машини із застосуванням режиму високотемпературної сушки і подальший аналіз отриманих результатів, який передбачає визначення впливу режиму сушки на міцність обкотишів, вміст FeO в них, розподіл температур по висоті шару і продуктивність обпалювальної машини. Вищезгадане дослідження передбачається провести із застосуванням методів математичного моделювання.

Результати. Методика дослідження. Використана для дослідження динамічна математична модель [6], ґрунтується на описі реальних фізико-хімічних і теплових механізмів, залучених в процес обпалу обкотишів. Перетворення в цій системі аналізуються з позицій кінетики, заснованої на кінетичних рівняннях. Для загального випадку топохімічного реагування модель масопереносу включає хімічну взаємодію і дифузійний газопереносу в прикордонній плівці і через пористий шар продукту реагування.

У загальному вигляді модель представлена наступною системою рівнянь [6]:

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

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

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

Вирішення системи (1) проводилося методом кінцевих різниць по явній схемі. Результати наведені у таблиці 1.

Для визначення міцності обпалених обкотишів на стиснення використовується математична модель, яка включає моделі для визначення впливу на процес зміцнення: хімічного складу сирих обкотишів – через використання показників основності CaO/SiO_2 , глиноземного $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ і магнезійного модулів MgO/SiO_2 ; динаміки нагріву обкотишів; температури обпалу; діаметру обкотишів.

В якості об'єкту для дослідження була обрана обпалювальна машина ОК-1-520, як найбільш сучасна з використовуваних в даний час і така, що відповідає більшості вимог, які пред'являються до обпалювальних агрегатів конвеєрного типу. На наш погляд, ефективність застосування розробленого режиму високотемпературної сушки обкотишів буде найбільш показова саме на прикладі роботи сучасної обпалювальної машини, значно вдосконаленої порівняно з прототипами, проте такою, що зберігає істотний резерв для модернізації за рахунок впровадження нових технологічних схем.

Між базовим і дослідним (високотемпературним) періодами встановлені наступні відмінності:

- базовий період: температура в зоні сушки 1 (1а,1,2,3,4 вакуум-камери) – 350 °С, швидкість газу – 1,2 м/с (рух газу знизу вверху); температура в зоні сушки 2 (5,6 вакуум-камер) – 450 °С, швидкість газу – 1,2 м/с (рух газу зверху вниз);

- дослідний період: температура в зоні сушки 1 (1а,1,2,3 вакуум-камер) – 350 °С, швидкість газу – 1,2 м/с (рух газу знизу вверху); температура в зоні сушки 1 (4-а вакуум-камера) – 500 °С, швидкість газу – 0,6 м/с (рух газу знизу вверху); температура в зоні сушки 2 (5-а вакуум-камера) – 800 °С, швидкість газу – 0,7 м/с (рух газу зверху вниз); температура в зоні сушки 2 (6-а вакуум-камера) – 1000 °С, швидкість газу – 0,85 м/с (рух газу зверху вниз).

Також в дослідному періоді температура в зоні підігріву складала 1100 °С.

У обох періодах: висота шару обкотишів - 0,3 м, діаметр обкотишів - 15 мм, вміст кремнезему - 7,56%, вапняку - 5%, бентоніту - 0,5%.

Швидкість руху обпалювальних візків в базовому періоді складала 3,2 м/хв. При моделюванні дослідного періоду змінювали швидкість руху обпалювальних візків, підбираючи її так, щоб вологовміст обкотишів на вході в зону підігріву був не вище, ніж у базовому періоді.

Як вказувалось в постановці завдання, аналізували вплив режиму сушки на міцність обкотишів, зміст FeO, розподіл температур по висоті шару і продуктивність обпалювальної машини.

Обробка матеріалу і результати. Швидкість руху обпалювальних візків машини в дослідному періоді склала 3,41 м/хв. Отримані в результаті дослідження, підсумки моделювання обпалу обкотишів, з різними режимами сушки представлені в таблиці 1. У заголовках стовбців даної таблиці використані наступні умовні позначення: W, % - вміст вологи в обкотишах по висоті шару в кінці зони сушки, %; T, °C - температура обкотишів по висоті шару в кінці зони сушки, °C; FeO, % - розподіл FeO по висоті шару обкотишів в кінці зони сушки, %; Міцність, кг/ок. - міцність обпалених обкотишів по висоті шару, кг/обкотиш.

Розрахунок питомої продуктивності проводили за наступною формулою:

$$P_{num} = 60 \cdot k \cdot b \cdot h \cdot \rho \cdot (1 - \delta) \cdot v / S, \quad (2)$$

де: k – вихід придатного (0,97); b – ширина машини, м; h – висота шару, м; ρ – щільність обкотишів, т/м³; v – швидкість машини, м/хв; δ – порозність шару; S – площа машини, м².

Питома продуктивність обпалювальної машини склала: у базовому періоді - 0,851 т/(м²ч); у дослідному періоді - 0,907 т/(м²ч). Приріст продуктивності склав 6,56 %.

Вище наведені результати моделювання роботи обпалювальної конвеєрної машини ОК-1-520, з використанням високотемпературного режиму сушки, свідчать про перспективність його застосування. Сушка обкотишів в дослідному високотемпературному режимі, в порівнянні з базовим при температурах 350-450°C, дає наступні переваги:

- дозволяє здійснити окислення шару обкотишів приблизно на 50%, в той час, як в базовому режимі значного окислення не відбувається (рис. 1.а);

- сприяє певному поліпшенню якості кінцевого продукту: міцність на стиснення обпалених обкотишів в дослідному періоді, в порівнянні з базовим, зросла в середньому по висоті шару на 5,44-5,58% (рис. 1.б);

- забезпечує сприятливіший, в порівнянні з базовим режимом, прогрів шару, чим здійснює підготовку до переходу до зони підігріву (рис. 1.в) і дає можливість підвищити температуру в зоні підігріву до 1100°C ;

- підвищує продуктивність обпалювальної конвеєрної машини на 6,56% .

Таблица 1

Підсумки моделювання роботи конвеєрної машини ОК-1-520 в базовому і високотемпературному режимах

Висота в шарі, мм	Базовий режим				Високотемпературний режим			
	Wок, %	tок, оС	FeO, %	Міцність, кг/ок.	Wок, %	tок, оС	FeO, %	Міцність, кг/ок.
300	0	403	16,54	257	0	829	5,57	271
270	0	387	16,69	254	0	723	6,06	264
240	0	369	17,23	253	0	574	6,49	259
210	0	348	17,75	247	0	508	7,19	249
180	0	320	18,00	239	0	439	8,54	241
150	0	283	18,40	231	0	363	9,38	233
120	0	229	19,00	228	0	275	10,00	230
90	0,3	151	19,77	217	0	173	10,11	221
60	3	98	20,50	203	1,7	157	11,07	213
30	4,9	60	21,02	197	3,9	100	11,26	208

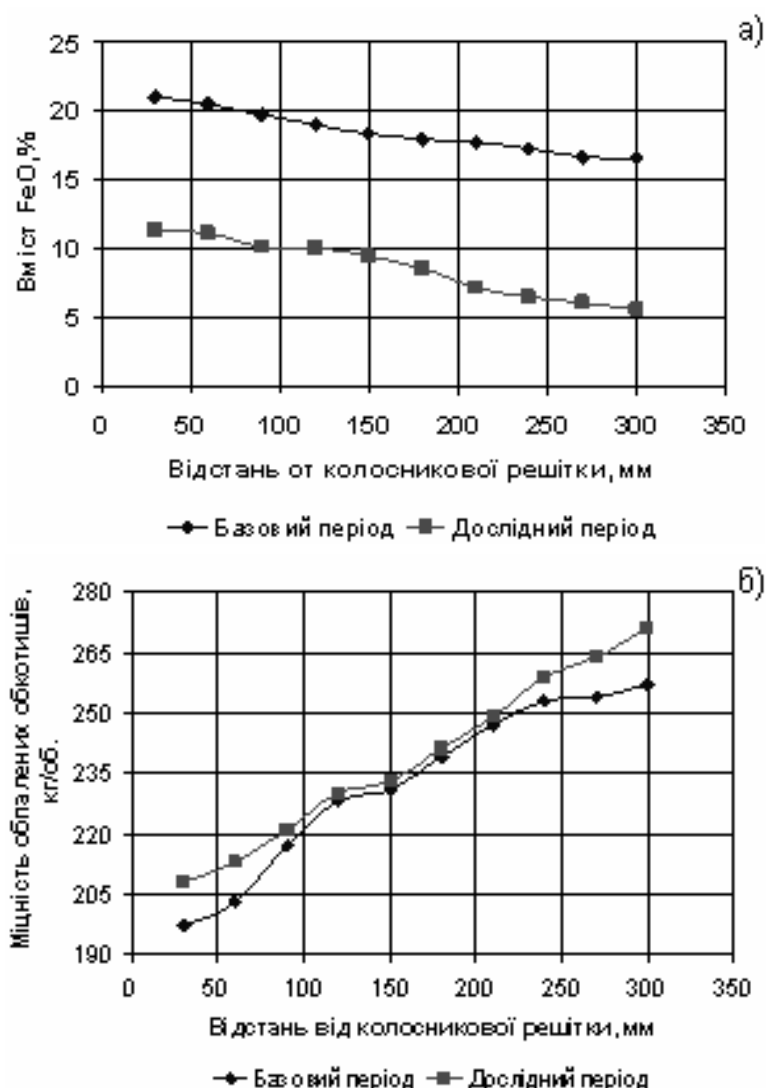


Рисунок 1 - Результаты моделирования работы обпалювальної конвеєрної машини ОК-1-520:

- а) розподіл FeO по висоті шару обкотишів в кінці зони сушки;
 б) міцність обпалених обкотишів

Висновки. Моделювання роботи зони сушки обпалювальної машини ОК-1-520 у високотемпературному режимі показало, що даний режим дозволяє не тільки повністю провести видалення вологи з обкотишів, але і досить інтенсивно реалізувати їх окислення (окислюється до 50% FeO), оптимізувати розподіл температур в шарі, а також підвищити продуктивність обпалювальної машини на 6,56%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кокорин Л.К., Лелеко С.Н. Производство окисленных окатышей.- Екатеринбург: Изд-во «Уральский центр ПР и рекламы».- 2004.- 208с.
2. Абзалов В.М. Эффективность работы зон сушки обжиговых машин. // Сталь.- 2008.- № 12.- С.25-27.
3. Абзалов В.М. Интенсификация процесса сушки окатышей на обжиговых конвейерных машинах // Сталь.- 2006.- № 6.- С.28-30.
4. Пути интенсификации процесса сушки окатышей на конвейерных машинах / Е.В. Некрасова, А.П. Буткарев, Г.М. Майзель, С.А. Мариев.- В кн.:Интенсификация процессов окускования железорудного сырья. Свердловск: Уралмеханобр, 1985, с. 58-63
5. Ковалев Д.А., Худяков А.Ю. Исследование и разработка режимов высокотемпературной сушки окатышей. // Новини науки Придніпров'я. – 2010. – №1.– С. 176-180.
6. Разработка динамической математической модели для управления обжигом углеродсодержащих железорудных окатышей / Ковалёв Д.А., Ванюкова Н.Д., Бойко М.Н. // Системні технології :регіон. міжвуз. зб. наук. праць. – 2008г – Дніпропетровськ: Системні технології, № 1. – с. 93-102.

А.В. Кошулян, В.П. Малайчук

МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОКОРРЕЛИРОВАННЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ ВДОЛЬ ЖОРДАНОВОЙ ТРАЕКТОРИИ

Аннотация. Предложен алгоритм формирования автокоррелированных последовательностей измерений вдоль простого замкнутого контура, на основе системы разностных уравнений 1-го порядка и результаты исследования их статистических закономерностей, отличающиеся от Марковских.

Ключевые слова: замкнутый случайный процесс, авторегрессия, модель.

Постановка задачи

В задачах проектирования информационно-измерительных технологий неразрушающего контроля и мониторинга технических объектов измеряемые параметры качества по своей физической природе являются случайными величинами. Причины их случайности – влияние неконтролируемых и случайных факторов технологических процессов производства, ошибок измерений, а также ограничение на объем измерений. Разработка решающих правил контроля, оценка их эффективности и прогноз остаточного ресурса невозможен без знания математических моделей измерений[1].

В [2] рассматривается класс линейно-протяженных замкнутых объектов контроля (сварные швы труб, железнодорожные колеса). Для таких объектов измерение параметров физического поля (напряженность магнитного поля, остаточные напряжения) выполняются вдоль замкнутого контура, который представляет собой в общем случае Жорданову кривую (кривая, которая имеет только одну точку самопересечения), в частности окружность. Математическая модель измерений объекта такого класса может быть представлена в виде

$$x(i, k) = H(i) + \Delta H(i) + \Delta x(i, k), \quad (1)$$

где i - номер точки измерения, $i \in [1, n]$ n - количество точек измерений; k - номер измерения в этой точке; $H(i)$ - детерминированная

медленно меняющаяся функция; $\Delta H(i)$ - флуктуации измеряемого параметра относительно $H(i)$; $\Delta x(i, k)$ - случайные независимые ошибки измерений.

Флуктуации $\Delta H(i) = z_i$ представляют собой автокоррелированную последовательность случайных величин, которая отличается от известной Марковской последовательности 1-го порядка, тем, что она конечная $i \in [1, n]$ и замкнутая: за последней точкой измерений с номером n следует первая.

Марковская последовательность описывается разностным уравнением

$$z_i = \alpha z_{i-1} + \delta \xi_i \quad (2)$$

где ξ_i - последовательность независимых нормальных случайных величин с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией; α и δ - постоянные множители.

Если к уравнению (2) добавить условие замыкания

$$z_1 = \alpha z_n + \delta \xi_1, \quad (3)$$

то уравнения (2) и (3) будут описывать замкнутую автокоррелированную последовательность случайных величин.

Для проведения вычислительных экспериментов по оценке эффективности решающих правил контроля качества объектов рассматриваемого типа необходимы математические модели и алгоритмы формирования последовательностей, обладающих свойством (2) и (3). Предлагается метод решения этой задачи и результаты исследования свойств таких замкнутых последовательностей случайных величин.

Алгоритм формирования замкнутых последовательностей

Уравнения (2) и (3) запишем как систему уравнений, в которой заданы формирующая выборка $\{\xi_i\}$ независимых случайных величин с математическим ожиданием $M\{\xi_i\} = m_\xi$, дисперсией $D\{\xi_i\} = \sigma_\xi^2$ и параметры $\alpha > 0$ и $\delta > 0$

$$\begin{cases} z_1 - \alpha z_n = \delta \xi_1, \\ z_2 - \alpha z_1 = \delta \xi_2, \\ \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\ z_i - \alpha z_{i-1} = \delta \xi_i, \\ \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\ z_n - \alpha z_{n-1} = \delta \xi_n. \end{cases} \quad (4)$$

Решение системы (4) можно представить в векторном виде

$$z = \delta B^{-1} \xi, \quad (5)$$

где $z = \{z_i\}$ - случайный вектор замкнутой последовательности;
 $\xi = \{\xi_i\}$ - вектор независимых случайных величин; $B = \{b_{ij}\}$ - квадратная матрица

$$B = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -\alpha \\ -\alpha & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\alpha & 1 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & -\alpha & 1 \end{pmatrix}, \dim B = n \times n; b_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j, \\ -\alpha, & i = j + 1, \\ -\alpha, & i = 1 \wedge j = n. \end{cases}$$

Определитель матрицы B равен:

$$\det B = 1 - \alpha^n.$$

Для существования обратной матрицы B^{-1} необходимо и достаточно, чтобы $\det B \neq 0$, что выполняется для любых α и n , за исключением $\alpha = 1$. Обратную матрицу можно представить в виде

$$B^{-1} = \frac{1}{1 - \alpha^n} C,$$

где союзная матрица C является вещественной матрицей циркулянтной формы и записывается в виде

$$C = \begin{pmatrix} 1 & \alpha^{n-1} & \alpha^{n-2} & \dots & \alpha^3 & \alpha^2 & \alpha \\ \alpha & 1 & \alpha^{n-1} & \dots & \alpha^4 & \alpha^3 & \alpha^2 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 & \dots & \alpha^5 & \alpha^4 & \alpha^3 \\ \alpha^3 & \alpha^2 & \alpha & \dots & \alpha^6 & \alpha^5 & \alpha^4 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \alpha^{n-2} & \alpha^{n-3} & \alpha^{n-4} & \dots & \alpha & 1 & \alpha^{n-1} \\ \alpha^{n-1} & \alpha^{n-2} & \alpha^{n-3} & \dots & \alpha^2 & \alpha & 1 \end{pmatrix}; C = \{c_{ij}\},$$

$$c_{ij} = \begin{cases} \alpha^{i-j}, & i \geq j, \\ \alpha^{n-j+i}, & i < j. \end{cases} \quad (6)$$

Решение (5) получим в векторной форме

$$\mathbf{z} = \frac{\delta}{1 - \alpha^n} C \boldsymbol{\xi}. \quad (7)$$

Из (6) и (7) следует, что $z_i = \frac{\delta}{1 - \alpha^n} \sum_{k=1}^n c_{ik} \xi_k$ и, следовательно, можно записать формулу для определения i -й компоненты вектора $\mathbf{z}$

$$z_i = \frac{\delta \alpha^i}{1 - \alpha^n} \sum_{k=1}^n \alpha^{n-k} \xi_k + \delta \sum_{k=1}^i \alpha^{i-k} \xi_k. \quad (8)$$

Полагая в (8) $i = n$, получим выражение для определения компоненты z_n

$$z_n = \frac{\delta}{1 - \alpha^n} \sum_{k=1}^n \alpha^{n-k} \xi_k. \quad (9)$$

Таким образом, для формирования замкнутой автокоррелированной последовательности случайных величин $\{z_i\}$, $i \in [1, n]$ размером n необходимо:

- 1) получить выборку независимых случайных величин $\{\xi_i\}$, $i \in [1, n]$;
- 2) по формуле (9) рассчитать значение z_n ;
- 3) используя z_n в качестве начального значения и выборку $\{\xi_i\}$ рассчитать по формуле (2) остальные члены $\{z_i\}$, $i \in [1, n - 1]$ замкнутой последовательности.

Основные свойства

Вектор математического ожидания случайного вектора $\mathbf{z}$

$$\mathbf{m}_z = M[\mathbf{z}] = \frac{\delta}{1 - \alpha^n} C M[\boldsymbol{\xi}] = \frac{\delta}{1 - \alpha^n} C \mathbf{m}_\xi, \quad (10)$$

где $\mathbf{m}_\xi$ - вектор математического ожидания случайного вектора $\boldsymbol{\xi}$.

Поскольку математическое ожидание всех компонент вектора $\boldsymbol{\xi}$ одинаково $M\{\xi_i\} = m_\xi$, а запись (10) аналогична (7), за исключением того, что в (10) вместо вектора $\boldsymbol{\xi}$ стоит вектор его математического ожидания, то используя (8) и подсчитав соответствующие суммы, получим

$$M[z_i] = \frac{\delta}{1 - \alpha} m_\xi \quad (11)$$

Ковариационную матрицу случайного вектора z определим по формуле

$$R_z = M[zz^T] - m_z m_z^T. \quad (12)$$

Подстановкой (7) и (10) в (12) получим

$$R_z = \left(\frac{\delta}{1 - \alpha^n} \right)^2 C R_\xi C^T, \quad (13)$$

где $R_\xi = M[\xi \xi^T] - m_\xi m_\xi^T$ - ковариационная матрица случайного вектора ξ , независимых случайных величин. Так как $D\{\xi_i\} = \sigma_\xi^2$, то $R_\xi = \sigma_\xi^2 I$ и (13) можно записать в виде

$$R_z = \left(\frac{\delta \sigma_\xi}{1 - \alpha^n} \right)^2 C C^T. \quad (14)$$

Ковариационная матрица в (14) кроме того, что симметричная также циркулянтная, поскольку произведение двух циркулянтных матриц дает циркулянтную [4].

Каждый элемент $\{R_{ij}\}$ матрицы R_z определяется по правилу

$$R_{ij} = \left(\frac{\delta \sigma_\xi}{1 - \alpha^n} \right)^2 \sum_{k=1}^n c_{ik} c_{jk}. \quad (15)$$

С учетом (15) и (6), и симметричности ковариационной матрицы, можно записать формулы для вычисления ее элементов

$$R_{ij} = \begin{cases} \left(\frac{\delta \sigma_\xi}{1 - \alpha^n} \right)^2 \left[\sum_{k=1}^i \alpha^{i+j-2k} + \sum_{k=i+1}^j \alpha^{n+i+j-2k} + \sum_{k=j+1}^n \alpha^{2n+i+j-2k} \right], & i \leq j < n, \\ \left(\frac{\delta \sigma_\xi}{1 - \alpha^n} \right)^2 \left[\sum_{k=1}^i \alpha^{i+n-2k} + \sum_{k=i+1}^n \alpha^{2n+i-2k} \right], & i \neq n \wedge j = n, \\ \left(\frac{\delta \sigma_\xi}{1 - \alpha^n} \right)^2 \sum_{k=1}^n \alpha^{2(n-k)}, & j = n \wedge i = n. \end{cases} \quad (16)$$

Свернув суммы в (16) и выполнив упрощения, получим

$$R_{ij} = \delta^2 \frac{\alpha^{2j} + \alpha^{2i+n}}{\alpha^{i+j} (1 - \alpha^n) (1 - \alpha^2)} \sigma_\xi^2, \quad (17)$$

Замена $j = i + k$ приводит (17) к виду

$$R(k) = \delta^2 \frac{\alpha^k + \alpha^{n-k}}{(1 - \alpha^n)(1 - \alpha^2)} \sigma_\xi^2, k \in [0, n], k \in \mathbb{N}, \quad (18)$$

где под $R(k)$ понимается ковариационная функция $R(k) = R(|i - j|)$.

Ковариационная матрица R_z должна быть невырожденная и положительно определенная. Определитель ковариационной матрицы равен

$$\det K_z = \left| \left(\frac{\delta \sigma_\xi}{1 - \alpha^n} \right)^2 CC^T \right| = \left(\frac{\delta \sigma_\xi}{1 - \alpha^n} \right)^{2n} |C|^2 = \left(\frac{\delta \sigma_\xi}{1 - \alpha^n} \right)^{2n} |(1 - \alpha^n) B^{-1}|^2 = \frac{(\delta \sigma_\xi)^{2n}}{(1 - \alpha^n)^2} \quad (19)$$

Матрица R_z является циркулянтной. Для матриц циркулянтной формы собственные числа представляют собой дискретное преобразование Фурье первой строки матрицы[4]. С учетом (18) можно записать

$$\lambda_j = \sum_{k=0}^{n-1} R(k) \exp\left(-\frac{2\pi i j k}{n}\right) = \frac{\delta^2 \sigma_\xi^2}{(1 - \alpha^n)(1 - \alpha^2)} \left[(\alpha^n + 1) + \sum_{k=1}^{n-1} (\alpha^k + \alpha^{n-k}) \exp\left(-\frac{2\pi i j k}{n}\right) \right] \quad (20)$$

где λ_j - j -е собственное число, $j \in [1, n]$, $j \in \mathbb{N}$; i - мнимая единица.

После вычисления суммы в (20) и упрощений с использованием формулы Эйлера, получим

$$\lambda_j = \frac{\delta^2 \sigma_\xi^2}{\left[\alpha - \cos\left(\frac{2\pi j}{n}\right) \right]^2 + \sin^2\left(\frac{2\pi j}{n}\right)} = \frac{\delta^2 \sigma_\xi^2}{\alpha^2 - 2\alpha \cos\left(\frac{2\pi j}{n}\right) + 1} \quad (21)$$

Как следует из (19) и (21) ковариационная матрица R_z является невырожденной и положительно определенной при любых значениях δ , σ_ξ и $\alpha \neq 1$.

Из (18) следует, что $R(k) = R(n - k)$, т.е. ковариационная функция симметрична относительно точки $n / 2$, в которой имеет минимум.

Дисперсия и корреляционная функция равны

$$D[z_i] = R(0) = \delta^2 \frac{\alpha^n + 1}{(1 - \alpha^n)(1 - \alpha^2)} \sigma_\xi^2 = const; \quad (22)$$

$$r(k) = \frac{R(k)}{R(0)} = \frac{\alpha^k + \alpha^{n-k}}{1 + \alpha^n}, k \in [0, n], k \in \mathbb{N}. \quad (23)$$

Если выбрать $\alpha \in (0,1)$ то при малых и больших значениях k относительно n , корреляция $r(k) \approx \alpha^k$ будет примерно такой же, как и для Марковского процесса (2), а дисперсия, при больших значениях n , равна $D[z_i] \approx \frac{\delta^2 \sigma^2}{1 - \alpha^2}$.

Если дисперсия $D[z_i]$ задана, то значение δ рассчитывается по формуле (22), полагая известной дисперсию σ_ξ^2 .

Если компоненты $\{\xi_i\}$ вектора ξ независимые нормальные случайные величины, тогда (7) представляет собой их линейное преобразование и согласно [3] вектор $z = \{z_i\}$ имеет многомерное нормальное распределение с корреляционной матрицей R_z и математическим ожиданием $M[z_i]$. В этом случае замкнутые последовательности отвечают требованию стационарности в узком смысле.

Вычислительный эксперимент

Для параметров $\delta = 1$, $\alpha = 0.9$ из выборки размером $n = 30$ независимых нормальных случайных величин (табл. 1) с математическим ожиданием $m_\xi = 0$, и дисперсией $\sigma_\xi^2 = 1$ получена замкнутая последовательность (табл. 2), для которой, как можно убедиться, выполняются требование замкнутости (2) и (3).

Таблица 1

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ξ_i	1.328	-0.265	0.535	-2.389	0.821	0.047	0.208	-0.115	0.386	-1.273
i	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
ξ_i	-0.423	-0.105	-0.771	1.23	-0.775	2.118	-0.744	-0.289	1.284	0.287
i	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
ξ_i	0.636	-1.704	-0.256	-0.861	0.833	0.835	-0.975	0.124	1.512	-0.024

Таблица 2

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
z_i	2.416	1.909	2.253	-0.361	0.495	0.398	0.567	0.396	0.742	-0.605
i	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
z_i	-0.968	-0.976	-1.65	-0.254	-1.004	1.214	0.349	0.024	1.306	1.462
i	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
z_i	1.952	0.053	-0.208	-1.048	-0.11	0.736	-0.313	-0.158	1.37	1.208

На рис. 1а показана траектория случайной последовательности из табл.2 в полярной системе координат. Значение полярного угла рассчитывается по формуле $\varphi_i = \Delta\varphi \cdot (i - 1)$, где $\Delta\varphi = 2\pi / n$ - угол между точками. Значение полярного радиуса определяется по формуле $\rho(\varphi_i) = H + \Delta H(i)$, где $\Delta H(i) = z_i$, а $H = 2\sigma_z \approx 5$.

На рис 1. б-г показаны примеры траекторий иных реализаций замкнутых случайных последовательностей полученных при тех же значениях параметров.

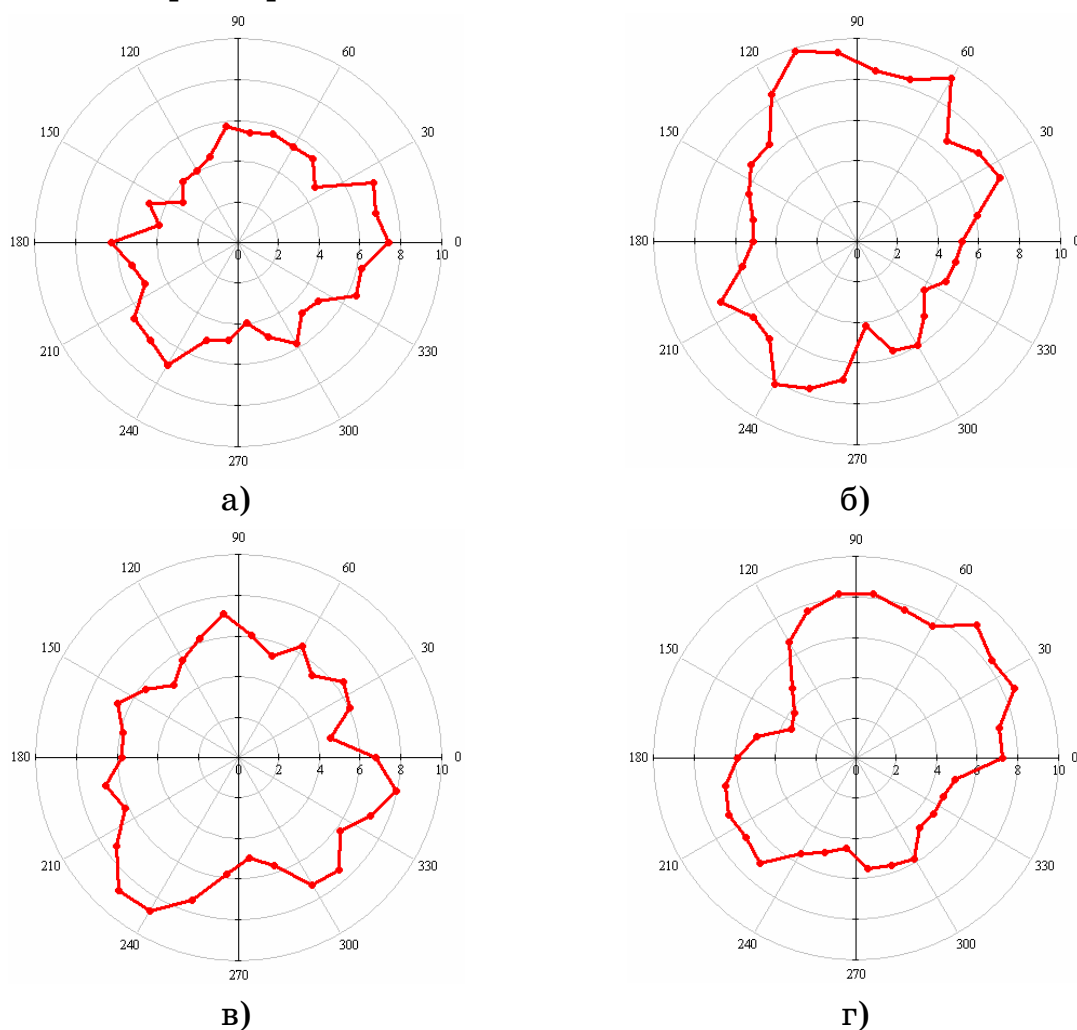


Рисунок -1 Примеры траекторий замкнутых случайных последовательностей

Для параметров $\delta = 1$, $m_\xi = 0$, $\sigma_\xi^2 = 1$ замкнутой последовательности выполнено сравнение расчетных значений коэффициентов ковариации и корреляции по формулам (18) и (23) со значениями, полученными на основе вычислительного эксперимента. Для этого по алгоритму (9) генерировалось $N=10000$ замкнутых последовательно-

стей размером $n=30$ каждая. Для полученных выборок было зафиксировано сечение в точке $i=1$, после чего с шагом $k \in [0, n]$, $k \in \mathbb{N}$ вычислялся коэффициент ковариации и корреляции между 1-м и $i+k$ -м сечениями. Результаты представлены в виде графика на рисунке 2 а-б, где точки – это выборочные значения коэффициентов, а штриховые линии соединяют точки, полученные расчетным путем по формулам.

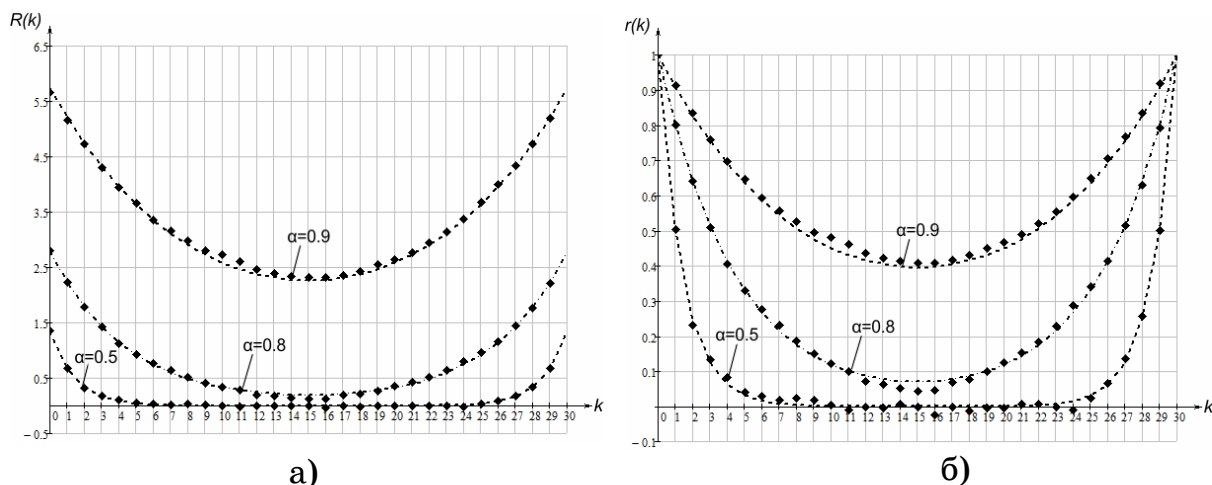


Рисунок 2 - Эмпирическая и теоретическая функция
а) ковариации; б) корреляции

Выводы

1. Предложен алгоритм формирования замкнутых автокоррелированных случайных последовательностей. Работоспособность алгоритма проверена на основе вычислительного эксперимента.
2. Исследованы основные свойства таких последовательностей с нормальным законом распределения: их дисперсии и функции автокорреляции зависят от размера выборки, причем автокорреляционная функция имеет минимум в точке $n/2$ и два максимума в точках $k=1$ и $k=n-1$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Малайчук В.П. Математическая дефектоскопия: Монография / В.П. Малайчук, А.В. Мозговой.-Д.:Системные технологии, 2005. -180 с.
2. Кошулян А.В. Сингулярный спектральный анализ замкнутых пространственных рядов / А.В. Кошулян, В.П. Малайчук -Д.: Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных трудов. - Выпуск 3 (74), 2011, с. 46-51.
3. Миллер Б.М. Теория случайных процессов в примерах и задачах. / Б.М. Миллер, А.Р. Панков М.:ФИЗМАТЛИТ, 2002. - 320с., ил.; - Библиограф.: С. 310-312.
4. Robert M. Gray. Toeplitz and Circulant Matrices: A review / Department of Electrical Engineering of Stanford University; Now Publishers Inc: 2006 - ISBN-13: 978-1933019239.

В.В. Бинкевич, И.В. Усиченко

О КРИТЕРИИ СОГЛАСОВАНИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССОВ В СИНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭКОНОМИКЕ

Аннотация. Рассмотрено применение критерия «затраты – эффективность» при согласовании решений в синергетической экономике. Объект синергетической экономики рассматривается как система процессов, протекающих на его микро - и макроуровнях объединяемых информационной подсистемой мезоуровня.

Ключевые слова: критерий, эффективность, самоорганизация, синергетика, система.

Введение. В синергетике рассматривается эффект коллективного взаимодействия большого числа объектов, приводящих к образованию устойчивых структур и самоорганизации в сложных многоуровневых системах. Предполагается, что на основе последовательных процессов самоорганизации и объединения отдельных систем в более сложные интегрированные системы произошло возникновение организации в неживой природе и развитие жизни. Ученые считают, что «...выяснение основных закономерностей самоорганизации позволяет перейти к целенаправленному конструированию искусственных активных сред, процессы самоорганизации в которых приводили бы к образованию нужных структур» [3].

Важное значение для решения задач синергетики приобретает исследование роли информационных процессов при образовании целостных самоорганизованных объектов.

В [2] сделан вывод о наличии единых системных законов, которые проявляются как преемственность и циклическая повторяемость процессов по мере увеличения информационной сложности систем. Была рассмотрена схема образования систем (S_0 – систем), способных принимать решения и осуществлять самостоятельное поведение на основе внутренних критериев. В [4] принимается, что S_0 – системы могут образоваться при объединении детерминированных (пер-

вичных) систем (S_1) и стохастических (S_2). Затем, при комбинации S_0 – систем, возможно образование S_1 и S_2 – систем, следовательно, нового уровня S_0 – системы. Предположено, что процесс объединения (композиции) систем может осуществляться на основе самоорганизации и сопровождаться снижением энтропии.

В синергетике установлено понятие, имеющее общеметодологическое значение для исследования развивающихся на основе самоорганизации систем. Это понятие – «перемешивающий слой, который является ... необходимым этапом при генерации ценной информации в биологической эволюции, а также в творчестве и мышлении» [3]. Перемешивающий слой является промежуточным, мезоскопическим уровнем, объединяющим процессы, происходящие на макроскопическом уровне с их проявлением на микроскопическом уровне. При этом в результате процессов, происходящих на мезоскопическом уровне, процессы макроскопического уровня проявляются как процессы самоорганизации.

Тенденция к самоорганизации проявляется на микро- и макроуровнях естественных и искусственных (экономических) систем. Наличие этой тенденции можно рассматривать как условие поддержания целостности объектов. В естественной среде целостность объектов поддерживается действием факторов эволюции на уровнях популяции и отдельного организма.

Собственные цели и стремление к самоорганизации проявляются у всех объектов, управляющих процессами на различных уровнях экономической системы. Однако, обычно, при синтезе системы управления принимают, что эмерджентные интересы сосредоточены в центральном органе на верхнем уровне управления, и реализуются по глобальному критерию достижения цели системы. В то же время интересы элементов, внутренне присущие (иманентные) им, достигаются по локальному критерию соответствующих объектов (которые также могут рассматриваться как системы с собственными элементами). В связи со сложностью задач, возникающих при согласовании целей интересов на различных уровнях системы, эмерджентный эффект часто реализуется недостаточно.

Постановка задачи. В статье делается попытка разработать некоторые вопросы, связанные с согласованием решений и усиления эмерджентного эффекта на основе применения критерия «затраты –

эффективность». Применение данного критерия рассматривается для объекта синергетической экономики – самоорганизующейся системы, которая обособливается от окружающей среды как относительно целостная совокупность процессов, протекающих на микро - макро и мезоуровнях. В качестве мезоуровня рассматривается наличие внутри системы особой информационной подсистемы, определяющей способность системы к целенаправленности и самоусовершенствованию. Эта подсистема «содержит модель среды и самой себя – отображения среды и самоотображение» [3].

Основная часть. Целью объекта синергетической экономики (ОСЭ) можно считать приобретение им «нового качества» - увеличение времени сохранения целостности производственного (жизненного) цикла системы по сравнению со временем производственного (жизненного) цикла отдельной микросистемы. При этом важно представлять, что если рассматривается увеличение времени жизненного цикла микросистемы в составе первичной системы, то сама первичная система во вторичной входит в состав микроуровня и также приобретает «новое качество» т.е. увеличение жизненного цикла. Таким образом, развитие объекта синергетической экономики будем рассматривать как увеличение времени его жизненного цикла.

В соответствии с [4, 5] принимаем, что в ОСЭ самоорганизация и интеграция происходит при возникновении краткосрочных и долгосрочных процессов под воздействием внутреннего информационного процесса, отражающего информационно-энергетическое воздействие внешней среды. Внутренний информационный процесс рассматривается как мезоуровень, объединяющий информационные структуры микро и макроуровней в единую систему.

Будем считать, что в ОСЭ процессы на микро- макро- и мезоуровнях реализуются, соответственно, микро- макро- и мезосистемами, которые образованы организационно-технологическими структурными интегрированными модулями (СИМ) [6]. СИМ обладают свойством экзактности [7], которое применительно к экономическим объектам рассматривается как установление наименьшей системы (полного набора элементов, процессов, функций и связей минимально необходимого и достаточного для преобразования исходных ресурсов в конечную продукцию) и оперирование только в рамках наименьшей системы. Применение СИМ позволяет формально отобразить протека-

ние последовательных технологических процессов преобразования вещественно-энергетических ресурсов и иерархически связанных организационных процессов преобразования информации при управлении. В соответствии с условием экзактности для любого звена управления можно считать, что на макроуровне происходит достижение долгосрочных (перспективных) целей, оцениваемых по глобальному критерию (для системы в целом), на микроуровне – оперативных целей, оцениваемых по локальному критерию, на мезоуровне происходит согласование (моделирование) вариантов решений по единому критерию «затраты – эффективность».

Общим естественным условием развития экономической системы является снижение затрат. Это условие должно соблюдаться при достижении целей и на микро - и на макроуровнях. Каждое решение связано с достижением определенного результата и имеет основную цель. Существенно, что можно судить только о той или иной степени достижения цели, т. к. цель это то, что в момент принятия решений не имеется и нельзя быть абсолютно уверенным в том, что ее можно достичь при имеющихся ресурсах. Степень (вероятность) достижения цели является наиболее общим показателем эффективности, сопоставляемым с затратами. В рыночных условиях применение критерия «затраты - эффективность» дает возможность применить «принцип опережения» и своевременно выбрать оптимальное направление перестройки экономической деятельности.

Будем рассматривать простейший случай и считать, что структурными элементами макросистемы (в данном случае системы в целом) являются однородные микросистемы, целью которых является выполнение разовых производственных (жизненных) циклов с фиксированным результатом (V_c).

В макросистеме оптимально распределяются ограниченные ресурсы на отдельных этапах развития микросистемы как цельного объекта, и, тем самым, обеспечивается повышение вероятности достижения цели макросистемы. Таким образом принимается, что макросистема как целостный объект образуется одновременно с развитием микросистем.

В этом случае показатели суммарных затрат по макросистеме (D_Σ) и суммарных затрат по микросистеме (C_Σ) могут быть связаны простым соотношением:

$$D_{\Sigma} = HC_{\Sigma}, \quad (1)$$

где H – количество разовых циклов микросистемы, необходимое для достижения цели макросистемы.

В рассматриваемом случае целью макросистемы будем считать получение с вероятностью W_H суммарного результата (V_{Σ}) от деятельности микросистем.

При фиксированном уровне V_c такое условие равнозначно требованию обеспечить с вероятностью W_H не менее Z циклов функционирования микросистем:

$$Z = \frac{V_{\Sigma}}{V_c} \quad (2)$$

Величины V_{Σ} и V_c определяются рядом показателей и условий применения системы. Будем считать, что в результате соответствующего анализа число Z может быть найдено и в дальнейшем исследуется эффективность макросистемы как вероятность обеспечения Z циклов функционирования микросистем; эта вероятность фиксирована и равна W_H .

Следовательно, для некоторого периода T можно принять неизменными условия деятельности системы и эффективность W_H считать постоянной (не подлежащей регулировке на протяжении T) величиной.

Определим в такой постановке содержание критерия эффективности микросистемы, соизмеримое с эффективностью макросистемы. При условии, что микросистемы в составе макросистемы выполняют автономные, однородные и разовые циклы, связь вероятности достижения цели, стоящей перед макросистемой с вероятностью достижения цели микросистемой в соответствии с биномиальным законом распределения вероятностей, может быть описана зависимостью:

$$W_H = \sum_{h=Z}^H C_H^h W^h (1-W)^{H-h}, \quad (3)$$

где W – вероятность, с которой должен выполняться цикл микросистемы при общем количестве микросистем H , чтобы в результате достижения цели макросистемы было обеспечено не менее Z циклов с вероятностью W_H .

C_H^h – число сочетаний из H по h ,

$$h = Z, Z+1, Z+2, \dots, H \quad (4)$$

Параметр W является показателем вероятности достижения цели микросистемой, т.е. (в принятой постановке) эффективности выполнения разового производственного (жизненного) цикла в совокупности выполняемых микросистемами циклов H . Изменением эффективности микросистемы W и изменением количества микросистем H можно достичь требуемой эффективности макросистемы W_H в соответствии с зависимостью (3). При этом одна и та же величина эффективности макросистемы может быть обеспечена при различных сочетаниях эффективности микросистемы и количества микросистем. Изменение эффективности микросистемы связано с изменением затрат C_Σ . Поэтому различным значениям W и H , обеспечивающим заданную эффективность макросистемы W_H , будут соответствовать различные значения суммарных затрат на достижение цели макросистемой, т.е. критерия D_Σ . Для периода T (по которому проведена оценка V_c и V_Σ) задачей является установить такое соотношение показателей W , H и C_Σ в зависимостях (1) и (3), при которых величина D_Σ будет минимальной.

Зависимость для W можно записать таким образом:

$$W = W(E, R), \quad (5)$$

где E – вероятность изменения внешних условий, влияющих на достижение цели микросистемы. Значение E может быть получено по данным предварительного анализа и для периода T принятого постоянным;

R – показатель надежности выполнения внутренних процессов при достижении цели микросистемой.

Показатель надежности R может регулироваться – планироваться и обеспечиваться на различных этапах создания и функционирования микросистемы. При этом и, что особенно важно, в определенных условиях может быть установлена функциональная связь между надежностью и минимальными затратами на ее обеспечение. Приходим к выводу, что добиться минимального значения величины D_Σ при условии обеспечения требуемой эффективности макросистемы на протяжении фиксированного времени T можно, изменяя характеристики надежности и затрат для микросистемы.

Таким образом, принципиально возможно согласование глобального и локального критериев оптимальности принимаемых реше-

ний и направленное выявление эмерджентного эффекта в синергетической экономике.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лоскутов А.Ю. Введение в синергетику/ А.Ю.Лоскутов, А.С. Михайлов. - М.: Наука, 1990. – 272 с.
2. Дружинин В.В. Проблемы системологии (проблемы теории сложных систем) / В.В. Дружинин, Д.С. Конторов. - М.: Сов. Радио, 1976. – 296 с.
3. Чернавский Д.С. О методологических аспектах синергетики. В кн. Синергетическая парадигма/ Д.С. Чернавский. – М.: Прогресс-Традиция, 2002. – 496 с.
4. Бинкевич В.В. Управление на синергетической основе/ В.В. Бинкевич, И.В. Усиченко // Вісник Академії митної служби України. - Дн-ськ, 2011. - № 2(46). – С. 127 – 138.
5. Бинкевич В.В. Об интеграции на основе самоорганизации / В.В. Бинкевич, И.В. Усиченко // Вісник Дніпропетровського університету. «Історія і філософія науки і техніки». – 2001. - Вип. 8. – С. 13 – 21.
6. Бинкевич В.В. О структуризации интегрированных систем /В.В. Бинкевич// Всесоюзная конференция по проблемам ОГАС, РАСУ и АСУ, посвященная 60 - летию академика В.М. Глушакова: Канев, 20-23 сентября 1983 г.: тезисы докл. – К.: ИК АН УССР, Ч. 1. – С 22-23.
7. Грузинцев А.Г. Очерки по теории науки / А.Г. Грузинцев // Записки Дніпропетровського інституту народної освіти., т. II, - Дніпропетровськ, 1928. 0 С. 273

В.М. Козлов, В.П. Хлынцев, В.В. Калениченко

КЛАССИФИКАЦИЯ СТРУКТУРНЫХ ДЕФЕКТОВ В ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЯХ

Аннотация. Приведены результаты структурных исследований электролитических покрытий с различным типом кристаллической решетки (ОЦК, ГЦК, ГПУ). Дается классификация дефектов кристаллического строения. Показано, что механизм формирования дефектной структуры является универсальным и связан с электролитической нуклеацией. Тип дефекта зависит от угла разориентировки некогерентного зародыша относительно нижележащих слоев.

Ключевые слова. Гальваностегия, электроосаждение, дефекты структуры, границы зерен, кристаллические зародыши, субзерна.

Актуальность темы и постановка задачи. Гальваностегия – электрохимический метод нанесения металлических покрытий – приобретает все более широкое применение в различных отраслях промышленности. В частности, гальваностегия успешно используется в машиностроении для нанесения электролитических покрытий на поверхность разных деталей с целью придания этой поверхности повышенных свойств, таких как твердость, усталостная прочность, антикоррозионная стойкость и износостойкость.

Физико-механические и химические свойства электролитических покрытий зависят от их структурного состояния, которое в свою очередь зависит от режимов электроосаждения металлов, в частности, от величины катодной плотности тока и температуры электролита. Таким образом, структура гальванических покрытий является связующим звеном между задаваемыми условиями электролиза и свойствами получаемых осадков. Поэтому экспериментальные данные о характере и количестве структурных дефектов в гальванопокрытиях способствуют решению одной из актуальных проблем гальванотехники, связанной с получением электролитических осадков с прогнозируемыми, наперед заданными свойствами.

Несмотря на большое число работ, посвященных исследованию структуры электроосажденных металлов, ряд вопросов остаются недостаточно изученными и детализированными. В частности, не выявлен общий характер субзеренных дислокационных границ электроосажденных металлов, которые, в совокупности с дефектами двойникового типа, определяют тонкую структуру гальванопокрытий.

Целью данной работы было экспериментальное исследование структуры электроосажденных металлов с разным типом кристаллической решетки, обобщение полученных результатов и создание единой модели образования кристаллических несовершенств в гальванических покрытиях.

Методики исследований. Объектами структурных исследований были электролитические осадки металлов с разным типом кристаллической решетки: никель, медь – ГЦК решетка; железо – ОЦК решетка; цинк – ГПУ решетка. Электроосаждение указанных металлов проводилось из сульфатно-кислых растворов при механическом перемешивании (состав и условия электролиза представлены в табл.1.) Толщина покрытий составляла 90-100 мкм.

Таблица 1

Металл	Состав электролиза	pH	Плотность тока, А/дм ²	t°C
Ni	Ni SO ₄ – 400 г/л	4,0	1 – 5	45-70
Cu	CuSO ₄ – 500 г/л H ₂ SO ₄ – 50 г/л	-	1 – 3	30-60
Fe	Fe SO ₄ – 500 г/л	2,0	1 – 6	50-70
Zn	ZnSO ₄ – 400 г/л	3,0	1 – 5	30-50

Микроструктура поперечных шлифов электролитических осадков изучалась методом оптической микроскопии, а внутренняя структура зерен исследовалась методом просвечивающей электронной микроскопии.

Результаты исследования. Было установлено, что электролитические покрытия имели поликристаллическое строение, причем форма и размер зерен в поперечном сечении могли существенно отличаться в зависимости от условий электрокристаллизации. Следует отметить два основных типа

микроструктуры электроосадков, принципиально отличающиеся друг от друга.

1. Волокнистый тип микроструктуры, который характеризуется вытянутой формой зерен в направлении, перпендикулярном поверхности подложки (рисунок 1а). Микроструктура такого типа присуща покрытиям, полученным в условиях незначительной поверхностной адсорбции чужеродных частиц, присутствующих в электролите

2. Изотропный тип микроструктуры, который характеризуется приблизительно одинаковым размером зерен в различных направлениях (рисунок 1б). Микроструктура такого типа присуща покрытиям, полученным в условиях относительно большой поверхностной адсорбции чужеродных частиц, присутствующих в электролите

Электронно-микроскопическими исследованиями было установлено, что исследованные электролитические покрытия имели субзеренное строение, общей особенностью которого был слоистый характер субзерен.

В качестве иллюстрации слоистого характера субзерен на рисунке 2а, б представлены микрофотографии электролитических покрытий меди и никеля. Плоскости субзеренных границ на этих микрофотографиях перпендикулярны к поверхности покрытий. Для идентификации типа субзеренных границ проводился микродифракционный анализ участков, которые содержали эти границы (например, участки М и N на рисунке 2а,б и соответствующие им микродифракционные картины на рисунке 2в, г).

Было установлено, электролитические покрытия содержат субзеренные границы двух типов: двойниковые (граница М на рисунке 2а) и дислокационные (граница N на рисунке 2б). В последнем случае на микродифракционных картинах наблюдалось угловое расщепление дифракционных пятен, по которому можно было оценить азимутальный угол разориентировки θ между соседними субзернами. Например, для субзеренной границы N значение этого угла составляло $5-6^\circ$ (рисунок 2г). Согласно теории дислокаций [1] при значениях θ , не превышающих $10-12^\circ$, субзеренные границы имеют дислокационное строение, причем плотность дислокаций в границе пропорциональна величине θ . Таким

образом, можно заключить, что приведенная в качестве примера субзеренная граница N (рисунок 2б) является дислокационной.

Дислокационные границы гальванопокрытий можно было непосредственно видеть на электронных микрофотографиях, когда поверхность границы оказывалась параллельной или немного наклоненной к поверхности покрытия. Установлено, что дислокационные границы исследованных электроосажденных металлов имели вид плоских дислокационных сеток (рисунок 3).

Обсуждение результатов. На основе обобщения экспериментальных данных можно сделать заключение, что основными типами структурных дефектов в гальванопокрытиях являются высокоугловые границы зерен, субзеренные дислокационные границы и двойниковые границы.

Структурные дефекты электролитических осадков по своей природе можно классифицировать следующим образом:

- дефекты деформационной природы, которые обусловлены процессом пластической деформации;
- дефекты наследственной природы, образование которых обусловлено непосредственным влиянием подложки на рост осадка;
- дефекты ростовой природы, образование которых происходит собственно на стадии электрокристаллизации металлов.

В наших исследованиях электроосаждение металлов проводилось при режимах, практически исключающих возникновение внутренних макронапряжений, которые могли бы привести к пластической деформации электроосадков. Отсутствие макронапряжений подтверждалось тем фактом, что полученные покрытия были компактными и нетрещиноватыми, и несмотря на слабую адгезию осадков с подложкой, они не коробились и самопроизвольно не отслаивались от субстрата. Таким образом, можно было предположить, что кристаллические дефекты исследованных покрытий не имели деформационную природу.

Что касается дефектов наследственной природы, отметим следующее. Известно, что при электроосаждении металлов на поликристаллическую подложку, которая использовалась в наших исследованиях, структурные дефекты субстрата могут воспроизводиться до толщины покрытий порядка десятых долей микрона [2]. Исходя из того, что начальная толщина исследованных покрытий составляла 90-

100 мкм, можно констатировать, что структурные дефекты, выявленные методом ПЭМ, располагались в электроосажденных слоях, которые находились на расстоянии порядка нескольких десятков микрон от поверхности подложки. Исходя из этого, можно допустить, что исследованная структура электролитических осадков не связана с влиянием подложки.

Исследованные нами структурные дефекты гальванопокровов имели ростовую природу и, следовательно, механизм образования кристаллических несовершенств в электролитических осадках следует увязывать с особенностями протекания той или иной стадии электрокристаллизации.

Структурные дефекты электроосажденных металлов находятся в термодинамически неравновесном состоянии, а значит есть основание предполагать, что процесс их образования при росте покрытий носит флуктуационный характер. Как известно, процесс образования зародышей при росте кристаллов также связан с флуктуациями.

Следует отметить, что кристаллические дефекты в исследованных электролитических осадках (границы зерен, субзерен и двойников) с геометрической точки зрения носят единый характер: они принадлежат к группе двумерных (поверхностных) дефектов, которые разделяют соседние фрагменты кристаллической решетки, находящиеся в определенном разориентированном положении друг относительно друга.

Отмеченные факторы (термодинамический и геометрический), касающиеся кристаллических несовершенств гальванопокровов, дают основание предполагать, что механизм образования основной массы структурных дефектов в электроосажденных металлах является универсальным и, по-видимому, связан со стадией электролитической нуклеации.

Согласно представлениям теории электрокристаллизации [3,4] рост кристаллитов на катоде происходит путем непрерывного образования двумерных зародышей, создающих пакет-слой, который растет в тангенциальном направлении. Причем предполагается, что каждый следующий двумерный зародыш, возникающий на поверхности предыдущего зародыша, находится в кристаллографически правильном (нормальном) положении. В этом случае рост кристаллитов не сопро-

воздается возникновением каких-либо кристаллических несовершенств.

Иная ситуация будет наблюдаться в случае, когда при росте кристаллитов наряду с образованием нормальных зародышей с определенной вероятностью будут возникать некогерентные зародыши, попадающие в “ошибочные” положения относительно нижележащего слоя, и тогда их последующий рост приведет к возникновению двумерного дефекта.

На рисунке 4 в качестве примера показаны нормальный зародыш и некогерентный зародыш с углом разориентировки θ на кристаллографической грани $\{100\}$ ГЦК кристалла.

Конкретный тип двумерного дефекта, который образуется вследствие некогерентного зародышеобразования, должен зависеть от величины угла разориентировки зародыша:

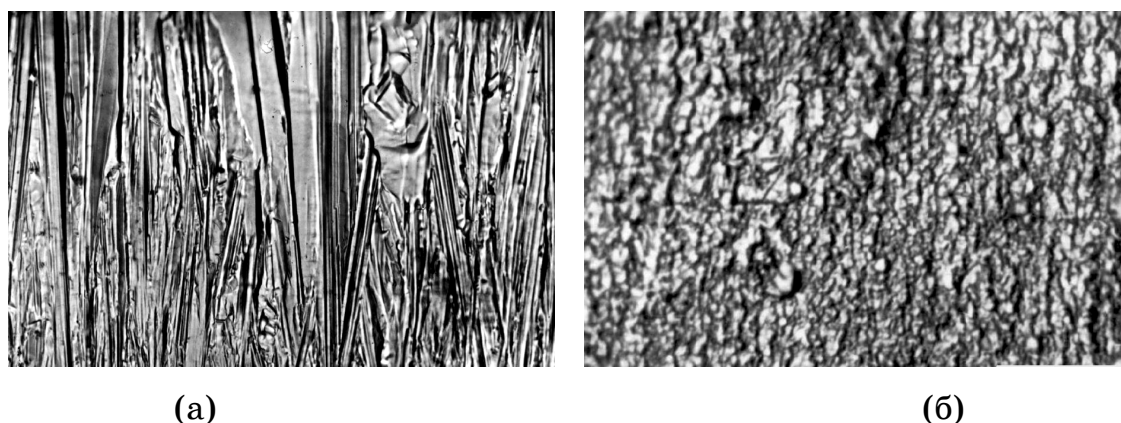
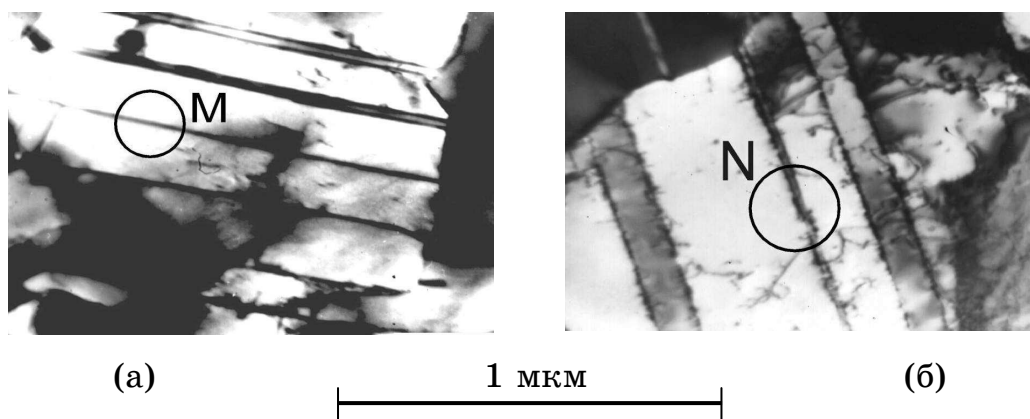
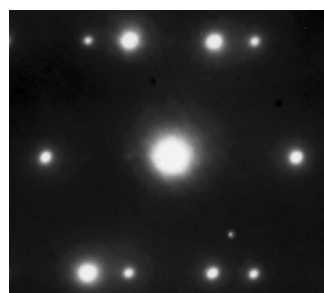
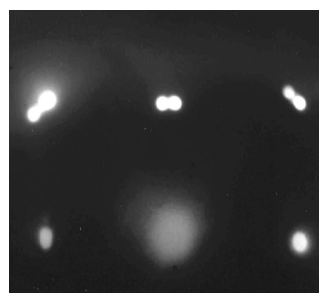


Рисунок 1 - Микроструктура поперечного сечения электролитических осадков меди: (а) – столбчатый тип микроструктуры, (б) – изотропный тип микроструктуры



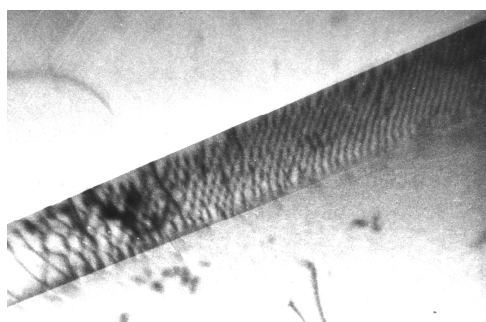


(в)

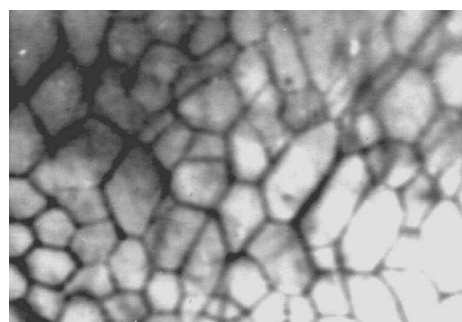


(г)

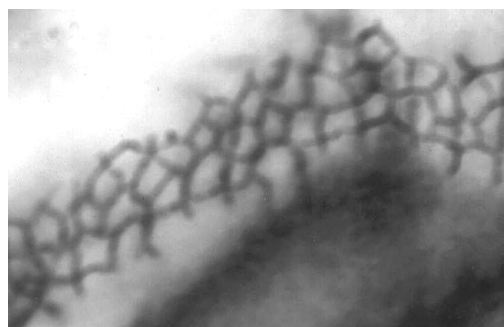
Рисунок 2 - ПЭМ микрофотографии электролитических покрытий Cu (а) и Ni (б); (в) и (г) – микродифракционные картины участков М и N. Условия электролиза: $j=2 \text{ A/дм}^2$, $t=60^\circ\text{C}$



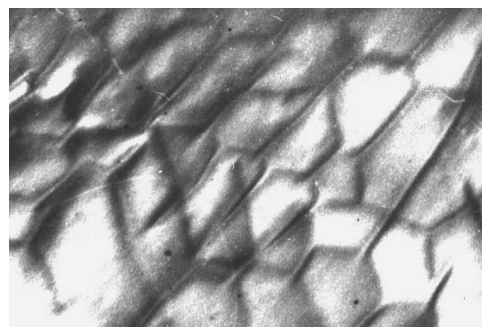
(а)



(б)



(в)



(г)

0,1 мкм

Рисунок 3 - ПЭМ микрофотографии дислокационных сеток в электролитических покрытиях Ni (а), Cu (б), Fe (в) и Zn (г). Условия электролиза: Ni ($j=2 \text{ A/дм}^2$, $t=60^\circ\text{C}$), Cu ($j=1 \text{ A/дм}^2$, $t=45^\circ\text{C}$), Fe ($j=3 \text{ A/дм}^2$, $t=60^\circ\text{C}$), Zn ($j=3 \text{ A/дм}^2$, $t=30^\circ\text{C}$)

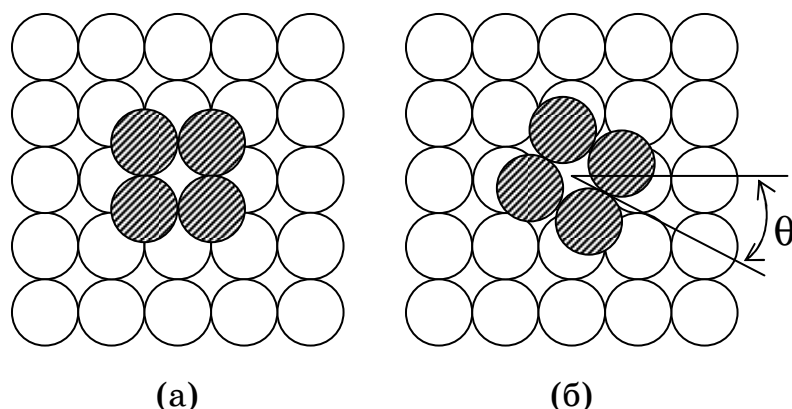


Рисунок 4 - Схема двумерного зародыша из четырех атомов, расположенного на грани $\{100\}$ гранецентрированной решетки в нормальном (а) и разориентированном (б) положениях.

(θ - угол разориентировки некогерентного зародыша)

1. если значение θ меньше 10^0-12^0 , то образуется субзеренная дислокационная граница;
2. если значение θ больше 10^0-12^0 , то образуется обычная высокоугловая граница зерна.

В дополнение к этим типам границ, образование которых связано со стадией электролитической нуклеации, необходимо добавить двойниковые границы, характеризующиеся определенной плоскостью двойникования, зависящей от типа кристаллической решетки. Механизм возникновения двойников в электроосадках с ГЦК решеткой впервые был предложен Р.Керном [5], а затем развит Н.Пангаровым [6]. Суть этого механизма заключается в том, что в процессе электролитической нуклеации на октаэдрической грани $\{111\}$ ГЦК кристалла некоторые из двумерных зародышей попадают не в нормальное положение, соответствующее правильному построению кристаллической решетки, а в двойниковое ("ошибочное" или по нашей терминологии "некогерентное") положение, что при последующем росте приводит к появлению двойников в электролитических осадках.

Согласно нашим исследованиям двойники роста присутствовали не только в электроосажденных ГЦК металлах (медь и никель), но также и в электроосадках железа (ОЦК решетка) с плоскостью двойникования (112) и цинка (ГПУ решетка) с плоскостью двойникования $(10\bar{1}2)$. По-видимому, механизм возникновения двойниковых границ в электроосажденных металлах с любым типом кристаллической решетки является универсальным и связан со стадией некогерентного зародышеобразования.

Выводы.

1. Выявлены два основных типа микроструктуры электролитических покрытий, принципиально отличающиеся друг от друга: волокнистый и изотропный, которые зависят от адсорбционных условий, в которых проходит электрокристаллизация металлов.

2. Установлено, что основные типы структурных дефектов (межзеренные границы, дислокационные и двойниковые субзеренные границы) в электроосажденных металлах с кристаллической решеткой разного типа носят единый характер: они относятся к типу двумерных (поверхностных) кристаллических несовершенств.

3. На основе обобщения экспериментальных данных с учетом геометрического и термодинамического факторов, касающихся структурных дефектов в электролитических покрытиях, высказано предположение о едином механизме их образования на стадии некогерентного зародышеобразования. Предполагается, что в процессе роста электроосадка наряду с нормальными могут возникать некогерентные зародыши, характеризующиеся той или иной степенью кристаллографической несопряженности с нижележащим слоем покрытия.

4. Тип структурного дефекта, возникающего на стадии некогерентного зародышеобразования, должен зависеть от угла разориентировки возникшего некогерентного зародыша относительно нижележащего слоя.

Предметом дальнейших исследований будет теоретический анализ стадии некогерентного зародышеобразования при электрокристаллизации металлов с целью установления общих закономерностей по влиянию условий осаждения на структуру электролитических покрытий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грабский М.В. Структура Границ зерен в металлах. – М.: Металлургия, 1972. – 160 с.
2. Кудрявцев Н.Т. Прикладная электрохимия // Основные закономерности электролитических процессов покрытия металлами. – М.: Химия, 1975. – С.334-366.
3. Горбунова К.М., Данков П.Д. Кристаллохимическая теория реального роста кристаллов при электролизе // Успехи химии. – 1948. – Т.17. – С.710-732.
4. Fischer H. Elektrokristallisation von Metallen // Z.Elektrochem. – 1955.- Bd.59. – S.612-622.
5. Kern R. Sur la formation des macles de croissance // Bull. Soc. Frans. Miner. Crist. – 1961. – V.84. – P.292-311.
6. Pangarov N.A. Twinning Processes in the Electrocrystallization of Face-Centred Cubic Metals // Phys. Stat. Sol. – 1967. – V.20. – P.371-377.

А.Л. Демура, В.Д. Рябчій

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОХОЛОДЖЕННЯ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ПІСЛЯ ОТВЕРДІННЯ ПІД ВПЛИВОМ ПОЛЯ НАДВИСОКОЇ ЧАСТОТИ

Анотація. Представлені результати дослідження процесу охолодження полімерних композиційних матеріалів після отвердіння під впливом електромагнітного поля надвисокої частоти.

На основі рішення теплового рівняння складена програма для обчислення температури в процесі охолодження. Програма дозволяє розраховувати просторовий розподіл температури в матеріалі в певний момент часу.

Ключові слова: процес охолодження, полімерні композиційні матеріали, отвердіння, електромагнітне поле надвисокої частоти.

Вступ

На цей час одним із вузьких місць технологічного процесу виготовлення виробів із полімерних композиційних матеріалів (ПКМ), до яких відносяться склопластики, є операція отвердіння.

Відомі наступні способи отвердіння ПКМ, що прискорюють цей процес: інфрачервоний [1], радіаційний [2], прискореними електронами [3], магнітна та ультразвукова обробка [2, 4], та інші. Перелічені способи мають ряд недоліків, які стримують їх широке використання в різних галузях виробництва.

Процес отвердіння (нагрівання до певної температури і охолодження) ПКМ безпосередньо у виробі є складним і відповідальним, тому що він визначає основні характеристики готової продукції: фізико-механічні і електричні властивості, монолітність, точність геометричних розмірів і їх стабільність. Саме стадія охолодження отверділого виробу визначає умови їх отримання з необхідними стабільними властивостями. При охолодженні в матеріалі виникають мікро- і макроскопічні залишкові напруження, які суттєво визначаються термічною усадкою зв'язуючого і які призводять до розтріскування зв'язуючого, тріщиноутворення, розшарування ПКМ, втрати герме-

тичності. Тому швидкість охолодження повинна бути такою, щоб усунути перелічені негативні наслідки і забезпечити отримання виробів з рівномірною структурою.

Таким чином, швидкість нагрівання і охолодження ПКМ вибирають з умови досягнення найбільшої глибини отвердіння за відносно короткий час і мінімального значення залишкових напружень.

Автори [5, 6] запропонували і довели, що найбільший ефект прискорення процесу отвердіння досягається при використанні електромагнітного поля надвисокої частоти (ЕМП НВЧ). При цьому отримано суттєве піліпшення фізико-механічних властивостей і їх стабільність. В роботі [7] автори розробили і навели модель процесу нагрівання склопластиків під впливом ЕМП НВЧ. Але в літературі обмежені дані з дослідження процесу охолодження ПКМ, що були отверджені під впливом НВЧ-енергії.

Постановка задачі дослідження

Основними цілями нижче приведенного дослідження є:

- вивчення ступеню теплообміну матеріалу з навколишнім середовищем;
- розробка програми для розрахунку просторового розподілу температури у часі при охолодженні склопластику після отвердіння під впливом ЕМП НВЧ.

Викладання матеріалу та результати

Дослідження процесу охолодження є важливою складовою для відпрацювання технологічного циклу обробки матеріалу. Зокрема, моделювання цього процесу може дати відповідь на таке питання, який повинен бути ступінь теплообміну матеріалу з навколишнім середовищем для уникнення надмірного градієнта температури при затвердінні та охолодженні матеріалу.

Розв'язання цієї задачі потребує вирішення при певних початкових та граничних умовах однорідного теплового рівняння, яке описує лінійний тепловий потік у твердому тілі, обмеженому двома паралельними площинами ($z=0$ і $z=d$). Будемо вважати, що фізичні параметри матеріалу є сталими величинами, тоді теплове рівняння набуває вигляду [8]

$$\alpha^2 \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} - \frac{\partial t}{\partial \tau} = 0, \quad (1)$$

де $t = t(z, \tau)$ – температура в координаті z в момент часу τ ;

$\alpha^2 = \frac{K}{c\gamma}$ – коефіцієнт температуропровідності;

K – коефіцієнт теплопровідності;

c – питома теплоємність;

γ – щільність матеріалу.

У якості граничних умов виберемо умови, які відповідають вільному теплообміну поверхні матеріалу з навколишнім середовищем за законом Ньютона [8]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left[K \frac{\partial t}{\partial z} - H(t - t_0) \right]_{z=0} = 0, \\ \left[K \frac{\partial t}{\partial z} + H(t - t_0) \right]_{z=d} = 0 \end{array} \right\}, \quad (2)$$

де H – коефіцієнт теплообміну;

t_0 – температура оточуючого середовища.

Припустимо спочатку, що $t_0=0$ і позначимо $h = H / K$ ($h>0$), тоді граничні умови (2) приймають вигляд

$$\left\{ \begin{array}{l} \left[\frac{\partial t}{\partial z} - ht \right]_{z=0} = 0, \\ \left[\frac{\partial t}{\partial z} + ht \right]_{z=d} = 0 \end{array} \right\}. \quad (3)$$

Знайдемо часткові рішення рівняння (1), які задовольняють граничним умовам (3). Згідно методу власних функцій, представимо рішення у вигляді добутку двох функцій, причому, кожна з них залежать тільки від одного аргументу

$$t(z, \tau) = \Phi(z)\Psi(\tau), \quad (4)$$

де функція $\Phi(z)$ – функція змінної z ;

$\Psi(\tau)$ – функція змінної τ .

Підстановка (4) в (1) приводить до двох звичайних лінійних однорідних диференціальних рівнянь:

$$\Phi'' + q^2\Phi = 0 \quad ; \quad (5)$$

$$\Psi' + \alpha^2 q^2 \Psi = 0. \quad (7)$$

із відповідними граничними умовами

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi'(0) - h\Phi(0) = 0, \\ \Phi'(d) + h\Phi(d) = 0 \end{array} \right\}. \quad (8)$$

Рішення однорідного рівняння Гельмгольца (5) має вигляд

$$\Phi_n(z) = \cos(q_n z) + \frac{h}{q_n} \sin(q_n z) \quad (n=1, 2, \dots), \quad (9)$$

де q_n – n -й корінь рівняння $tg(qd) = \frac{2qh}{q^2 - h^2}$.

Рішення (7) при $q = q_n$ набуває вигляд

$$\Psi_n(t) = A_n \exp(-\alpha^2 q_n^2 t) \quad (n=1, 2, \dots), \quad (10)$$

де значення коефіцієнтів A_n знаходяться з початкових умов.

У якості початкових умов виберемо умову

$$t(z, 0) = t_N = \text{const}, \quad (11)$$

яка відповідає рівномірному розподілу температури вздовж координати z в результаті дії ЕМП НВЧ.

Для того, щоб задовольнити початковій умові (11), складаємо ряд із часткових рішень (4)

$$t(z, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp(-\alpha^2 q_n^2 \tau) \left[q_n \cos(q_n z) + \frac{h}{q_n} \sin(q_n z) \right] \quad (12)$$

і затребуємо виконання рівності

$$t(z, 0) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \left[q_n \cos(q_n z) + \frac{h}{q_n} \sin(q_n z) \right] = t_N. \quad (13)$$

Підрахунок коефіцієнтів Фур'є дає

$$A_n = t_N \|N\|^2 \frac{1}{q_n^2} [q_n \sin(q_n d) - h \cos(q_n d) + h] \quad (n=1, 2, \dots). \quad (14)$$

Таким чином, рішення поставленої задачі дається рядом (12), де коефіцієнти A_n підраховуються за формулою (14).

Для обчислення температури в процесі охолодження в довільній координаті z в певний момент часу τ за рівнянням (12) була складена програма, входними параметрами якої є товщина шару, початкова температура, питома теплоємність матеріалу, коефіцієнт теплопровідності, густина матеріалу, коефіцієнт теплообміну.

На рисунку приведені розраховані температурні картини $t(z, \tau)$ в процесі стаціонарного охолодження шару товщиною $d=30$ мм для двох значень коефіцієнта теплообміну H ($t_N=130^\circ\text{C}$; $t_0=20^\circ\text{C}$;

$$c=922 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}; K=0,464 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}; \gamma=1,87 \cdot 10^3 \text{ кг} / \text{м}^3).$$

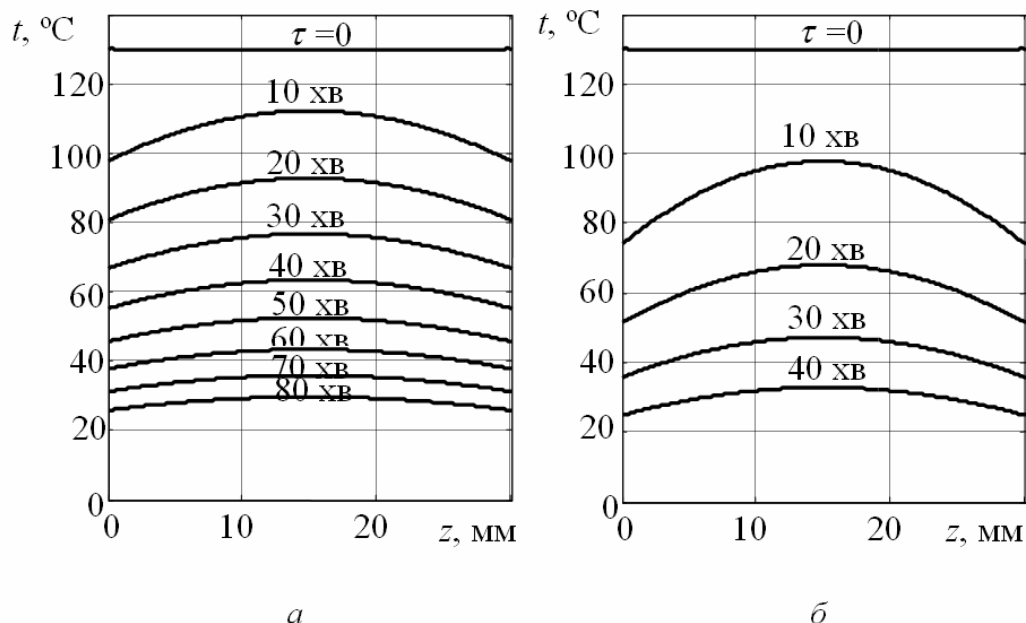


Рисунок 1 – температурні картини $t(z, \tau)$ при охолодженні шару для значень коефіцієнта теплообміну: $a - H=9 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$; $б - H=19 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$

Висновки

Показано, що максимальний градієнт температур у зразку, навіть при сталому коефіцієнті теплообміну, має місце на початковій стадії процесу охолодження. Розрахунки показали, що для уникнення різниці температур всередині і на поверхні зразка меншої, ніж 10^0C , потрібно, щоб коефіцієнт теплообміну не перевищував $5 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$.

Останнє можливе лише при виключенні вільного теплообміну поверхні нагрітого зразка з повітрям. Таким чином, в режимі витримки, при якому відбувається затвердіння матеріалу, необхідно забезпечувати теплоізоляцію зразка.

Чисельне моделювання охолодження дало змогу обрати оптимальні режими нагрівання при полімеризації та швидкості охолодження при розробці всього технологічного процесу обробки ПКМ за допомогою НВЧ енергії.

ЛІТЕРАТУРА

1. Недорезков Е.К. Расчет температурных полей в стеклопластиковых трубах при нагреве ИК-излучателем / Е.К. Недорезков, А.Н. Никитин, С.С. Ермоленко // Пластические массы. – 1986. – №4. – С.41-43.
2. Кестетельман В.М. Физические методы модифицированных полимерных материалов / В.М. Кестельман. – М.: Химия, 1980. – 224с.
3. Цаплин А.Н. Динамика отверждения стеклопластикового цилиндра, облучаемого пучком электронов / А.Н. Цаплин, С.В. Бочкарев // Механика композиционных материалов. – 1989. – №2. – С.341-345.
4. Зеленев Ю.В. Влияние термомагнитной обработки на теплофизические и механические свойства полимеров / Ю.В. Зеленев, Г.В. Кирик, А.Ф. Стадник // Пластические массы. – 2003. – №4. – С.17-19.
5. Санін Ф.П. Обґрунтування використання електромагнітного поля надвисокої частоти для отвердіння полімерних композиційних матеріалів / Ф.П. Санін, А.Л. Демура // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Серія: Ракетно-космічна техніка. – 2003. – Вип.7. – С.129-133.
6. Демура А.Л. Використання електромагнітного поля надвисокої частоти в технологічному процесі виготовлення виробів з полімерних композиційних матеріалів / А.Л. Демура // Вестник двигателестроения. – Запорожье: Мотор Сич. – 2006. – №4. – С.76-79.
7. Демура А.Л. Моделювання процесу нагрівання склопластиків за допомогою НВЧ енергії / А.Л. Демура, В.Д. Рябчій // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Серія: Ракетно-космічна техніка. – 2007. – Вип.11. – Том 1. – С.22-30.
8. Толстов Г.П. Ряды Фурье / Г.П. Толстов – М.:Наука, 1980. – 381с.

А.И. Ивон, В.Ф. Истушкин

РАСЧЕТ ДЛИТЕЛЬНОСТИ „ХОЛОСТЫХ” ТАКТОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕЖИМА ТРОТТЛИНГА ДЛЯ ЗАЩИТЫ ПРОЦЕССОРА ОТ ПЕРЕГРЕВА

Аннотация. Предложена простая аппаратная реализация режима троттлинга процессора. Выполнен расчет длительности „холостых” тактов процессора в режиме троттлинга. При перегреве, когда процессор выполняет энергоемкие участки программы, троттлинг обеспечивает ограничение температуры на уровне 68 °С.

Ключевые слова: режим троттлинга процессора, критический терморезистор, защита процессора от перегрева.

Введение. Сущность режима троттлинга (throttling) заключается в модуляции тактового сигнала процессора для управления энергопотреблением [1]. В режиме троттлинга уменьшается количество „полезных” тактов, в которых процессор выполняет код машинных команд и увеличивается число „холостых” тактов, в которых он простаивает. Такой режим уменьшает загрузку процессора, как следствие энергопотребление снижается. В работе [2] описана простая аппаратная реализация режима троттлинга, позволяющая обеспечить эффективную защиту центрального процессора компьютера от перегрева. Эта реализация использует критические терморезисторы на основе диоксида ванадия (VO_2), которые сочетают свойства датчика температуры и термического реле, переключающегося при температуре $T_t \sim 68^\circ\text{C}$, близкой к граничным рабочим температурам процессоров $\sim 80 - 90^\circ\text{C}$ [1,3]. Пленочный критический терморезистор на основе VO_2 , включенный в цепь управления энергопотреблением, может размещаться непосредственно на кристалле процессора для контроля его температуры.

Постановка задачи. Задачей настоящей работы является анализ кинетики температуры пленочного критического терморезистора на основе VO_2 , включенного в цепь управления энергопотреблением

процессора, для определения длительности „холостых” тактов режима троттлинга.

Основная часть. На рис. 1а показана схема защиты процессора от перегрева, путем его перевода в режим троттлинга. Пленочный критический терморезистор на основе диоксида ванадия R_t , совместно с резистором R образует делитель напряжения, формирующий сигнал для логического вентиля DD1, управляющего подачей импульсов тактового генератора ГТИ в схему процессора.

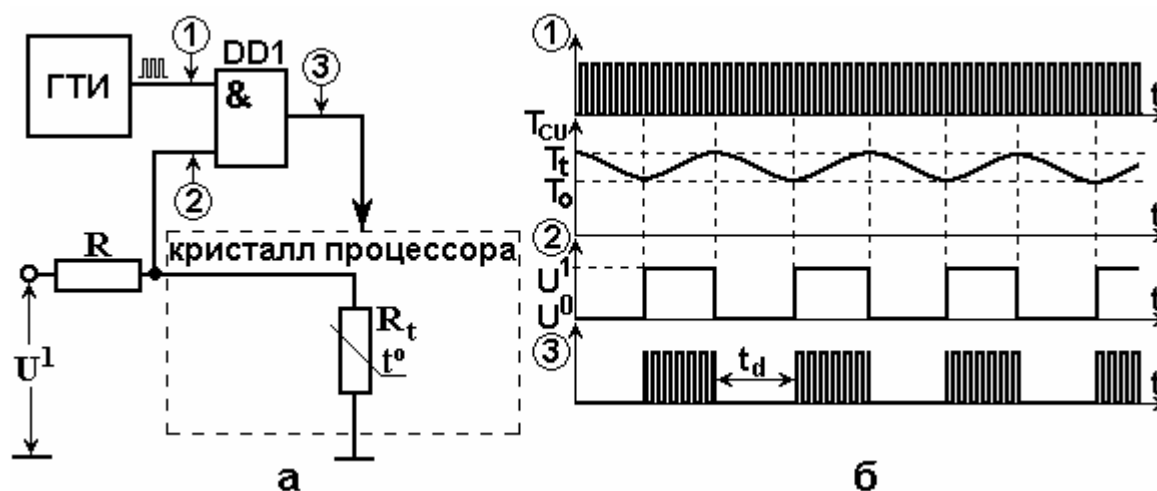


Рисунок 1 - Схема защиты процессора от перегрева (а) и временные диаграммы, поясняющие ее работу (б)

Принцип работы схемы основан на свойстве критических терморезисторов на основе VO_2 , при переходе через температуру $T_t \sim 68^\circ\text{C}$, скачком изменять величину сопротивления R_t от значения $R_t = R_{\text{off}}$, (при $T < T_t$) до значения $R_t = R_{\text{on}}$ (при $T > T_t$). Отношение сопротивлений $R_{\text{off}}/R_{\text{on}}$ обычно близко или превышает 100. Как показано в [2], необходимый для управления элементом DD1 перепад напряжения между логическими уровнями U^1 и U^0 обеспечивается при выборе значений сопротивления R по формуле:

$$R = \sqrt{R_{\text{off}} R_{\text{on}}} . \quad (1)$$

Временные диаграммы, поясняющие принцип работы схемы, приведенной на рис. 1а, показаны на рис. 1б. Когда при выполнении программы процессор нагревается до температуры $T_{\text{CU}} = T_t \sim 68^\circ\text{C}$, критический терморезистор переключается из состояния с высоким сопротивлением $R_t = R_{\text{off}}$ в состояние с низким сопротивлением $R_t = R_{\text{on}}$. Напряжение на выходе делителя скачком уменьшается от высоко уровня U^1 к низкому уровню U^0 (рис. 1б, временная диаграмма 2). Логический элемент „2И” DD1 блокирует подачу тактовых импульсов

в схему ядра процессора (рис. 1б, временная диаграмма 3) и он перестает выполнять программный код. Такой режим работы процессора называют режимом „холостых” тактов [1]. Энергопотребление процессора при выполнении „холостых” тактов резко снижается, и он начинает остывать. Когда через интервал времени t_d температура процессора снижается до значения $T_{CU} = T_o$, критический терморезистор переключается в состояние с высоким сопротивлением $R_t = R_{off}$. На выходе делителя напряжения появляется уровень логической единицы U^1 , деблокирующий подачу тактовых импульсов через логический элемент DD1 в схему ядра процессора. Процессор вновь начинает выполнять программный код. Таким образом, простая схема, приведенная на рис. 1а, предотвращает перегрев процессора при выполнении программы.

Рассчитаем длительность „холостых” тактов t_d и температуру T_o , до которой охлаждается процессор в режиме троттлинга, описанном выше. Используем упрощенную модель, не учитывающую распределение температуры и предполагающую, что температурный режим критического терморезистора целиком определяется теплообменом между ним и процессором. Тогда, если коэффициент теплообмена K_T , температура критического терморезистора T , а температура процессора изменяется во времени по закону $T_{CU}(t)$, то тепловая мощность, рассеиваемая терморезистором в любой момент времени t равна $K_T(T - T_{CU}(t))$. При $T_{CU}(t) > T$ рассеиваемая мощность отрицательна. Это означает, что тепло передается от процессора к терморезистору, и он нагревается. Такому случаю соответствуют интервалы на временных диаграммах (рис. 1б), когда на процессор поступают тактовые импульсы, и он выполняет программу.

Когда критический терморезистор нагревается до температуры T_t и переключается в состояние с малым сопротивлением R_{on} , энергопотребление процессора резко снижается, и он остывает. Начинает выполняться условие $T_{CU}(t) < T$, при котором рассеиваемая терморезистором мощность положительна. Это означает, что тепло передается от терморезистора к процессору, и терморезистор должен остывать. Однако, для того, чтобы температура критического терморезистора стала меньше температуры T_t и он переключился в состояние с высоким сопротивлением R_{off} , должна рассеяться теплота фазового перехода металл-полупроводник, накопленная ранее в рабочем теле тер-

морезистора. Поэтому интервал времени t_d (рис. 1б), определяющий длительность „холостых” тактов, фактически является временем необходимым для отвода из рабочего тела терморезистора скрытой теплоты фазового перехода металл-полупроводник. В течение времени t_d температура терморезистора не изменяется и остается равной T_t , а мощность, которую он рассеивает, равна $K_T(T_t - T_{CU}(t))$. Проинтегрировав эту мощность по интервалу времени $0 \leq t \leq t_d$ можно найти скрытую теплоту фазового перехода металл-полупроводник W_t накопленную в рабочем теле критического терморезистора:

$$W_t = \int_0^{t_d} K_T(T_t - T_{CU}(t)) dt. \quad (2)$$

Пусть пленочный терморезистор на основе VO_2 имеет толщину d и площадь S . Тогда теплота фазового перехода, накопленная в рабочем теле терморезистора, равна $W_t = H_t d S \rho_v$ (здесь H_t – удельная энтальпия фазового перехода металл-полупроводник, ρ_v – плотность диоксида ванадия). Приравняв это значение W_t значению теплоты, определенному соотношением (2), и введя удельный коэффициент теплообмена $k_T = K_T/S$, можно получить уравнение для длительности „холостых” тактов t_d :

$$H_t d \rho_v = \int_0^{t_d} k_T(T_t - T_{CU}(t)) dt \quad (3)$$

Соотношение (3) позволяет найти величину t_d , если известна зависимость температуры процессора от времени в режиме „холостых” тактов. Такую зависимость найдем, приняв, что в режиме „холостых” тактов можно пренебречь энергией потребляемой процессором от источника питания, а в силу малости размеров терморезистора по сравнению с размерами кристалла процессора – пренебречь влиянием терморезистора на тепловой режим процессора.

В этом случае уравнение теплового баланса процессора имеет вид:

$$\frac{dT_{CU}}{dt} + \frac{T_{CU} - Q}{\tau} = 0, \quad (4)$$

где τ – тепловая постоянная времени процессора; Q – температура окружающей среды.

Решение дифференциального уравнения (4) при начальных условиях $t = 0$, $T_{CU}(0) = T_t$ имеет вид:

$$T_{CU}(t) = Q + (T_t - Q) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right). \quad (5)$$

Подставив (5) в (3) и выполнив интегрирование можно получить следующее уравнение для длительности „холостых” тактов t_d :

$$\frac{H_t d \rho_v}{\tau k_T (T_t - Q)} = \frac{t_d}{\tau} + \exp\left(-\frac{t_d}{\tau}\right) - 1. \quad (6)$$

Уравнение (6) трансцендентное и допускает решение только в численном виде. Его можно упростить, если учесть, что $t_d/\tau \ll 1$. Разложив экспоненту в ряд и, ограничившись тремя членами разложения, получим:

$$\frac{H_t d \rho_v}{k_T (T_t - Q)} = \frac{t_d^2}{2\tau}. \quad (7)$$

Откуда вытекает формула для длительности „холостых” тактов при использовании режима троттлинга для защиты процессора компьютера от перегрева:

$$t_d = \sqrt{\frac{2\tau H_t d \rho_v}{k_T (T_t - Q)}}. \quad (8)$$

Подставив (8) в (5) можно найти температуру T_o (см. рис. 1б), до которой будет охлаждаться кристалл процессора за время „холостых” тактов:

$$T_o = Q + (T_t - Q) \exp\left(-\sqrt{\frac{2 H_t d \rho_v}{\tau k_T (T_t - Q)}}\right). \quad (9)$$

Из (9) вытекает, что относительное уменьшение температуры кристалла процессора $\gamma = \frac{(T_t - T_o)}{(T_t - Q)} 100\%$ за время t_d , равно:

$$\gamma = \left(1 - \exp\left(-\sqrt{\frac{2 H_t d \rho_v}{\tau k_T (T_t - Q)}}\right)\right) \times 100\%. \quad (10)$$

Из соотношения (8) видно, что длительностью „холостых” тактов t_d можно управлять, изменяя толщину d пленки критического терморезистора на основе VO_2 , тепловую постоянную времени процессора τ и температуру окружающей среды Q . Тепловую постоянную времени процессора τ можно варьировать, с помощью радиаторов и кулеров. Остальные величины, входящие в формулу (8) являются физическими константами.

Оценим длительность „холостых” тактов t_d и относительное уменьшение температуры кристалла процессора γ за время t_d . Известно [4], что для диоксида ванадия $H_t = 51,7 \text{ Дж} \cdot \text{г}^{-1}$; $\rho_v = 4,4 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$, $T_t = 68 \text{ }^\circ\text{C}$. Если пленочный критический терморезистор на основе VO_2 имеет толщину $d = 1 \text{ мкм}$, при $\tau = 60 \text{ с}$, $Q = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ и $k_T = 10^{-1} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$, получим $t_d = 0,75 \text{ с}$, $\gamma = 1,25 \text{ \%}$. Выполнив при тех же параметрах расчет для случая $d = 10 \text{ мкм}$ найдем $t_d = 2,38 \text{ с}$, $\gamma = 3,9 \text{ \%}$.

Таким образом, при обработке энергоемких участков программы, в случае перегрева, температура процессора в режиме троттлинга, рассмотренном выше, будет испытывать небольшие колебания вблизи температуры $T_t = 68 \text{ }^\circ\text{C}$ фазового перехода металл-полупроводник в VO_2 , не превышая эту температуру. За счет простоя процессора в интервалы времени t_d производительность обработки информации снизится, однако, опасный перегрев процессора, связанный с интенсивным выполнением машинных команд будет предотвращен.

ЛИТЕРАТУРА

1. Функции управления производительностью и энергопотреблением процессоров Intel Pentium 4 и Intel Xeon. Часть 2: новые процессоры, новые технологии [Электронный ресурс] / Д. Беседин // iXBT – 2004 – Режим доступа: <http://www.dvgu.ru/meteo/PC/IntelThermal-2.html>.
2. А.И. Ивон, А.А. Андреев, Л.А. Можаровский, Использование критических терморезисторов для аппаратной реализации режима троттлинга центрального процессора // Системные технологии: сб. научных трудов. – Днепропетровск, 2009. – В. 1 (60). – С. 87 – 92.
3. Защита процессоров AMD от перегрева (Обзор) [Электронный ресурс] / А. Карабуто // FERRA.RU – 2002 – Режим доступа: <http://www.ferra.ru/online/system/s19535/>
4. Самсонов Г.В. Физико-химические свойства окислов: [Справочник] / Г.В.Самсонов, А.Л.Борисова, Т.Г. Жидкова и др. – М.: Металлургия, 1969. – 456 с

А.А. Литвинов, М.В. Павленко

АЛГОРИТМ ЭФФЕКТИВНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ ОТДЕЛЕНИЯ ХИРУРГИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ

Аннотация. В работе рассмотрен вариант алгоритма эффективного распределения ресурсов для клиники хирургического профиля: определены ключевые ограничения и принципы, понятия; приведен вариант алгоритма распределения операционного и коечного фонда; приведены результаты применения алгоритма на примере клиники «Гарвис».

Ключевые слова: стандарты, планирование, расписание, информационная система, хирургическое отделение, алгоритм.

Введение и актуальность. Процесс планирования в клинической практике определяется набором ограничений и предпочтений (constraints, limitations and preferences) [1], высоким уровнем сложности планирования из-за: неопределенности связи между предложенными возможностями и действительными потребностями, невозможности предопределить поток работ связанный с лечением пациента. Существующие методы полу-автоматического планирования операций [2] не учитывают планирование коечного фонда и ограничиваются лишь планированием хирургических вмешательств. В работе [3] рассмотрен вариант динамического распределения ресурсов. Планирование операций осуществляется динамически в рамках заданного ограниченного временного интервала. Рамки окна определяются текущей загрузкой ресурсов клиники и приоритетом операции (тяжестью состояния больного и т.д.). Это является одним из существенных отличий рассматриваемой системы от систем планирования расписания поездов, занятий, вычислений, в которых выполняемые задачи известны заранее.

Постановка задачи. Проблемой динамического распределения является неоптимальное распределение ресурсов, связанных с оказанием услуги (операционного времени, коечного фонда), так как выбор варианта является полной прерогативой пользователя (врача, оператора), который руководствуется политикой удобства в данный мо-

мент, а перераспределение уже занятых ресурсов в большинстве случаев не является возможным. Такая ситуация ведет к снижению эффективности работы клиники в целом.

Основная часть. Предлагаемое решение основывается на автоматическом или полу- и автоматическом распределении услуг (операций и коек), в зависимости от их типа, на базе предсказания, в основе которого лежит алгоритм оптимального распределения операционного и коечного фонда в рамках недели. Следует отметить, что данный алгоритм наиболее эффективно может использоваться в условиях предварительного планирования услуг на период кратный неделе в системах с очередью заявок на предоставление услуги.

Основными ограничениями, связанными с предлагаемым алгоритмом распределения, являются: учет только плановых операций; учет только больных, лечение которых занимает до 7 дней; воскресенье не является операционным днем; операция проводится в день поступления пациента; не рассматриваются варианты отклонения от стандарта лечения; все поступившие пациенты в течение недели должны быть выписаны до воскресенья.

Введем обозначения:

n – количество коек в отделении,

$T = \bigcup_{i=1}^7 T_i$, $T \neq \emptyset$ - набор услуг, классифицированный по количеству дней пребывания пациента в стационаре,

Q_{max} – *максимальное количество операций, проводимых за день.*

Группа одновременно поступивших в клинику пациентов для оказания услуги i -го типа соответствует понятию пакета заданий типа i . Соответственно, количество услуг типа i , которые могут быть оказаны клиникой одновременно (в течение одного дня) - величине пакета заданий.

Рассмотрим модель распределения в клинике с 20 койками, которая специализируется на типе услуг T_4 . Принимая во внимание условие выписки всех пациентов до воскресенья, получим следующий вариант распределения: первые 20 пациентов поступают в понедельник и выписываются в четверг, освобождая место для следующих 20-ти пациентов, которые выписываются в воскресенье. Максимальная пропускная способность такой клиники будет равна 40 пациентам в неделю, операционными днями при этом будут – понедельник и четверг. В эти дни будет произведено по 20 операций (рис. 1).

Кол-во обслуженных пациентов	1	2	3	4	5	6	7
20	I	K	K	X			
40				I	K	K	X

Рисунок 1 – Общая модель обслуживания пациентов хирургическим отделением: I – поступление и операция, K – пребывание на койке, X – выписка

Рассуждая подобным образом относительно других типов услуг можно прийти к следующим выводам. Максимальное число заявок, которые может обслужить клиника за неделю, специализацией которой являются только услуги типов 5, 6 или 7 будет равно кол-ву коек в отделении, что может быть описано формулой (1).

$$\max(T_5|T_6|T_7, 7) = p_{5-7}, \quad p_{5-7} \leq n \quad (1)$$

Для типа 4 (2). При этом операционными днями будут: понедельник, четверг.

$$\max(T_4, 7) = p_4 * 2, \quad p_4 \leq n \quad (2)$$

Для типа 3 можно описать формулой (3). При этом операционными днями будут: понедельник, среда, пятница.

$$\max(T_3, 7) = p_3 * 3, \quad p_3 \leq n \quad (3)$$

Для типов 1, 2 – пациенты могут поступать и оперироваться в любой день, исключая воскресенье

$$\max(T_1|T_2, 7) = p_{1-2} * 6, \quad p_{1-2} \leq n, \quad (4)$$

$$p_{1-2}, p_3, p_4, p_{5-7} \leq n - \text{величины пакетов услуг разных типов} \quad (5)$$

В случае смешанного распределения услуг, которое имеет место в практике, важными параметрами, влияющими на эффективность такого распределения, становятся: правило, определяющее порядок распределения типов услуг; величина пакета для каждого типа услуг.

Величина пакета для каждого типа услуг может вычисляться на основании коэффициента, определяющего долю услуг данного типа от общего числа услуг всех типов(6).

$$\forall t_i, p_i. \quad p_i = k_i * n, \quad (6)$$

p_i – величина пакета услуг типа i ,

k_i – доля услуг типа i ,

при этом $\sum_{i=1}^7 k_i = 1$

Каждому типу услуг назначается порядок, от которого зависит приоритет распределения ресурсов.

$$r_j = s_j(T) \quad , \quad (7)$$

$$s: t_i \rightarrow t_i^k \quad , \quad i, j, k \leq 7, \quad i \neq j, \quad \forall t_i^k t_j^{k+1}. t_i \prec t_j. \quad (8)$$

Порядок задается эмпирически на основании оценки идеальных вариантов распределений и статистики услуг и может быть осуществлен на основании перебора и оценки полученных решений автоматически.

Таким образом, распределение услуг на неделю зависит от числа коек в отделении, максимального количества операций проводимых за день (длины операционного дня), порядка распределения услуг, величины пакета для каждой услуги, которая также определяет максимальное количество операций заданного типа в день. Распределение, основанное на j -ой модели распределения типов услуг, описываемой правилом r_j (9) будет иметь вид

$$H_j^7 = \{(\mathbf{o}t_i, \mathbf{t}_i, p_i, T_i) | i \leq 7, r_j \in R, o_{\max}, n\} \quad , \quad (9)$$

$\mathbf{o}t_i$ – вектор распределения операций услуг заданного типа,

$\mathbf{t}_i$ – вектор распределения коечного фонда для оказания услуг данного типа.

Возможно распределение услуг на любой интервал кратный неделе.

$$H_j^d = \bigcup_{l=1}^{d/7} H_j^{7,l} \quad . \quad (10)$$

Алгоритм представляется процедурой, состоящей из 4 этапов.

1. Определяется порядок распределения типов услуг, величина пакета для каждого типа, порядок распределения услуг в рамках недели. В случае динамического распределения данные характеристики определяются по идеальной модели распределения созданной на основе распределения уже существующих услуг (последнего года, двух лет), характерного для данного промежутка времени (месяца, сезона).

2. По выбранному порядку последовательно выполняется распределение существующих заявок (одной в случае динамического распределения, очереди в случае предварительной обработки). Входными параметрами при этом являются: класс услуги, список услуг данного типа, величина «пакета».

3. Следуя порядку распределение услуг в рамках недели, производится попытка распределения услуг для каждого типа, учитывая ограничения (максимальное число операций, число коек и т.д.)

и уже распределенные ресурсы. Если заданные правила не позволяют осуществить распределение – берется предыдущий/последующий день и осуществляется повторная попытка.

4. При невозможности распределения заявок/заявки в рамках указанной недели – заявка переходит в набор задач следующей итерации генерации распределения на период времени кратный неделе.

Оценка результатов. Рассматривая комплекс услуг, оказанных клиникой «Гарвис» за 2011 год, можно выделить 2 основных типа – T_4 , T_3 (табл.1). Процедуры 6-го и 7-го типа составляют незначительное число, поэтому были исключены из рассмотрения.

Таблица 1

Данные работы хирургической клиники «Гарвис» за 2011

Тип	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	28	33	51	32	25	34	24	32	25	34	37
2	22	23	22	22	48	15	20	22	20	25	30
3	39	56	54	40	38	49	39	31	46	49	61
4	38	47	38	53	28	23	24	22	24	31	31
5	13	13	5	3	11	13	17	6	6	11	9
	140	172	170	150	150	134	124	113	121	150	168

Моделирование недельной работы клиники по алгоритму, основываясь на существующих долях распределения услуг каждого типа, дает следующие результаты (листинг 1). Варианты рассматривались для максимального числа ежедневных операций - 20, 15, 12.

Листинг 1

```

20 - 20 - 20 - 20 - 20 - 20 - 0
20 - 9 - 13 - 9 - 9 - 2 - 0
Operations of type #(1) 9 - 5 - 0 - 0 - 0 - 0 - 0 - 14
Operations of type #(2) 0 - 4 - 2 - 2 - 2 - 2 - 0 - 12
Operations of type #(3) 4 - 0 - 7 - 0 - 7 - 0 - 0 - 18
Operations of type #(4) 7 - 0 - 0 - 7 - 0 - 0 - 0 - 14
Operations of type #(5) 0 - 0 - 4 - 0 - 0 - 0 - 0 - 4
15 - 20 - 20 - 20 - 20 - 20 - 0
15 - 9 - 13 - 9 - 9 - 2 - 0
Operations of type #(1) 4 - 7 - 0 - 0 - 0 - 0 - 0 - 11
Operations of type #(2) 0 - 2 - 2 - 2 - 2 - 2 - 0 - 10
Operations of type #(3) 4 - 0 - 7 - 0 - 7 - 0 - 0 - 18
Operations of type #(4) 7 - 0 - 0 - 7 - 0 - 0 - 0 - 14
Operations of type #(5) 0 - 0 - 4 - 0 - 0 - 0 - 0 - 4
12 - 20 - 18 - 20 - 20 - 20 - 0

```

12 - 8 - 12 - 10 - 10 - 4 - 0

Operations of type #(1) 0 - 8 - 2 - 2 - 0 - 0 - 0 - 12

Operations of type #(2) 0 - 0 - 0 - 2 - 4 - 4 - 0 - 10

Operations of type #(3) 6 - 0 - 6 - 0 - 6 - 0 - 0 - 18

Operations of type #(4) 6 - 0 - 0 - 6 - 0 - 0 - 0 - 12

Operations of type #(5) 0 - 0 - 4 - 0 - 0 - 0 - 0 - 4

Месячная нагрузка такого отделения при возможности проведения 20 операций в день составит: 248 операций без учета симулированных операций. В сравнении с максимальным числом операций (172) проведенных в клинике, приходящимся на февраль 2011 года, видно преимущество представленного решения, рассчитанного для нагрузок операционной 20, 15 и 12 операций в день. При этом для всех типов операций, кроме типа 1 выбрана величина пакета 7.

Таблица 2

Сравнение максимального числа услуг для нагрузки операционной 20, 15, 12 операций в день

	20	20-м	15	15-м	12	12-м
1	14	56	11	44	12	48
2	12	48	10	40	10	40
3	18	72	18	72	18	72
4	14	56	14	56	12	48
5	4	16	4	4	4	16
	62	248	57	228	52	208

Эксперименты по применению алгоритма, проводимые с реальными данными – за основу принимались месячные распределения услуг прошлых лет - показали следующие результаты.

Рассмотрение массива госпитализированных пациентов с 31.10.2011-5.12.2011 при величинах пакетов для каждого типа, представленных в табл.3, показали результаты, приведенные в листинге 2.

Таблица 3

Порядок распределения типов услуг и величины пакетов

Тип	1	2	3	4	5
Величина пакета	15	15	8	6	7

Листинг 2

31.10.2011 - 6.11.2011

Real

5 - 11 - 12 - 16 - 12 - 6 - 2

4 - 6 - 9 - 6 - 7 - 3 - 0 - 35

Calculated

15 - 20 - 20 - 20 - 20 - 20 - 0

15 - 6 - 14 - 6 - 8 - 0 - 0 - 49

(R) Operations of type #(1) 1 - 1 - 2 - 0 - 1 - 0 - 0 - 5

(R) Operations of type #(2) 0 - 2 - 1 - 3 - 2 - 2 - 0 - 10

(R) Operations of type #(3) 2 - 1 - 3 - 2 - 2 - 1 - 0 - 11

(R) Operations of type #(4) 1 - 2 - 3 - 1 - 1 - 0 - 0 - 8

(R) Operations of type #(5) 0 - 0 - 0 - 0 - 1 - 0 - 0 - 1

Operations of type #(1) 0 - 0 - 0 - 0 - 0 - 0 - 0 - 0

Operations of type #(2) 1 - 6 - 0 - 0 - 0 - 0 - 0 - 7

Operations of type #(3) 8 - 0 - 8 - 0 - 8 - 0 - 0 - 24

Operations of type #(4) 6 - 0 - 0 - 6 - 0 - 0 - 0 - 12

Operations of type #(5) 0 - 0 - 6 - 0 - 0 - 0 - 0 - 6

7.11.2011 - 13.11.2011

Real

14 - 13 - 11 - 12 - 7 - 5 - 8

10 - 7 - 7 - 6 - 5 - 4 - 0 - 39

Calculated

15 - 20 - 20 - 20 - 20 - 20 - 0

15 - 6 - 14 - 9 - 11 - 3 - 0 - 58

(R) Operations of type #(1) 3 - 0 - 0 - 1 - 3 - 0 - 0 - 7

(R) Operations of type #(2) 2 - 2 - 3 - 4 - 0 - 1 - 0 - 12

(R) Operations of type #(3) 4 - 4 - 3 - 1 - 1 - 2 - 0 - 15

(R) Operations of type #(4) 1 - 1 - 1 - 0 - 0 - 0 - 0 - 3

(R) Operations of type #(5) 0 - 0 - 0 - 0 - 1 - 1 - 0 - 2

Operations of type #(1) 0 - 0 - 0 - 0 - 0 - 0 - 0 - 0

Operations of type #(2) 1 - 6 - 3 - 3 - 3 - 3 - 0 - 19

Operations of type #(3) 8 - 0 - 8 - 0 - 8 - 0 - 0 - 24

Operations of type #(4) 6 - 0 - 0 - 6 - 0 - 0 - 0 - 12

Operations of type #(5) 0 - 0 - 3 - 0 - 0 - 0 - 0 - 3

14.11.2011 - 20.11.2011

Real

12 - 11 - 12 - 15 - 11 - 5 - 5

7 - 8 - 8 - 7 - 4 - 2 - 0 - 36

Calculated

12 - 18 - 17 - 20 - 20 - 20 - 0

12 - 15 - 15 - 12 - 14 - 6 - 0 - 74

(R) Operations of type #(1) 3 - 3 - 3 - 1 - 2 - 0 - 0 - 12

(R) Operations of type #(2) 0 - 0 - 0 - 2 - 0 - 0 - 0 - 2

(R) Operations of type #(3) 2 - 2 - 4 - 3 - 0 - 1 - 0 - 12

(R) Operations of type #(4) 2 - 1 - 0 - 1 - 1 - 1 - 0 - 6

(R) Operations of type #(5) 0 - 2 - 1 - 0 - 1 - 0 - 0 - 4

Operations of type #(1) 9 - 15 - 7 - 6 - 6 - 0 - 0 - 43

Operations of type #(2) 0 - 0 - 0 - 0 - 0 - 6 - 0 - 6

Operations of type #(3) 1 - 0 - 8 - 0 - 8 - 0 - 0 - 17

Operations of type #(4) 2 - 0 - 0 - 6 - 0 - 0 - 0 - 8
 Operations of type #(5) 0 - 0 - 0 - 0 - 0 - 0 - 0 - 0

21.11.2011 - 27.11.2011

Real

12 - 13 - 11 - 16 - 15 - 15 - 5

10 - 4 - 7 - 6 - 7 - 7 - 1 - 42

Calculated

0 - 0 - 0 - 0 - 0 - 0 - 0

0 - 0 - 0 - 0 - 0 - 0 - 0 - 0

(R) Operations of type #(1) 4 - 0 - 1 - 1 - 0 - 0 - 0 - 6

(R) Operations of type #(2) 0 - 0 - 0 - 2 - 1 - 2 - 0 - 5

(R) Operations of type #(3) 4 - 2 - 2 - 1 - 4 - 3 - 1 - 17

(R) Operations of type #(4) 2 - 2 - 4 - 1 - 2 - 2 - 0 - 13

(R) Operations of type #(5) 0 - 0 - 0 - 1 - 0 - 0 - 0 - 1

28.11.2011 - 4.12.2011

Real

8 - 14 - 9 - 10 - 4 - 0 - 0

6 - 8 - 7 - 6 - 2 - 0 - 0 - 29

Calculated

0 - 0 - 0 - 0 - 0 - 0 - 0

0 - 0 - 0 - 0 - 0 - 0 - 0 - 0

(R) Operations of type #(1) 1 - 4 - 3 - 3 - 2 - 0 - 0 - 13

(R) Operations of type #(2) 0 - 0 - 1 - 2 - 0 - 0 - 0 - 3

(R) Operations of type #(3) 4 - 2 - 3 - 1 - 0 - 0 - 0 - 10

(R) Operations of type #(4) 1 - 1 - 0 - 0 - 0 - 0 - 0 - 2

(R) Operations of type #(5) 0 - 1 - 0 - 0 - 0 - 0 - 0 - 1

Пользуясь стандартными формулами для определения ускорения и эффективности обработки заявок

$$s_p = \frac{T_1}{T_p}, \quad (11)$$

$$E = \frac{s_p}{r}, \quad (12)$$

где T_1 – время обработки n услуг на базе динамического распределения; T_p – время обработки услуг с использованием предложенного алгоритма, получим, что использование ресурсов с использованием представленного алгоритма будет в 1.7 раз эффективнее.

Выводы. В работе рассмотрен вариант алгоритма эффективного распределения ресурсов для клиники хирургического профиля. При этом учитывается оптимальное заполнение коечного фонда в условиях работы хирургического отделения. Внимание сконцентрировано на задаче обработки запросов на выполнение плановых операций. Приведено формальное описание алгоритма распределения ресурсов. Проведена оценка эффективности распределения ресурсов с использованием данного алгоритма в сравнение с реальными данными. Полученные результаты создают основу для построения информационной системы поддержки гибкого планирования операций, а также служат фундаментом для дальнейших исследований, имеющих целью достижение эффективного использования ресурсов стационарного отделения хирургического профиля.

ЛИТЕРАТУРА

1. M. Becker, K.-H. Krempels, M. Navarro, and A. Panchenko. Agent Based Scheduling of Operation Theatres. EU-LAT eHealth
2. Karl-Heinz Krempels and Andriy Panchenko. An Approach for Automated Surgery Scheduling. In Edmund Burke and Hana Rudova, editors, Practice and Theory of Automated Timetabling VI: Sixth International Conference, PATAT 2006 Brno, Czech Republic, August 30 - September 1, 2006, Selected Revised Papers, LNCS, Heidelberg, 2006. Springer-Verlag GmbH.
3. В.Н. Лехан, М.В.Павленко, А.А. Литвинов. Подход к автоматизации планирования лечения больных хирургического профиля. // "Системные технологии". Региональный межвузовский сборник научных трудов. - Днепропетровск, 2009. – Выпуск 5 (64). - 89-102 с.

Н.О. Матвеева, І.В. Гаркуша

АЛГОРИТМИ ОПТИМІЗАЦІЇ НАВЧАННЯ ДЛЯ ЗАДАЧ КЛАСИФІКАЦІЇ ДЕФЕКТІВ

Анотація. Представлені результати дослідження якості навчання (залежність суми квадратів помилок від кількості епох) для розв'язання задачі класифікації дефектів. Моделювання багатосарового персептрона виконувалось в середовищі MATLAB.

Ключові слова: нейронні мережі, багатосаровий персептрон, алгоритми оптимізації.

Вступ. Проблема класифікації є однією з найбільш часто виникаючих і розв'язуваних задач як при наукових дослідженнях, так і на практиці. Розв'язання задачі класифікації полягає в розробці й формуванні таких правил і закономірностей, які дозволили б розпізнати певні явища або об'єкти та обумовити їх належність до деяких класів або груп. Задача значно ускладнюється в реальних умовах: доводиться враховувати велику кількість різних факторів і явищ [1,2].

При проведенні неруйнівного контролю композитних матеріалів слід брати до уваги їх складний рельєф поверхні. Технологія виготовлення волокнистих композитів звичайно не передбачає механічну обробку, що ускладнює процес сканування поверхні та додає різні види шумів. Виникає задача – аналізуючи оброблювані сигнали, необхідно отримати інформацію про наявність та розміри дефектів. Для розв'язання таких задач використовуються нейронні мережі [3, 4], які активно розвиваються останнім часом, володіють універсальними та адаптивними властивостями й забезпечують високу ефективність розпізнавання. Але, у свою чергу, характеризуються такими недоліками, як тривалість і складність процесу навчання, складність підбору параметрів нейронної мережі для впевненого розв'язання задачі.

Метою роботи є порівняльний аналіз використання градієнтних та сполучених алгоритмів навчання при вирішенні задачі класифікації сигналів дефектоскопії.

Основна частина. Кожна штучна нейронна мережа являє собою множину простих елементів – нейронів, які сполучені певним чином. Задача нейронної мережі полягає у перетворенні інформації. Конкретний вигляд виконуваної мережею перетворення даних обумовлюється не тільки характеристиками нейронів, які входять до її структури, але і особливостями її архітектури, а самотопологією міжнейронних зв'язків, напрямом і способами передачі інформації між нейронами, а також засобами навчання мережі.

В роботі запропоновано використовувати багат шаровий перцептрон (multilayer perceptron - MLP) засобами бібліотеки Neural Networks Tool середовища Matlab.

Алгоритми оптимізації навчання є стратегіями, заснованими на реалізації ідеї ітеративного спуску, які забезпечують мінімізацію функціонала навчання. У процесі роботи алгоритмів, як правило, виникає задача одновимірного пошуку мінімуму уздовж заданого напрямку. Це можуть бути антиградієнти або сполучені напрямки [4].

Градiєнтні алгоритми навчання є специфічною реалізацією градiєнтного спуску в просторі вагових коефіцієнтів і зміщень MLP і забезпечують рух по поверхні функціоналу помилки в напрямку, протилежному вектору градiєнта. До них відносяться алгоритми: градiєнтного спуску з параметром швидкості навчання (налаштування) – GD (М-функція *traingd*); градiєнтного спуску з адаптацією параметра швидкості навчання – GDA (*traingda*). Якщо до алгоритмів GD і GDA додати ще один параметр – збурення, то отримаємо ще два алгоритми – GDM (*traingdm*) і GDX (*traingdx*), відповідно [4]. Формально всі алгоритми градiєнтного спуску можна записати в наступному вигляді:

$$w_{k+1} = w_k - \alpha_k g_k \quad (1)$$

де w_k – вектор вагових коефіцієнтів; α_k – параметр швидкості навчання; g_k – вектор градiєнта функціонала помилки. Переходячи від k -ї ітерації до $k+1$ -ї, алгоритм виконує корекцію вагових коефіцієнтів:

$$\Delta w_k = w_{k+1} - w_k = -\alpha_k g_k. \quad (2)$$

З виразу (2) витікає, що метод градiєнтного спуску працює на основі лінійної апроксимації функції вартості біля поточної точки w_k , при якій єдиним джерелом інформації щодо поверхні помилок є градiєнт g_k . Таке обмеження забезпечує значну перевагу – простоту реалізації, але отримуємо низьку швидкість збіжності. Крім того, на

швидкість збіжності впливає значення параметра α , вибір якого викликає певні труднощі. В алгоритмі GD значення параметра α задається тільки на початку навчання, залежить від конкретної задачі і отримується дослідним шляхом. Алгоритм GDA використовує евристичну стратегію зміни параметра α у процесі навчання. На кожному циклі навчання обчислюються значення параметрів, що настроюються, і нові значення виходів і похибок. Нові значення порівнюються із значеннями, отриманими на попередньому кроці. Якщо нова похибка менша за попередню, то параметр швидкості настройки збільшується, і навпаки. Алгоритм GDM модифікує (2) з урахуванням параметра збурення mc і реалізує наступне співвідношення для збільшення вектора параметрів, що настроюються

$$\Delta w_k = mc \Delta w_{k-1} + (1 - mc) \alpha g_k. \quad (3)$$

Таким чином, алгоритми градієнтного спуску коригують параметри, які настроюються, в напрямку антиградієнту, однак такий напрямок далеко не завжди є самим сприятливим (за можливо мале число кроків забезпечити збіжність до мінімуму функціонала якості).

Сполучені напрямки і, відповідно, метод оптимізації – *метод сполучених градієнтів* – дозволяють визначити необхідний мінімум набагато швидше. Розглянемо наступні алгоритми методу спряжених градієнтів: Флетчера-Рівса CGF (М-функція - *traincgf*); Полака-Рібейри CGP (*traincgp*); Пауелла-Бієль CGB (*traincgb*); Моллера SCG (*trainscg*). Всі алгоритми методу сполучених градієнтів на першій ітерації починають пошук у напрямку антиградієнту:

$$p_0 = -g_0. \quad (4)$$

Для визначення розміру кроку уздовж сполученого напрямку виконуються спеціальні одномірні процедури пошуку мінімуму. Коли вибрано напрямок спуску, потрібно визначити оптимальну відстань (крок пошуку), на величину якого слід змінити настроюванні параметри:

$$w_{k+1} = w_k + \alpha_k p_k. \quad (5)$$

Потім визначається наступний напрямок пошуку як лінійна комбінація нового напрямку найшвидшого спуску і вектора руху:

$$p_k = -g_k + \beta_k p_{k-1}, \quad (6)$$

Різні алгоритми методу сполученого градієнта розрізняються способом обчислення константи β_k . Алгоритм CGF використовує такий вираз:

$$\beta_k = \frac{\mathbf{g}_k^T \mathbf{g}_k}{\mathbf{g}_{k-1}^T \mathbf{g}_{k-1}}. \quad (7)$$

Алгоритм Полака-Рібейри CGP обчислює константу β_k :

$$\beta_k = \frac{\Delta \mathbf{g}_k^T \mathbf{g}_k}{\mathbf{g}_{k-1}^T \mathbf{g}_{k-1}}. \quad (8)$$

Для всіх алгоритмів методу сполучених градієнтів напрямок пошуку періодично перевстановлюється заново на напрямок антиградієнту (рестарт). Це відбувається, коли виникають проблеми зі збіжністю. Одна з таких стратегій рестарту реалізована в алгоритмі CGB. Відповідно до цієї стратегії рестарт виконується, якщо поточний та попередній напрямки градієнтів слабкоортогональні, і ця умова визначається наступним чином:

$$\|\mathbf{g}_k^T \mathbf{g}_k\| \geq 0.2 \|\mathbf{g}_k\|^2. \quad (9)$$

Всі алгоритми, засновані на методі сполучених градієнтів, реалізують на кожній ітерації процедуру одновимірного пошуку. Ця коштотна в обчислювальному відношенні процедура вимагає на кожній ітерації кілька разів обчислювати реакцію мережі.

Експериментальні дослідження. Для моделювання процесу класифікації сигналів використовувалось обчислювальне середовище MATLAB R2010b. У якості навчальної множини для нейронної мережі запропоновані значення функцій, які відповідають модельним сигналам, одержаним при скануванні поверхні композитів [5], у точках $x = -2, -1.9, \dots, 2$:

$$y(x) = \exp(-1,5x^2) - k \cdot \exp(-3x^2) \quad (10)$$

де k змінюється від 0 до 1. Вираз (10) при зміні значень k описує різні форми сигналів дефектоскопії: *вузький унімодальний сигнал*, який характеризує довгі тріщини, довжина яких перебільшує зону контролю; *положистий унімодальний сигнал* – для тріщин меншої розмірності; *бімодальний сигнал* мають маленькі тріщини (при $k = 1$ – точковий дефект) [6].

Спочатку будемо використовувати градієнтні методи: *traingd*, *traingdm* і *traingda*, *traingdx*. Для вирішення поставленого завдання сформована чотирьохшарова мережа зворотного поширення, яка включає 41 нейрон у вхідному шарі (за кількістю компонент вхідного

вектора) з передатною функцією *logsig*, 20 нейронів у другому шарі з гіперболічним тангенсом *tansig*, 10 нейронів у третьому шарі з логістичною сигмоїдальною функцією *logsig* і 3 нейрони у вихідному шарі (за кількістю компонент вихідного вектора) з лінійною функцією *purelin* (рис. 1). Для обчислення функціоналу якості навчання, який залежить від помилок мережі e , в роботі використовується сума квадратів помилок:

$$SSE = \sum_{i=1}^N e_i^2.$$

Спочатку проводилось навчання мережі на модельних сигналах до досягнення $SSE=0.01$. Потім здійснювалось навчання при наявності шуму, припустиму похибку збільшували до 0.06.

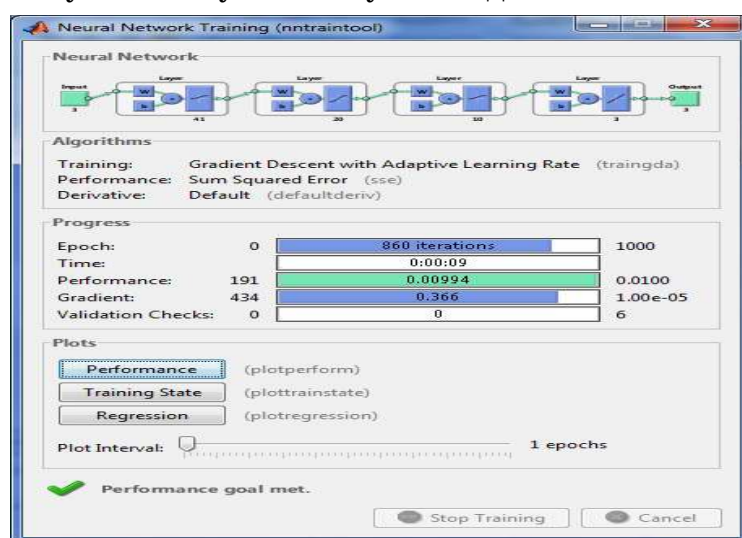


Рисунок 1 - Моделювання мережі в Neural Networks Toolbox

Далі в якості алгоритмів навчання використовувались методи сполучених градієнтів: *traincgf*, *trainscg*, *traincgp*, *traincgb* (рис. 2). Знов проводили навчання мережі на модельних сигналах до досягнення допустимої суми квадратів помилок, яка дорівнює 0.01. Потім проводилось навчання при наявності шуму із середніми значеннями 0.05 та 0.1. При навчанні з шумом припустиму похибку залишили $SSE=0.01$.

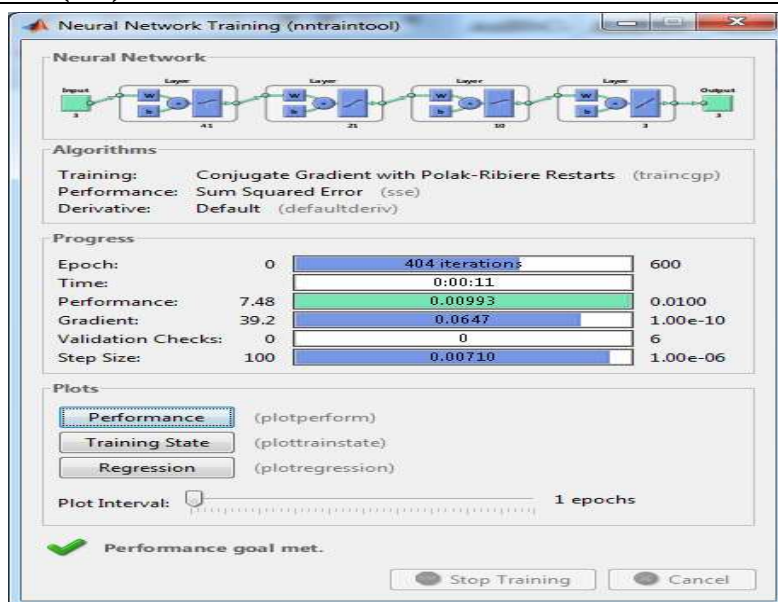


Рисунок 2 - Моделювання мережі в Neural Networks Toolbox

Порівняльний аналіз результатів експерименту. Для отримання усереднених параметрів було виконано понад 50 експериментів моделювання для кожного з методів оптимізації з різними параметрами (табл. 1).

Таблиця 1

Показники функцій оцінки якості навчання

Функції активації	Кількість епох (циклів) без шуму	Кількість епох (циклів) з шумом
GD	5000 ÷ 6000	3500 ÷ 5400
GDM	1900 ÷ 3500	1500 ÷ 3000
GDA	840 ÷ 1900	300 ÷ 1200
GDX	400 ÷ 500	200 ÷ 4300
Rprop	30 ÷ 50	50 ÷ 200
CGF	60 ÷ 65	100 ÷ 240
SCG	60 ÷ 85	100 ÷ 400
CGP	45 ÷ 70	400 ÷ 550
CGB	50 ÷ 65	170 ÷ 500

У навчальних алгоритмах градієнтного спуску управління збіжністю здійснюється за допомогою параметра швидкості настроювання, а в алгоритмах методу сполучених градієнтів розмір кроку коригується на кожній ітерації і тому ці алгоритми значно перебільшують за швидкістю навчання градієнтні алгоритми (табл. 1), однак для їх реалізації необхідний значний обсяг пам'яті. Порівняльний аналіз

алгоритмів GD, GDM і GDA, GDX для задачі класифікації сигналів показав, що швидкість збіжності і значення функцій помилок краще всього для алгоритму GDX (він містить в собі параметри адаптації та збурення). Але найкращим з методів градієнтних алгоритмів є Rprop, котрий має найвищу швидкість навчання.

Одним з найбільш інформативних способів перевірки якості алгоритмів є побудова кривих навчання. Крива навчання є графіком зміни суми квадратів помилок (SSE) залежно від кількості ітерацій (рис. 3 та рис. 4).

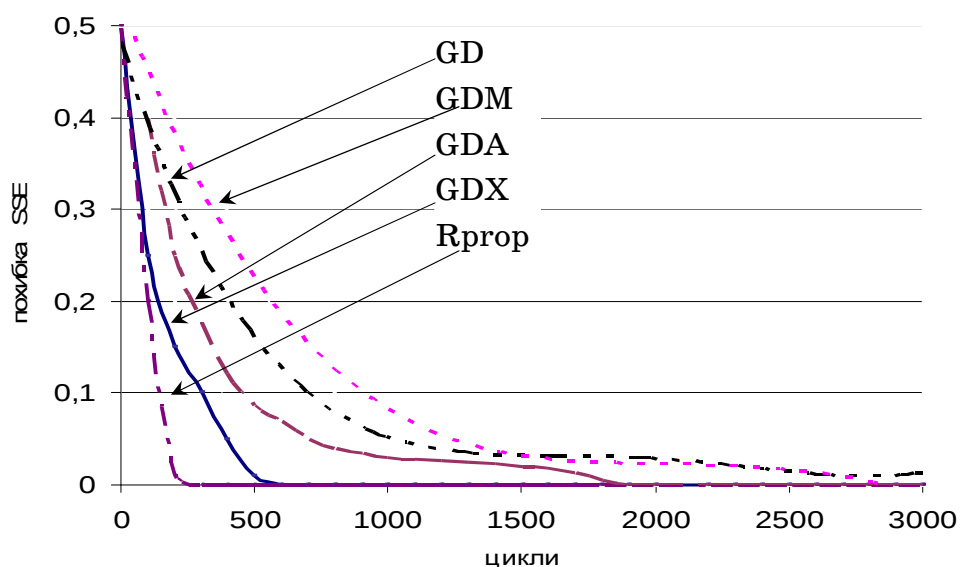


Рисунок 3 - Усереднені криві навчання для градієнтних методів

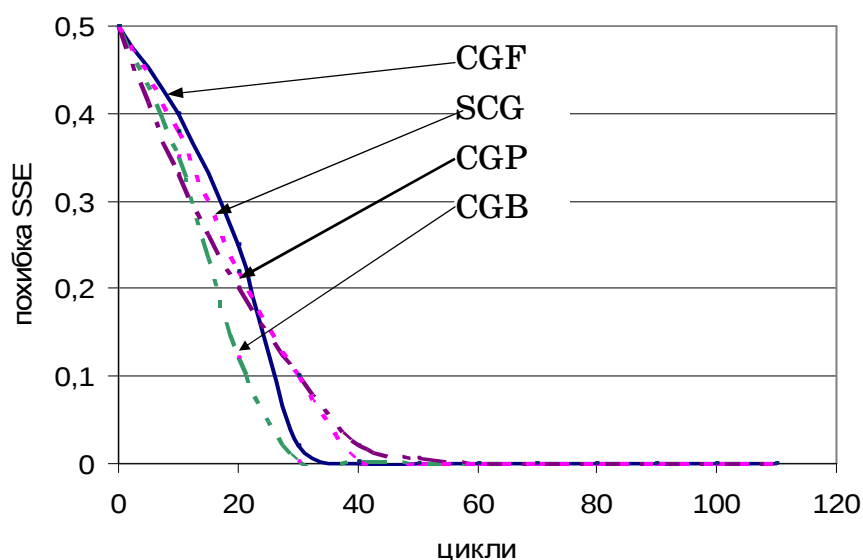


Рисунок 4 - Усереднені криві навчання для методів сполучених градієнтів

Криві навчання (рис. 3) починаються з досить великих значень помилок, обумовлених початковими умовами, і потім їх значення зменшуються з деякою швидкістю, залежно від типу алгоритму, і сходяться у межах деякого сталого граничного значення помилки, яка мало відрізняється для різних алгоритмів. Це значить, що поверхня помилок у досліджуваній задачі досить гладка.

Всі досліджувані алгоритми метода сполучених градієнтів показали практично однаково високу швидкість навчання (рис. 2). Якщо для порівняння алгоритмів використовувати не тільки необхідну кількість циклів навчання, але і кількість додаткових параметрів, то вимоги до розміру оперативної пам'яті для алгоритмів CGP та CGV трохи більші, оскільки треба запам'ятати 4 та 6 векторів, відповідно, в той же час для алгоритму CGF – тільки 3. Вимоги до пам'яті для алгоритму SCG приблизно такі, як і для метода CGF.

Висновки. В роботі проведені дослідження алгоритмів оптимізації навчання при розв'язанні задачі класифікації сигналів, які отримуються при проведенні неруйнівного контролю композитів. Найкращі результати показали методи сполучених градієнтів. Алгоритм Rprop показав практично таку ж швидкість навчання, однак він не потребує використання процедури одномірного пошуку, характеризується високою швидкістю й немає вимог до об'єму пам'яті.

ЛІТЕРАТУРА

1. Горелик А.Л., Скрипкин В.А. Методы распознавания. -М.: Высшая школа, 1989.-232 с
2. Аксенов С.В. Организация и использование нейронных сетей (методы и технологии) / С.В. Аксенов, В.Б. Новосельцев – Томск: Изд-во НТЛ, 2006. – 128 с.
3. Хайкин Саймон. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006
4. Медведев В.С. Нейронные сети. MATLAB 6 / В.С. Медведев, В.Г. Потемкин – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2002. – 496 с
5. Хандецкий В.С. Спектральная идентификация сигналов в дефектоскопии композитов с использованием теории статистических испытаний / Хандецкий В.С., Герасимов В.В. //Вісник ДНУ: Фізика. Радіоелектроніка. – Дніпропетровськ: – 2003. № 10. – С. 128 – 132
6. Матвеева Н.А. Моделирование нейросети для решения задачи классификации в дефектоскопии // Системні технології. Регіон. міжвуз. зб. наук. праць. - Дніпропетровськ: ДНВП «Системні технології», 2011. -Вип. 1(72). - С. 37-44.

Л.Г. Ахметшина, А.А. Егоров, Т.С. Ямнич

ВЛИЯНИЕ МЕТОДОВ КЛАСТЕРИЗАЦИИ В ЗАДАЧЕ НЕЧЕТКОЙ ИНТЕРПОЛЯЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Аннотация. Исследовано влияние методов кластеризации и вида функции принадлежности на результаты нечеткой интерполяции экспериментальных пространственных данных, заданных на неравномерной сетке.

Ключевые слова: пространственные данные, интерполяция, неравномерная сетка, нечеткие модели, кластеризация, функция принадлежности.

Постановка проблемы. При анализе неравномерно распределенных пространственных экспериментальных данных, практически всегда возникает проблема восстановления (интерполяции) их значений в узлах регулярной сетки. Например, моделирование рельефа и изолиний Земной поверхности, оценка границ возможных зон подтопления и загрязнения, оценка рудного тела, вычисление объемов под объектами на поверхности и т.д. по результатам полевых работ. Данные задачи имеют большую практическую значимость, и их решению уделяется большое внимание.

Наиболее известными методами, обеспечивающими восстановление полей признаков по дискретным данным в узлах регулярной сетки, можно считать методы минимальной кривизны, триангуляции, ближайшего соседа, кригинга, радиальных базисных функций, обратного расстояния в степени. Возможность использования различных нечетких моделей для решения подобных задач рассмотрены в [2], однако этот подход успешно применяется в системах контроля, но почти отсутствуют работы по применению нечеткой интерполяции для решения задач прогнозирования и классификации.

Преимущество нечетких моделей связано с возможностью использования значительно меньших объемов исходной информации, причем она может носить приближенный характер.

Существует два принципиально различных подхода при построении нечетких моделей – на основе экспертных знаний о системе и на основе измерений входов и выходов. В последнем случае различают самоорганизующиеся, адаптивные и частотные методы. Обычно, модели, построенные частотными методами (методами на основе кластеризации), используются, если функционирование системы в основном в области кластеров которым и соответствуют наблюдаемые входные значения, а возникновение других состояний носит спорадический характер [1].

В работе [2] демонстрируется возможность интерполяции экспериментальных пространственных данных, заданных на неравномерной сетке методом двумерного проецирования нечетких кластеров, в котором при определении поверхности решения используются результаты кластеризации для случая, когда исходные экспериментальные данные распределены случайным образом и имеют равнозначное значение. Основными параметрами, оказывающими непосредственное влияние на качество модели, полученной данным методом, являются алгоритм кластеризации и форма функции принадлежности.

Целью данной работы является демонстрация влияния метода кластеризации и способа формирования функции принадлежности, используемых в методе нечеткого проецирования кластеров, на точность интерполяции пространственных данных, заданных на неравномерной сетке.

Основная часть. Метод двумерного проецирования нечетких кластеров реализует идею [1], заключающуюся в предположении, что если образец принадлежит кластеру рассматриваемого класса в n -мерном пространстве, то его проекции также принадлежат проекциям этого кластера на любое из двумерных пространств $X_i \times X_j$, а функцию принадлежности заданного класса $u(x_1, x_2, \dots, x_n)$ можно определить через функции принадлежности его проекций на отдельные подпространства $u(x_1, x_2), \dots, u(x_1, x_n), \dots, u(x_{n-1}, x_n)$.

Алгоритм метода включает последовательность следующих действий [2].

1. Кластеризация неравномерных измерений N на c классов.

2. Построение проекций $m_i^{X_j}$ центров кластеров на входное подпространство $X_i \times X_l$, где $j, l = 1, \dots, n-1$, $i = 1, \dots, c$ и определение в них функций принадлежности u_{ij}^X для каждой точки исходных данных, причем n -ый параметр – целевой, интерполяция которого производится.

3. Определение функций принадлежности полного координатного пространства интерполируемой поверхности, которое выполняется в соответствии с выражением:

$$u_i^X(x_j) = \left(\sum_{k=1}^c \left[\frac{d_{ij}^X(x)}{d_{kj}^X} \right]^{\frac{2}{q-1}} \right)^{-1}, \quad d_{ij}^X(x) = |x - m_i^X| = \sqrt{(x_j - m_i^X)^T A (x_j - m_i^X)}, \quad (1)$$

где $A = I$ – единичная матрица. Расстояние $d_{ij}^X(x)$ между вектором x_i и центром кластера m_i^X определяется только во входном пространстве.

3. Вычисление выхода нечеткой модели (интерполируемой поверхности) y по формуле

$$y(x_j) = \left(\sum_{i=1}^c m_i^Y \cdot u_i^X(x_j) \right) / \left(\sum_{i=1}^c u_i^X(x_j) \right) \quad (2)$$

Этап кластеризации, обеспечивает разбиение множества входных значений $X = \{x_1, \dots, x_n\} \subset \mathbb{R}^p$ на $c \in \{2, \dots, n-1\}$ подмножеств, представляющих подструктуру X .

Разбиение отражает особенность их распределения в пространстве и может быть описано при помощи матрицы U размером $c \times n$, каждый элемент которой u_{ik} , $i = 1, \dots, c$, $k = 1, \dots, n$ представляет принадлежность образца $x_k \in X$ к i -му кластеру. Цель алгоритма – получение векторов, определяющих значения центров классов (центроидов), характеризующих каждую группу.

Используемый метод кластеризации влияет на глобальные характеристики поверхности решения, поскольку определяет месторасположение функций принадлежности, представляющих «образ» каж-

дого из классов (центроид – центр функции принадлежности соответствующего класса), на основании которых производится расчет отображения «вход-выход» системы в нечеткой модели.

При определении множества матриц разбиения рассматриваются четкие, нечеткие и возможные (вероятностные) декомпозиции, которые трактуются как модификации нечеткой кластеризации ($M_{hcm} \subset M_{fcm} \subset M_{ncm} \subset M_{pcm} \subset [0,1]^{cn}$) [3]:

– множество с четким разбиением

$$M_{hcm} = \left\{ U \in \{0,1\}^{cn} \left| \sum_{i=1}^c u_{ik} = 1, k=1, \dots, n, \sum_{k=1}^n u_{ik} > 0, i=1, \dots, c \right. \right\}$$

– множество с нечетким разбиением

$$M_{fcm} = \left\{ U \in [0,1]^{cn} \left| \sum_{i=1}^c u_{ik} = 1, k=1, \dots, n, \sum_{k=1}^n u_{ik} > 0, i=1, \dots, c \right. \right\}$$

– множество с зашумленным нечетким разбиением

$$M_{ncm} = \left\{ U \in [0,1]^{cn} \left| 0 < \sum_{i=1}^c u_{ik} \leq 1, k=1, \dots, n, \sum_{k=1}^n u_{ik} > 0, i=1, \dots, c \right. \right\}$$

– множество с вероятностным разбиением

$$M_{pcm} = \left\{ U \in [0,1]^{cn} \left| \sum_{i=1}^c u_{ik} > 0, k=1, \dots, n \right. \right\}.$$

При интерпретации результатов нечеткой кластеризации дефазификация обычно осуществляется на основе максимума функции принадлежности. Такой подход является не совсем корректным, поскольку значения функции принадлежности могут иметь несколько экстремумов сопоставимой или даже равной амплитуды, а значения функции принадлежности каждого из классов, содержит информацию, пригодную для анализа о степени влияния каждой точки на остальные.

В [2] при выполнении первого этапа алгоритма использовался широко известный метод нечеткой кластеризации FCM (fuzzy c-means), который базируется на процедуре итеративной минимизации целевой функции вида

$$J(U, V) = \sum_{i=1}^c \sum_{n=1}^N u_{ik}^m \|x_n - v_i\|^2, \quad (3)$$

причем $\sum_{i=1}^c u_{ik} = 1, k = 1, \dots, n$, где $V = \{v_1, \dots, v_c\}$ – центры кластеров (центроиды); u_{ik} – функция принадлежности k -го входа x_k , $m \in [1, \infty)$ – параметр фаззификации или экспоненциальный вес, определяющий степень нечеткости результата кластеризации.

Этот метод позволяет получить хорошие результаты в случаях, когда значения выборок нескольких классов близко расположены, или даже перекрываются. К недостаткам алгоритма FCM относятся необходимость априорного задания количества кластеров, неустойчивая реакция на выбросы и артефакты, отсутствие возможности учета пространственной составляющей.

В настоящее время существуют различные модификации методов нечеткой кластеризации, направленные на повышение достоверности группирования при решении специфических задач [3]. Например, при наличии одиночных объектов (точек с низкой принадлежностью к каждому кластеру) рекомендуется применение вероятностного алгоритма c -means (PCM), который минимизирует целевую функцию

$$J_{PCM}(U, V, M) = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c (u_{ik} \|x_k - v_i\|^2 + \eta_i (1 - u_{ik})^m), \quad (4)$$

где η_i – некоторая положительная константа, характеризующая ширину возможного распределения, и не использует условие нормализации $\sum_{i=1}^c u_{ik} = 1, k = 1, \dots, n$. В алгоритме Густафсона-Кесселя (GK) и Fuzzy Maximum Length Estimates (FMLE) матрица, используемая при расчете расстояния $A_i \neq I$, что позволяет находить кластера произвольных форм.

В [4] предложен алгоритм FCM-SOM, в котором сочетается применение нечеткого и нейросетевого подходов – используется самоорганизующаяся карта Кохонена (СОК) на этапе дефаззификации, что обеспечивает реорганизацию полученных кластеров и адаптивное определение их количества.

Алгоритм применения FCM-SOM в методе двумерного проецирования нечетких кластеров предлагает выполнение следующих шагов.

1. Задание числа c – количества нечетких кластеров, использование алгоритма FCM для проведения процедуры нечеткой кластеризации с целью определения матрицы U – значений функций принадлежности для каждой точки входного пространства в соответствии с (1) и центров кластеров v на основе выражения

$$v_{kj} = \frac{\sum_{i=1}^n (u_{ki})^m \cdot x_{ij}}{\sum_{i=1}^n (u_{ki})^m} (\forall k \in \{1, \dots, c\}, \forall j \in \{1, \dots, q\})$$

где q – количество информативных признаков, описывающих каждый экземпляр данных.

2. Формирование данных для кластеризации с использованием СОК, которые вместо интерполируемого значения содержат значения функций принадлежности u_{ij}^X каждой точки исходных данных и центров кластеров.

3. Кластеризация данных с использованием СОК.

4. Определение функций принадлежности полного координатного пространства интерполируемой поверхности на основе результатов кластеризации СОК.

5. Нормализация полученных функций принадлежности полного координатного пространства.

6. Вычисление выхода нечеткой модели (интерполируемой поверхности) y по формуле (2).

Экспериментальные результаты были получены на модельных и реальных данных. В экспериментах использовался параметр фаззификации $m=2$, пороговое значение $\varepsilon=10^{-5}$ СОК, архитектура которой выбиралась с учетом того, что на результаты существенное влияние оказывает как общее число нейронов в сети, которое ограничивает максимально возможное значение кластеров, так и число нейронов n_x , n_y по осям x и y , соответственно.

На рис. 1 а изображен модельный набор неравномерно распределенных трехмерных данных, состоящий из 40 точек, принадлежащих двум объектам (выбор точек осуществлялся случайным образом) и расположение проекции центров кластеров, получаемых различными методами нечеткой кластеризации, на плоскость XoY . В табл. 1

приведены значения для центроидов и функции принадлежности одной из точек, расположенной в пограничной для двух объектов области.

Часто вычислительные ограничения не позволяют проанализировать все возможные декомпозиции данных, n объектов на s групп, и оценить их влияние на конечную ошибку, поэтому важным является выбор алгоритма или группы алгоритмов, наиболее подходящих для решения конкретной задачи.

Проведенные эксперименты по интерполяции пространственных данных показали, что на точность нечеткой модели в случае, когда экспериментальная выборка имеет небольшие размеры (1-5%), распределена случайным образом и расстояние между отдельными измерениями существенно различаются и также имеются внутренние области, не покрытые ими, большее влияние оказывает не метод кластеризации, а способ формирования функции принадлежности.

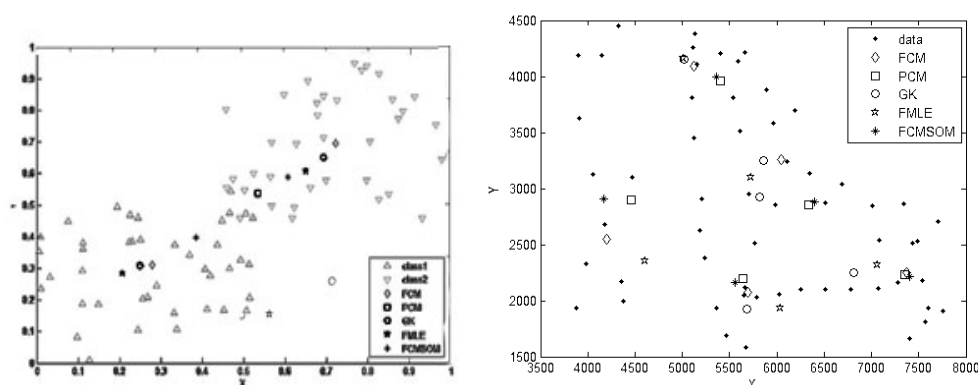


Рисунок 1 - Расположение центров кластеров при использовании различных методов кластеризации

Использование экспоненциальных функций принадлежности в соответствии с выражением (1) является источником систематической ошибки,

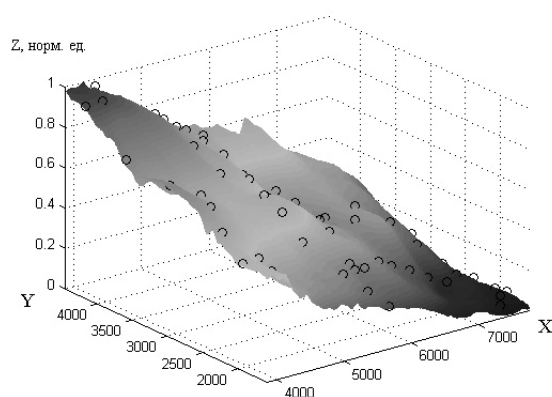
поскольку они имеют локальные экстремумы, находящихся на значительном расстоянии от центров кластеров, что противоречит первому закону географии.

Центры кластеров и функция принадлежности «проблемной» точки

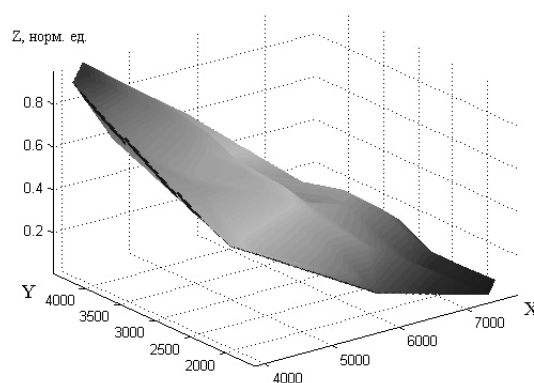
	(0,4902;0,4574;0,3470)		center1			center2		
метод	class1	class2	x	y	z	X	y	z
FCM	0,4454	0,5970	0,2784	0,3100	0,6404	0,7219	0,6957	0,4563
PCM	0,5960	0,8737	0,5333	0,5379	0,5341	0,5331	0,5379	0,5341
GK	0,8191	0,3140	0,2489		0,5478	0,6923	0,6498	0,5478
FMLE	0,2630	2,6059e-05	0,2069	0,2830	0,5238	0,6498	0,6080	0,5547
FCM-SOM	0,4197	0,6231	0,3845	0,3965	0,5949	0,6065	0,5898	0,5025

Этот недостаток устраняется при использовании метода нечеткого проецирования кластеров на основе FCM-SOM.

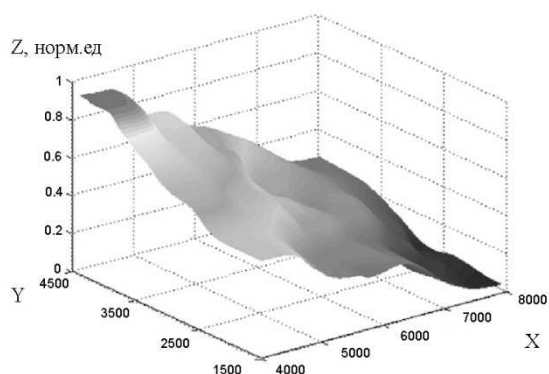
На рис. 2 а представлено изображение гравитационного поля участка поверхности Земли.



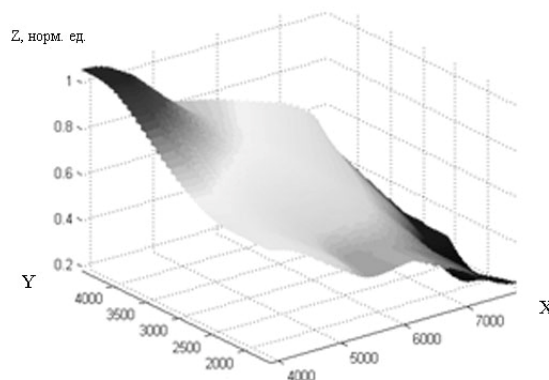
а



б



в



г

Рисунок 2 -Интерполяция геофизического поля (а); б – триангуляция Делоне; в, г – метод двумерного проецирования нечетких кластеров с использованием методов FCM и FCM-SOM, соответственно

В качестве исходных для интерполяции данных использовались значения Z , определенные для точек, изображенных на рис. 2 а, координаты (x, y) которых, соответствуют 57 реальным разведочным скважинам. Интерполяция осуществлялась при использовании различных методов кластеризации и способах построения функций принадлежности.

Выводы.

1. Точность моделирования реальных систем на основе экспериментальных данных существенно зависит от их пространственного распределения, при этом единственным способом оценки правдоподобности процедуры восстановления является эмпирическое тестирование модели.

2. При малом значении экспериментальных данных, распределение которых носит характер, близкий к случайному, и значительном увеличении расстояния между ними, влияние метода нечеткой кластеризации на глобальные характеристики поверхности решения уменьшается. Большее значение имеет выбор вида функции принадлежности, на основе которых производится расчет выхода модели.

3. Описанный подход применим для прогнозирования значений любых пространственных данных, и имеет значительный потенциал для дальнейшего развития.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Пегат. Нечеткое моделирование и управление. – М.: «Бином». 2009, 798 с.
2. Л.Г. Ахметшина., Т.С. Ямнич. Интерполяция пространственных данных методом двумерного проецирования нечетких кластеров // Искусственный интеллект, –2010. № 3. – С. – 433 –438.
3. Л.Рутковский. Методы и технологии искусственного интеллекта. – М.: «Горячая линия-телеком». 2010, 520 с.
4. Ахметшина Л.Г. Многопараметровый анализ изображений геофизических полей на основе комбинации алгоритмов нечеткой сегментации и нейронной сети Кохонена / Ахметшина Л.Г. // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2004. – № 10. – С. 44-47.

В.В. Крохин, Н.О. Кузьменко

АВТОМАТИЗАЦИЯ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ

Аннотация. Проведен анализ эффективности выбора оптимальной модели множественной линейной регрессии (МЛР) различными методами. Исследование проводилось с помощью метода имитационного моделирования. Были проанализированы пять методов выбора оптимальной МЛР. Анализ проводился с помощью специально разработанного программного обеспечения с использованием MATLAB.

Ключевые слова: автоматизация, оптимальная модель, множественная линейная регрессия, критерий оптимальности, имитационное моделирование, распараллеливание вычислительных процессов.

Введение. Выбор оптимальной модели регрессии базируется, прежде всего, на понимании исследователем механизмов порождающих имеющиеся данные, т.е. на использовании априорной информации. Вместе с тем можно сформулировать ряд критериев, позволяющих выбирать оптимальную модель, если класс, к которому принадлежит правильная модель, определяется основными принципами, которые нужно учитывать при выборе модели.

Под выбором оптимальной модели подразумевается, как это принято в регрессионном анализе, определение подмножества регрессоров из совокупности всех возможных независимых переменных, которое наилучшим образом «объясняет» наблюдаемые значения зависимой переменной.

Постановка задачи. В данной статье рассматривается ряд критериев, позволяющих выбрать оптимальную модель регрессии в классе линейных по параметрам моделей, а также проводится сравнительный анализ качества этих критериев путём имитационного моделирования. С целью автоматизации выбора оптимальной модели МЛР в среде МАТЛАБ был разработан программный продукт.

Решение задачи. Модель линейной регрессии (МЛР) многих переменных представляется следующим образом:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_k X_{ki} + U_i, \quad i=1,2,\dots,n, \quad (1)$$

где i обозначает номер наблюдения; $X_{ji}, j=1,\dots,k$ - независимые (объясняющие, экзогенные, предикторные) переменные или регрессоры; Y - зависимая (объясняемая, эндогенная) переменная; U - возмущение (ошибка модели); n - объём выборки.

Модель (1) удобно записывать в матричной форме:

$$Y = X\beta + U, \quad (2)$$

где Y - наблюдаемый $[n \times 1]$ вектор значений зависимой переменной; X - $[n \times (k+1)]$ матрица, в которой первый столбец состоит из единиц, а остальные столбцы представляют наблюдаемые значения зависимых переменных; β является неизвестным $[(k+1) \times 1]$ вектором параметров (коэффициентов) модели и U является ненаблюдаемым $[n \times 1]$ вектором возмущений (ошибок модели).

В данной работе считается, что модель регрессии удовлетворяет условиям Гаусса – Маркова [1,4], а ошибки модели имеют нормальное распределение.

Обозначим через $\hat{\beta}$ оценки β , полученные по выборке. Тогда мы можем оценить ошибки модели u следующим образом:

$$\hat{U}_i = Y_i - \hat{Y}_i = Y_i - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 X_{1i} - \hat{\beta}_2 X_{2i} - \dots - \hat{\beta}_k X_{ki}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (3)$$

Величины $\hat{U}_i$ называются выборочными ошибками или остатками. Чем меньше будут выборочные ошибки, тем большая часть изменения зависимой переменной Y обуславливается изменениями в независимых переменных. В матричных обозначениях формула (3) может быть записана в виде:

$$\hat{U} = Y - X\hat{\beta}. \quad (4)$$

Величины

$$\hat{Y}_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_{1i} + \hat{\beta}_2 X_{2i} + \dots + \hat{\beta}_k X_{ki}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

являются оценками значений зависимой переменной Y , полученными с помощью регрессионной модели.

При выборе оптимальной МЛР важную роль играет сумма квадратов остатков (СКО)

$$\sum_{i=1}^n \hat{U}_i^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (6)$$

Интуитивно ясно, что чем лучше МЛР описывает исследуемый процесс, тем меньше должна быть СКО.

Под выбором оптимальной модели мы понимаем следующую задачу.

Предположим, что имеется m переменных X , которые, возможно, влияют на переменную Y .

Требуется из этого множества выбрать подмножество, содержащее k переменных, которые наилучшим образом объясняют наблюдаемые значения зависимой переменной Y .

Сокращение числа независимых переменных позволяет не только уменьшить размерность модели, но и избежать эффектов связанных, например, с мультиколлинеарностью. Поэтому ухудшение качества используемой модели происходит как при исключении из неё существенной независимой переменной, так и при включении избыточных переменных. [4]

Были проанализированы 5 различных методов для определения оптимальной МЛР:

- *метод всех возможных регрессий с исправленным коэффициентом детерминации в качестве критерия оптимальности (MR2); [1,4]*

- *метод всех возможных регрессий с исправленным коэффициентом детерминации в качестве критерия оптимальности и оценкой значимости коэффициентов МЛР (на основе t -статистики) (MR2t);*

- *метод всех возможных регрессий с использованием статистики Маллоуза в качестве критерия оптимальности (Mlz); [3,4]*

- *метод последовательного исключения (BWE) [2,4];*

- *пошаговый метод (SWP) [2,4] .*

Метод всех возможных регрессий. Перебираются все возможные модели первого порядка, и определяется наилучшая модель среди них, затем перебираются все возможные модели второго порядка и выбирается наилучшая из них и так далее, вплоть до МЛР порядка m . Определяется наилучшая модель среди всех возможных. Этот метод требует построения каждого из всех возможных регрессионных

уравнений. Если общее количество независимых переменных m , то, поскольку для каждой переменной X есть всего две возможности: либо входить, либо не входить в уравнение, всего нужно проанализировать 2^m уравнений МЛР. Для выбора оптимальной МЛР применялись:

1) Критерий минимума исправленного коэффициента детерминации.

Исправленный коэффициент детерминации рассчитывается следующим образом [1]:

$$\tilde{R}^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{n-1}{n-k}, \quad (7)$$

где n - объём выборки, k - число независимых переменных, включённых в МЛР,

а R^2 обозначает коэффициент детерминации [1]:

$$R^2 = \frac{\hat{\beta}' X' Y - n \bar{Y}^2}{Y' Y - n \bar{Y}^2}. \quad (8)$$

В последней формуле:

$\hat{\beta}$ - $[(k+1) \times 1]$ вектор рассчитанных оценок параметров МЛР,

X - $[(n \times m)]$ матрица наблюдаемых значений независимых переменных,

Y - $[n \times 1]$ вектор зависимых переменных (чёрточка сверху обозначает, как обычно, среднее арифметическое, а штрих – операцию транспонирования).

2) Нами исследовался также алгоритм, в котором критерий минимума исправленного коэффициента детерминации был дополнен проверкой значимости оценок коэффициентов регрессии модели, выбранной в качестве оптимальной. Если некоторые из оценок коэффициентов оказываются незначимыми, то выбранная модель усекается путем отбрасывания членов с незначимыми коэффициентами. Значимость оценок проверялась с помощью t – статистики

$$t = \frac{\hat{\beta}_l}{\hat{\sigma}_{\hat{\beta}_l}}, \quad l = 1, \dots, k \quad (9)$$

где $\hat{\sigma}_{\hat{\beta}_l}$ - обозначение выборочной дисперсии оценок $\hat{\beta}_l$, $l = 1, 2, \dots, k$.

Так как статистика t имеет распределение Стьюдента в случае, когда ошибки МЛР распределены нормально, то оценка коэффициента $\hat{\beta}_l$ не считается значимой, если

$$|t_j| \leq t_{\alpha/2}, \quad (10)$$

где $t_{\alpha/2}$ - критическая точка распределения Стьюдента для заданного уровня значимости α .

3) Критерий минимума статистики Маллоуза.

Статистика Маллоуза C_p вычисляется по формуле [2,4]:

$$C_p = ns_k^2 / s_m^2 - (n - 2(k + 1)), \quad (11)$$

где s_k^2 - СКО полученная для модели, содержащей k регрессоров и s_m^2 - СКО, полученная для модели, включающей все возможные m регрессоров.

Метод последовательного исключения (BACKWARD ELIMINATION). Метод последовательного исключения более экономичный, чем метод всех регрессий, поскольку в нем делается попытка исследовать только лучшие регрессионные уравнения, содержащие определенное число переменных. Основные шаги этого метода сводятся к следующему:

1. Рассчитывается регрессионное уравнение, включающее все переменные.

2. Вычисляется величина частного F-критерия [1]:

$$F(1, v, 1 - \alpha) = \left\{ t(v, 1 - \frac{\alpha}{2}) \right\}^2, \quad (12)$$

имеющего распределение Фишера. Для каждой предикторной переменной, в предположении, так как будто она была последней переменной, введенной в регрессионное уравнение. (В формуле (12) t - значение t -статистики, v - число степеней свободы, α - уровень значимости.)

3. Наименьшая величина частного F-критерия F_j , сравнивается с заранее выбранным критическим значением, например F_0 .

а) Если $F_j < F_0$, то переменная X_j , которая обеспечила достижение уровня F_j , исключается из рассмотрения и производится перерасчет уравнения регрессии с учетом переменных, оставшиеся, переходим к пункту а).

б) Если $F_j > F_0$, то регрессионное уравнение оставляют таким, как оно было рассчитано.

Пошаговый метод (STEPWISE PROCEDURE). Этот метод также относится к быстрым методам. Вначале в оптимальную модель не входит ни одна независимая переменная.

1. Находим, какая из независимых переменных X_j , $j=1, 2, \dots, m$ сильнее всего коррелирует с переменной Y . Добавляем эту независимую переменную в оптимальную модель.

2. Проверяем значимость коэффициентов независимых переменных, вошедших в модель. Удаляем переменные, имеющие незначимые коэффициенты.

3. Если остались еще нерассмотренные независимые переменные, переходим к пункту 1.

Исследование эффективности различных методов выбора оптимальной модели МЛР. Данное исследование проводилось с помощью имитационного моделирования.

На ЭВМ моделировалось m случайных последовательностей, которые использовались в качестве значений независимых переменных. Из них выбирались k последовательностей в качестве значений переменных участвующих в построении МЛР (1). Затем предполагалось, что неизвестно какие и сколько из m независимых переменных входят в истинную модель. Таким образом, поиск модели осуществлялся с использованием всех возможных независимых переменных с применением каждого из 5 описанных выше критериев оптимальности. Для выяснения качества каждого из рассмотренных методов оптимизации проводились численные эксперименты, в которых поиск оптимальной модели производился многократно по статистически независимым данным. А именно, генерировались N (число экспериментов) наборов из m последовательностей, каждая из которых содержала по n (объём выборки) данных. В каждом из N экспериментов определялась наилучшая модель на основе перечисленных выше пяти критериев. Так как истинная МЛР заранее известна, описанная методика позволяет оценить процент правильных идентификаций каждым из исследуемых методов. Эта оценка будет достаточно надёжной, если N достаточно велико. Для проведения численных экспериментов нами было разработано в среде МАТЛАБ соответствующее программное обеспечение.

В таблице 1 приведены результаты описанных выше численных экспериментов, полученные при $N = 1000$ и $n = 100$.

Приведенные данные показывают, что среди методов, основанных на переборе всех моделей, наилучшие результаты даёт процедура, основанная на критерии Маллоуза. Этот критерий для всех рассмотренных случаев даёт 100% правильных идентификаций истинной модели.

Широко используемый в практике регрессионного анализа исправленный коэффициент детерминации, даже дополненный проверкой значимости оценок коэффициентов модели, дает удовлетворительные результаты только при небольшом количестве возможных регрессоров (порядка 5-7). Общим недостатком этой группы методов является быстрое увеличение количества возможных моделей при увеличении числа возможных регрессоров m . (напомним, что количество всех возможных МЛР составляет 2^m). Поэтому при $m > 15$ перебор всех возможных регрессий становится невозможным.

На основе данных таблицы № 1 построены графики, показанные на рисунке 1.

Таблица 1

Процент совпадения правильных идентификаций моделей для разных методов поиска МЛР в зависимости от параметров m , при значении $N = 1000$ и при использовании двоих процессорных ядер

k	m	Метод поиска оптимальной модели				
		<i>MR2</i>	<i>MR2t</i>	<i>Mlz</i>	<i>BWI</i>	<i>SWP</i>
2	3	67.6	97.9	100	98.8	97.9
3	4	68.3	97.4	100	99	97.40
5	5	100	100	100	100	99.7
5	6	68.1	97.7	100	98.6	97.7
5	7	45.9	87	100	98.1	96.5
5	8	31.3	71.6	100	96.7	94.2
5	9	20.6	58.4	100	95.5	93
5	10	13.5	43.7	100	94.3	91.4
5	11	8.30	31.9	100	93	89.9
5	12	6.5	27.1	100	91.7	88.4
5	13	4.50	18.9	100	90.7	86.7
5	14	3	14.2	100	89.8	85.7
5	15	-	-	-	88.4	83
5	16	-	-	-	87.2	81.6

5	20	-	-	-	83.2	77.4
5	30	-	-	-	71.4	67.7
5	40	-	-	-	61.7	58.8
5	50	-	-	-	52.4	52.4
5	70	-	-	-	38.2	40.7

Широко используемый в практике регрессионного анализа исправленный коэффициент детерминации, даже дополненный проверкой значимости оценок коэффициентов модели, дает удовлетворительные результаты только при небольшом количестве возможных регрессоров (порядка 5-7). Общим недостатком этой группы методов является быстрое увеличение количества возможных моделей при увеличении числа возможных регрессоров m . (напомним, что количество всех возможных МЛР составляет 2^m). Поэтому при $m > 15$ перебор всех возможных регрессий становится невозможным.

Также было проведено исследование быстродействия изучаемых алгоритмов идентификации оптимальной МЛР.

Разработанный программный продукт с целью ускорения вычислений программно распределяет задачи на все физические процессорные ядра, то есть создает столько независимых параллельно работающих потоков выполнения, сколько процессорных ядер на компьютере. Разработанное программное приложение прошло тестирование на ЭВМ с двумя процессорными ядрами (тестирование проводилось на компьютере с параметрами: RAM 3,25 GB, процессор Intel (R) Core (TM) 2 Duo CPU E8400@3.00 GHz, 3.00 GHz).

Данные, приведенные в таблице №2, показывают, что с помощью программного распараллеливания процессорных вычислений было достигнуто ускорение проведения расчетов приблизительно в два раза при увеличении количества процессорных ядер, задействованных в вычислениях с одного до двух.

Рисунок 2 иллюстрирует данные, приведенные в таблице № 2.

Методы всех возможных регрессий показывают низкое быстродействие, что связано с тем, что для нахождения оптимальной модели этим методам необходимо построить 2^m моделей и для каждой применить критерий оптимальности.

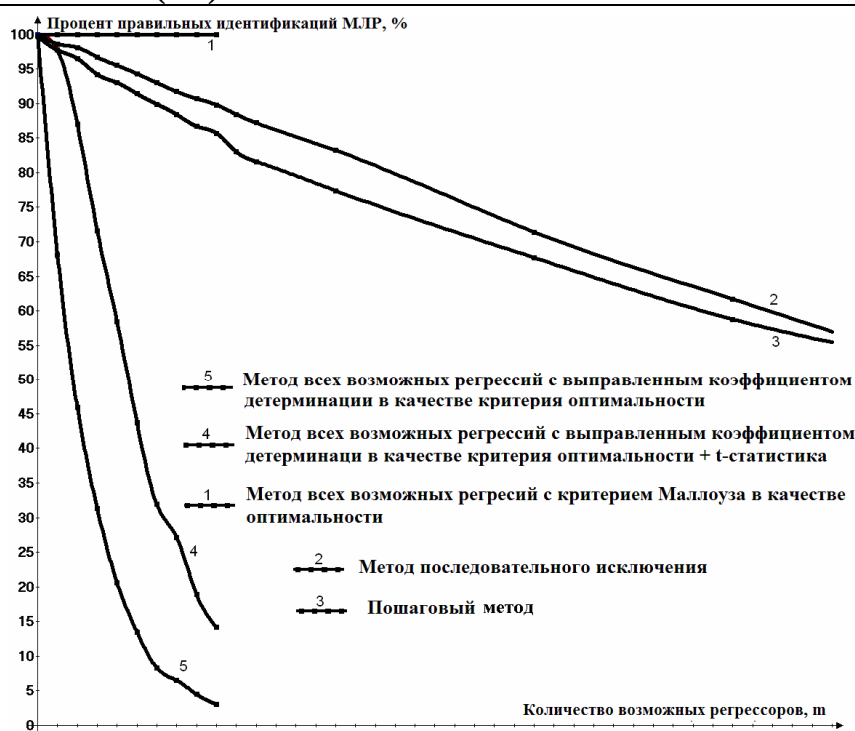


Рисунок 1 - Процент правильных идентификаций МЛР для различных методов, при фиксированном параметре $k = 5$

Таблица 2

Время выполнения вычислений (в секундах) для разных методов поиска МЛР в зависимости от параметра m при значении $n = 100$ и $N = 1000$

<i>k</i>	<i>m</i>	Количество процессорных ядер, задействованных в вычислениях									
		1					2				
		Метод проведения вычислений									
		<i>MR2</i>	<i>MR2t</i>	<i>MLz</i>	<i>BWI</i>	<i>SWP</i>	<i>MR2</i>	<i>MR2t</i>	<i>MLz</i>	<i>BWI</i>	<i>SWP</i>
2	3	1,44	1,65	0,72	0,77	2,40	0,72	0,86	0,38	0,42	1,15
3	4	2,28	2,89	1,46	0,78	2,95	1,21	1,46	0,76	0,46	1,64
5	5	4,15	4,7	2,26	0,64	4,28	2,46	2,42	1,12	0,4	2,35
5	6	7,81	9,17	3,59	0,9	5,47	4,174	4,45	1,79	0,5	2,93
5	7	15,29	15,93	6,37	1,11	6,82	8,023	8,36	3,2	0,64	3,63
5	8	29,73	30,75	12,0	1,37	8,31	15,76	15,99	6,03	0,78	4,54
5	9	59,6	61,14	23,02	1,68	9,78	31,29	30,8	11,92	0,9	5,21
5	10	119,45	122,1	45,04	1,99	11,6	62,14	61,38	23,75	1,07	6,14
5	11	242,6	287,6	90,24	2,31	13,4	122,5	127,3	45,1	1,22	7,31
5	12	490,65	493,72	186	2,65	15,5	247,4	250,3	93,2	1,39	8,18
5	13	1023,9	1002	390	3,0	17,9	509,3	512,4	186,1	1,57	9,55
5	14	2052,5	2055	787	3,39	19,9	1022,6	1027	390,1	1,76	10,64

5	15	-	-	-	3,83	22,3	-	-	-	1,97	11,62
5	16	-	-	-	4,27	24,6	-	-	-	2,19	12,81
5	20	-	-	-	6,14	36,4	-	-	-	3,35	17,6
5	30	-	-	-	13,3	70,3	-	-	-	6,75	35
5	40	-	-	-	26,4	117	-	-	-	13,15	58,4
5	50	-	-	-	40,7	191	-	-	-	17,31	85,8
5	70	-	-	-	64,3	360	-	-	-	33,73	154,6

Приведенные данные (таблица №2) показывают, что метод последовательного исключения дает наилучшие показатели быстродействия. Этот метод может быть использован для поиска оптимальной МЛР, когда количество возможных регрессоров велико ($m > 20$).

Пошаговый метод менее быстродействующий, чем метод последовательного исключения, но все же он значительно превосходит по быстродействию методы всех возможных регрессий.

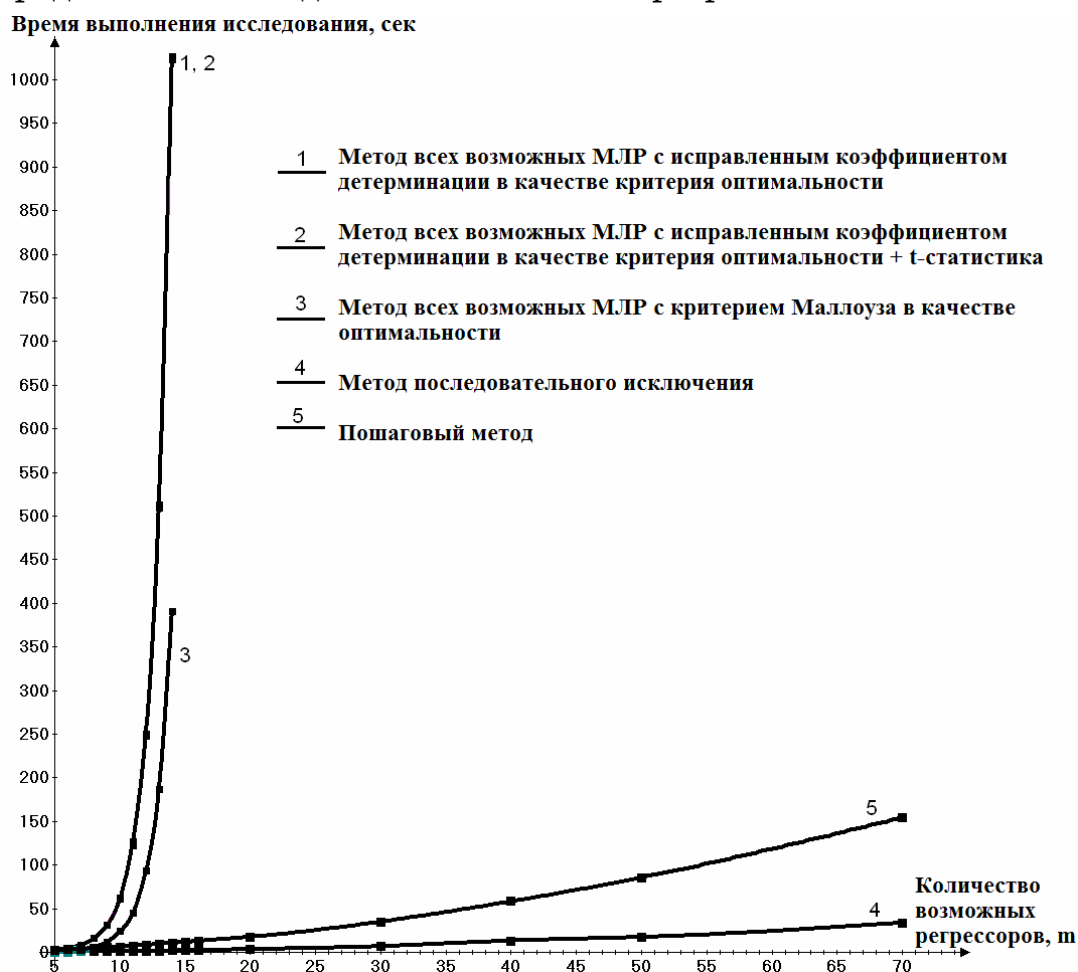


Рисунок 2 - Время выполнения вычислений разными методами в зависимости от количества возможных регрессоров m , при фиксированном параметре $k = 5$, при использовании двух ядер процессора

Выводы. Исследование представленных методов выбора оптимальной модели множественной линейной регрессии было проведено с помощью программного обеспечения разработанного в среде MATLAB.

Анализ проводился методом имитационного моделирования.

В случае, когда количество возможных независимых переменных меньше 15, метод всех возможных регрессий со статистикой Маллоуза в качестве критерия оптимальности наиболее часто выбирает в оптимальную модель те и только те независимые переменные, которые входят в истинную модель. Но методы всех возможных регрессий неприменимы в случае, если количество возможных независимых переменных более 14. В этом случае необходимо использовать быстрые методы: метод последовательного исключения и пошаговый. Оба этих метода обладают высоким быстродействием и точностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дрейпер Н., Смит Г. – Прикладной регрессионный анализ: В 2-х кн. 2/Пер. с англ. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Финансы и статистика. 1987. – 351с.
2. Green William H. Econometric Analysis. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2003.
3. Jonston J. and John DiNardo. Econometric Methods, 4th td. New York: McGraw Hill, 1997.
4. Rawlings J.O., S.G.Pantula, D.A.Dickey. Applied Regression Analysis. A Research Tool. Second edition – New York: Springer, 2001. - 671 p. - ISBN 0387984542

А.П. Пеньков, В.В.Герасимов

СИСТЕМНЫЕ АСПЕКТЫ РАЗРАБОТКИ КРИПТОСИСТЕМ

Аннотация. Рассмотрены методологические аспекты поведения разработчика и заказчика криптосистем, которые позволяют разработчику быть уверенным, инициативным, отслеживать процесс разработки, находить общий язык с заказчиком.

Ключевые слова: инженер, система, модель, триединство, информатика, разработчик, заказчик, предмет труда, средство труда.

Актуальность. Современные криптосистемы являются классом развивающихся встроенных систем в компьютерных и коммуникационных системах. Это требует подготовки соответствующих инженеров системотехников для рыночных условий.

Анализ источников. В [1] исследована методология подготовки инженеров-системотехников, их эволюции. Такой специалист является "исследователем, конструктором и администратором", должен "уметь объединить разных специалистов для совместной работы, понимать их..., быть универсалом..."

Согласно [2] разработчик и заказчик должны согласовать свои точки зрения и совместно разработать техническое задание (ТЗ) на разработку. Следует обратить внимание на специфику разработки криптосистемы.

Очевидна особенность формирования инженеров-системотехников в вузе. В [1] предлагается специально готовить универсалов. А как готовить специалистов по разработке криптосистем?

Постановка задачи. Необходимо использовать комплекс системных моделей деятельности инженера, разработать подход к проектированию криптосистем.

Решение задачи. В [3] при разработке сложных систем рекомендовано использовать "триединство информатики" (модель — алгоритм — программа), предложенное академиками А.И. Самарским и А.А. Дородницыным в качестве общей модели информатики в 1984

г. Очевиден приоритет модели и необходимость её правильного выбора. В проведенном представлении уже очевидны этапы учебный (изготовление разработчика) и проектный (разработка технической системы). Представим это в виде цепи Маркова (рис. 1):

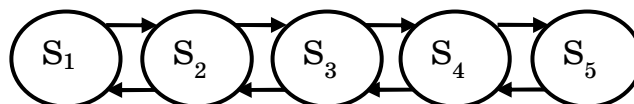


Рисунок 1 — Цепь Маркова учебного и проектного этапов

где: S_1 — первичный источник полной информации; S_2 — преобразователь сообщений от S_1 ; S_3 — потребитель сообщений от S_2 , будущий разработчик; S_4 — заказчик на разработку конкретной системы; S_5 — разработанная система.

Рассмотрим особенности $\overline{S_1, S_5}$ в применении к криптосистемам. В интернете S_1 по криптосистемам представлен описанием отдельных систем и математических моделей в объеме, не возможном для признания в качестве конкретных методических рекомендаций. Случайный авторский характер известных криптосистем зафиксирован в их названиях по фамилиям авторов. Нет обобщения опыта деятельности инженера при разработке секретной технической системы (разработка — производство — испытания — применение) с формированием необходимой секретной сопроводительной документации всех этапов в обычном и специальном виде.

На этапе S_2 источники S_1 сжаты до [4-6], где источник 4 — самая читаемая в мире книга энциклопедия по криптографии, источники 5 и 6 — учебные пособия, основанные на 4. Энциклопедический характер и объем источника 4 ухудшает её читаемость. Терминологическая неупорядоченность привела к случайному распределению конкретного материала источника 4 практического характера. Пособия 5 и 6 сокращены примерно в 5 раз по отношению к источнику 4. Но, как и в источнике 4, в последних используется жаргон, терминологическая неточность (на одном уровне используются понятия "алгоритм", "криптосистема" и т.д.).

Очевидно, что использование методического обеспечения S_2 для S_3 приведет к профессиональной неопределенности практической разработки, к трудностям отношений с разработчиком S_3 . Необходимо предложить общую модель мышления для S_3 и S_4 . Такая модель получена одним из авторов в 1984 г. для проектной модели дисплея и в

1999 г. обнаружена в [7] в качестве системы охраны труда $S_{тр}$. Эта модель $S_{тр}$ использована для построения обобщенной системы труда "шифрования — передачи — дешифрования" $S_{ш/дш}$ (рис. 2) и проверена на методах шифрования с закрытым ключом (см. примеры).

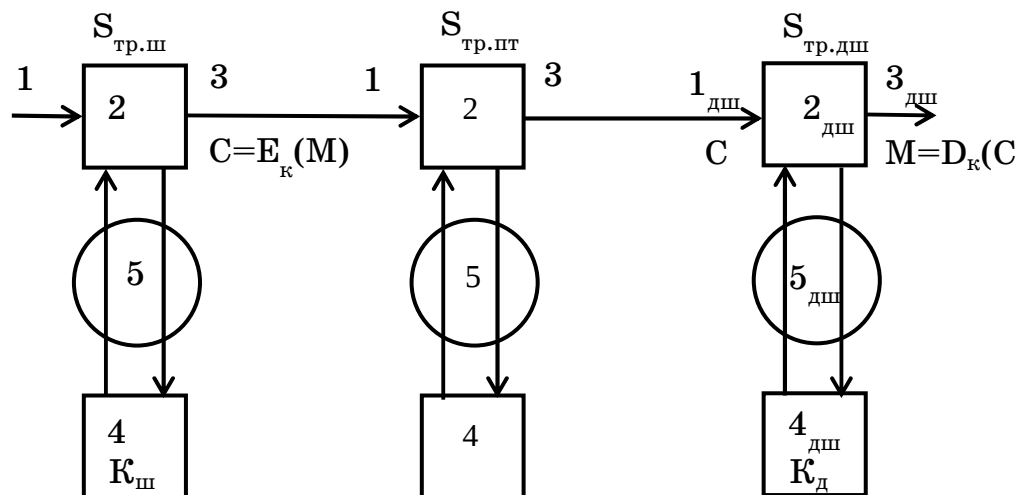


Рисунок 2 — Структурно-функциональная модель формирования и обработки секретных сообщений

На рис. 2 использованы следующие обозначения: $1_{ш}$ — исходный текст, документ; $2_{ш}$ — обрабатываемый текст; $3_{ш}$ — зашифрованный текст, шифротекст; $4_{ш}$ — средства шифрования; $5_{ш}$ — алгоритм шифрации; $1_{дш} \equiv 3$; $2_{дш}$ — обрабатываемый исходный текст; $3_{дш} \equiv 1_{ш}$; $4_{дш}$ — средства дешифрации; $5_{дш}$ — алгоритм дешифрации; $1 \equiv 3_{ш}$, исходное сообщение на входе линии связи; 2 — сообщение на линии связи с шумами; 3 — очищенное от шумов сообщение; 4 — средства борьбы с шумами; 5 — алгоритм очищения от шумов; C — шифротекст; M — открытый текст; E — функция шифрования; D — функция дешифрования; $K_{ш}$ — ключ шифрования; $K_{дш}$ — ключ дешифрования.

Элементы $S_{ш/дш}$:

- подсистема $1 \equiv M = \sum i_M = \sum i_1$, где i_M, i_1 — знак исходного документа;
- подсистема $2 \equiv \sum i_2 = \sum i_1^i$, где i_1^i — текущее значение i_1 ;
- подсистема $3 \equiv C = \sum i_C = \sum i_3 = \sum i_1^i$, где i_3, i_C — знаки шифротекста, i_1^i — выбранные текущие элементы средства 4;
- подсистема $4 \equiv \sum i_4$, где i_4 — знаковые элементы;
- подсистема 5 — алгоритм шифрования/дешифрования.

Общий алгоритм создания криптосистемы $S_{ш/дш}$:

1. Признать деятельность по структурно-функциональной модели $S_{ш/дш}$.

2. Обратить внимание на цели и связи элементов $S_{ш/дш}$.

3. Построить модель 2 текстового сообщения 1.

4. Построить модель средства шифрования 4.

5. Построить модель получения элементов 3.

6. Реализовать преобразование.

На текущий момент существуют такие известные методы шифрования с закрытым ключом:

1. Методы замены (подстановки): одноалфавитная, многоалфавитная.

2. Методы перестановки: простая (с фиксированным периодом), табличная, усложненная по маршрутам.

3. Комбинированные методы: блочные шифры, поточные шифры.

4. Другие методы: смысловые, сжатие/расширение.

Рассмотрим алгоритм одноалфавитной подстановки на примере шифра Цезаря. Шаги 1, 2 общего алгоритма шифрования сохраняются. Каждая буква сообщения заменяется на знак алфавита, который от соответствующего знака сообщения отстоит (сдвинут) на n позиций дальше. Например, сообщение (1) — "замена". Его модель (2):

Подсистема (4) — русский алфавит. Его модель

$$\frac{\text{абвгдеёжзийклмнопрстуфхцчшщъыьэюя}}{123456789012345678901234567890123} = i_4|_{1...32}.$$

Модель получения элементов шифротекста i_3 (шифрования):

$$i_3|_{1...6} \equiv (i_1|_{1...6} = i_4|_{1...6} / "+" "-" n_{1...32}),$$

где n_{var} — задаваемая связь $i_1|_j c i_3|_j$, может быть признана "секретным ключом".

Пусть $n=3$. Тогда $i_2|_1 = з * \frac{ийк}{123} \rightarrow к$; $i_2|_2 = а * \frac{бвг}{123} \rightarrow г$;
 $i_2|_3 = м * \frac{ноп}{123} \rightarrow п$; $i_2|_4 = е * \frac{ёжз}{123} \rightarrow з$; $i_2|_5 = н * \frac{опр}{123} \rightarrow р$; . Шифротекст $S=(3) = "кгпзрг"$. При расшифровке вместо "+ n " в примере используется "- n " (-3).

Далее рассмотрим пример одноалфавитной подстановки с использованием таблиц замены. Шаги 1 и 2 общего алгоритма $S_{ш/дш}$ сохраняются. Исходное сообщение (3) не меняется. Средством шифрования (4) является таблица строчного соответствия элементов i_1 алфа-

вита исходного текста (1) и элементов i_3 алфавитов шифров $1_{ш} \cup 2_{ш}$, являющаяся закрытым ключом. Это можно представить моделью, представленной в табл. 1.

Дешифрация осуществляется по модели шифрации в обратном порядке.

Криптоаналитики используют статистические закономерности естественных языков в исходных текстах (1) (частоты встречаемости символов, их сочетания и т.д.). Эти характеристики маскируются применением сжатия открытого текста компьютерными программами-архиваторами.

Таблица 1

Связь i_1 с i_3 по строкам

Таблица алфавита (1)	Таблица 1 алфавита (3), буквенный шифр 1	Таблица 2 алфавита (3), знаковый шифр 1
А	В	^
Б	И	@
В	О	)
Г	А	+
Д	Щ	<
Е	П	>
...	...	...

Выводы. Представленные системные модели деятельности разработчика криптосистем позволяют ему быть уверенным, инициативным, отслеживать процесс разработки, достигнуть общего языка мышления с заказчиком, сделать его соавтором разработки, заставить его уточнить понимание требований заказчика к разработке, её оптимизации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горохов В. Г. Методологический анализ системотехники. — М.: Радио и связь, 1982. — 240 с.
2. Захаров В. Н., Поспелов Д. А., Хазацкий В. Е. Системы управления. Задание. Проектирование. Реализация. — М.: Энергия, 1977. — 424 с.
3. Краснощеков П. С., Петров А. А., Федоров В. В. Информатика и проектирование. — М.: Знание, 1986. — 48 с.
4. Шнайер Б. Прикладная криптография. Протоколы, алгоритмы, исходные тексты на языке Си. — М.: ТРИУМФ, 2002. — 816 с.
5. Емец В., Мельник А., Попович Р. Сучасна криптографія. Основні поняття. — Львів, Бак, 2003. — 44 с.
6. Басалова Г. В. Основы криптографии. Уч. пособие. — Тула: Тульский госуниверситет, 2009. — 145 с.
7. Мардахаев А. А. Охрана труда. История, теория, практика. — Львов: "Вища школа", 1984. — 240 с.

О.В. Сопільник, С.А. Чернова

МОДЕЛЮВАННЯ КОМПОЗИЦІЙ ЗАКОНІВ РОЗПОДІЛУ ВИПАДКОВИХ ЧИСЕЛ

Анотація. Розроблено програмне забезпечення, створено інтерфейс генераторів випадкових чисел та проведено імітаційне моделювання композицій різних законів розподілу із застосуванням елементів програмного середовища MatLab. Результатом роботи є автономний програмний продукт, який дозволяє сформувати будь-яку композицію законів розподілу із заданими числовими параметрами.

Ключові слова: генератор випадкових чисел, нормальний закон, композиція законів розподілу, функція розподілу, гістограма, MatLab, алгоритм, М-файли, щільність розподілу, математичне очікування, дисперсія.

Вступ. При проведенні вимірювань різного роду у виробничих умовах, зокрема неруйнівного контролю якості продукції, прогнозуванні надійності роботи виробів, необхідно враховувати комплексний вплив випадкових факторів різної фізичної природи, з різними законами розподілу для забезпечення необхідної точності та валідності результатів[1]. Зокрема, йдеться про контроль поверхневих та підповерхневих дефектів в умовах суттєвої шорсткості поверхні виробу, випадкової зміни відстані між давачем та поверхнею, що контролюється тощо. При цьому спектр інформаційного сигналу може несуттєво відрізнятися від фонового шуму.

Інша проблема – забезпечення надійності роботи комп'ютерних мереж в умовах одночасного впливу внутрішніх та зовнішніх завад випадкового характеру. В цих та інших випадках корисним може бути застосування методів імітаційного моделювання випадкових процесів, які відповідають найбільш поширеним на практиці законам розподілу та їх композицій.

Постанова задачі. Метою даної роботи є розробка автономного програмного продукту для реалізації за допомогою генераторів випадкових чисел поширених на практиці законів розподілу з можливістю їх довільної композиції. Цей продукт повинен забезпечувати візуалізацію результатів моделювання у вигляді гістограм та таблиць даних. Для реалізації цієї задачі необхідно на основі бібліотек прикладного пакету MatLab створити:

- власну бібліотеку для роботи з генераторами;
- програмне забезпечення для створення композицій різних законів розподілу;
- програмне забезпечення для візуалізації результатів моделювання.

Рішення задачі. Генератор псевдовипадкових чисел (Pseudorandom Number Generator) – алгоритм, що генерує послідовність чисел у обраному діапазоні, які майже не залежні одне від одного і відповідають обраному розподілу. Для створення таких генераторів використані можливості прикладного пакету MatLab і його розширення Statistics Toolbox з можливостями візуалізації двовірних і тривірних даних[2,3]. Була обрана, наприклад, функція розподілу NORMRND.

Синтаксис: $R = \text{normrnd}(MU, SIGMA, m, n)$.

Опис. Наприклад, $>> R = \text{normrnd}(MU, SIGMA, m, n)$ – функція, яка призначена для генерації матриці псевдовипадкових чисел за нормальним законом розподілу розміром 4×4 для кожної пари параметрів MU (математичне очікування) та SIGMA (середнє квадратичне відхилення). Розмірність векторів або матриць параметрів MU та SIGMA повинна бути однаковою. Розмірність матриці R повинна дорівнювати розмірності вхідних параметрів. Тоді процес генерації матриці випадкових чисел буде мати вигляд:

```
>> MU = 0;
>> SIGMA = 1;
>> m = 4; n = 4;
>> R = normrnd(MU, SIGMA, m, n).
R = - 0.2953 -1.0239 -1.7813 0.1668
      -0.0986 -0.0678 -0.6604 -1.7052
      0.1764 0.0818 1.3514 0.2765
      -1.8379 -1.7670 2.1364 0.3945
```

Графічна оцінка якості генератору наведена на рис. 1.:

```
>>MU = 0;
>>SIGMA = 1;
>>N =9;
>>R = normrnd(MU, SIGMA[1, 100]);
>>hist (R, N);
>>grid on;
>>X = min(R):(max(R)-min(R)/100:max(R);
>>f = normpdf(X, MU, SIGMA);
>>ff = f*100*((max(R)-min(R))/N);
>>hold on
>>plot(X, ff, 'r')
>>hold off
```

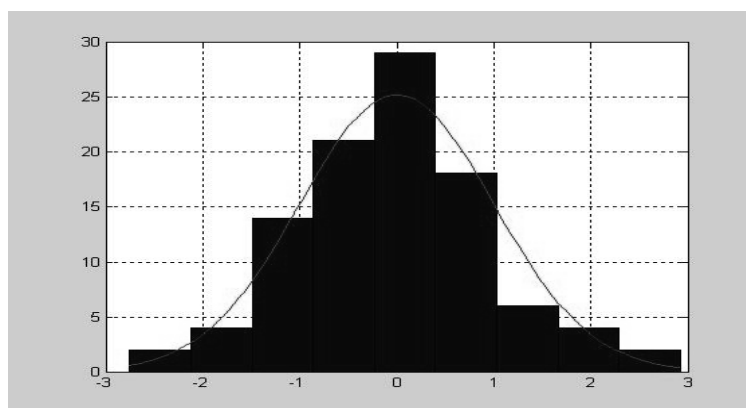


Рисунок 1 - Гістограма та графік ідеального нормального закону розподілу

Аналогічним чином реалізовані генератори випадкових чисел, які формують інші поширені на практиці розподіли: експоненційний, трикутний (закон Сімпсона), релеєвський, логарифмічний, рівномірний, логнормальний тощо, які зберігаються у матриці [4].

Для формування композицій законів створений програмний перемикач, що містить два генератори випадкових чисел із можливістю завдання необхідних розподілів та формує умови заповнення масиву даними. З цією метою застосовані стандартні функції MatLab, наприклад:

`o = normrnd(MU, SIGMA, [1, N]` – заповнення масиву даними, які відповідають нормальному розподілу;

`o = unifrnd (A, B, [1, N]` – заповнення масиву даними, які розподілені за рівномірним законом тощо [5].

Тепер сгенеровані масиви даних можна об'єднати у композицію за допомогою операцій додавання або множення:

```
if get(handles.radiobutton1, 'Value')
```

```
Result = (o. + t); % додавання
```

```
else
```

```
Result = (o.*t); % множення
```

```
End
```

Оцінку якості генерації отриманих композицій проведено за допомогою гістограм, для чого розроблений інтерфейс користувача з двома вікнами для

законів розподілу (рис. 2). Також передбачені поля для вводу необхідних параметрів: кількість елементів, кількість інтервалів, вхідні дані: математичне очікування, середнє квадратичне відхилення, тощо. Задані також поля для виводу числових даних композиції 1, та її гістограми 2. Для обрання операції, за допомогою якої буде сформована композиція, введені відповідні кнопки. Створений продукт можна зберегти у файл за допомогою кнопки "Зберегти у файл".

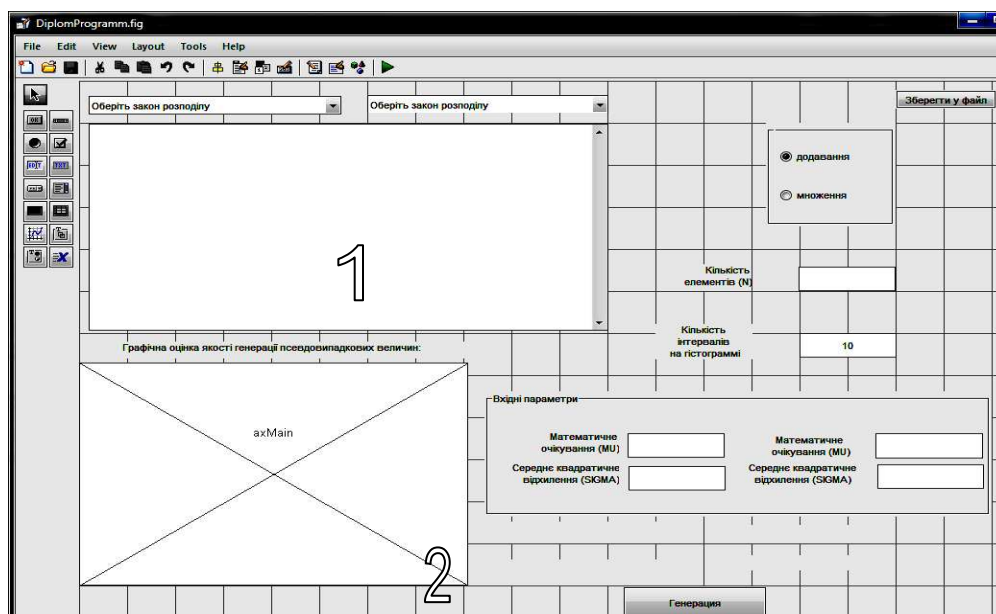


Рисунок 2 - Вікна для завдання параметрів вхідних законів розподілу

На рис. 3 наведений приклад отриманої композиції нормально-го та рівномірного закону розподілів із введеними параметрами. Отримані числові дані, які ілюстровані відповідною гістограмою.

Для встановлення розробленого програмного продукту необхідно виконати декілька простих операцій:

- запустити MCRInstaller.exe для встановлення бібліотек, необхідних для роботи додатку без використання повної версії MatLab. Бібліотека MCR встановлюється один раз і використовується усіма встановленими компонентами, створеними компілятором MatLab [6];

- розпакувати інсталяційний пакет зі створеним продуктом (Magic Example pkg.exe) у обраний каталог;

- встановити архів STF. Він містить необхідні функції, m – файли і MEX – файли. Архів автоматично розгортається, коли запускається додаток.

Після виконання цих пунктів програма готова до виконання і можна запускати опцію Generators.exe. Після генерації отримані числові дані доцільно зберегти у вигляді текстового файлу, для чого пропонується обрати відповідний каталог.

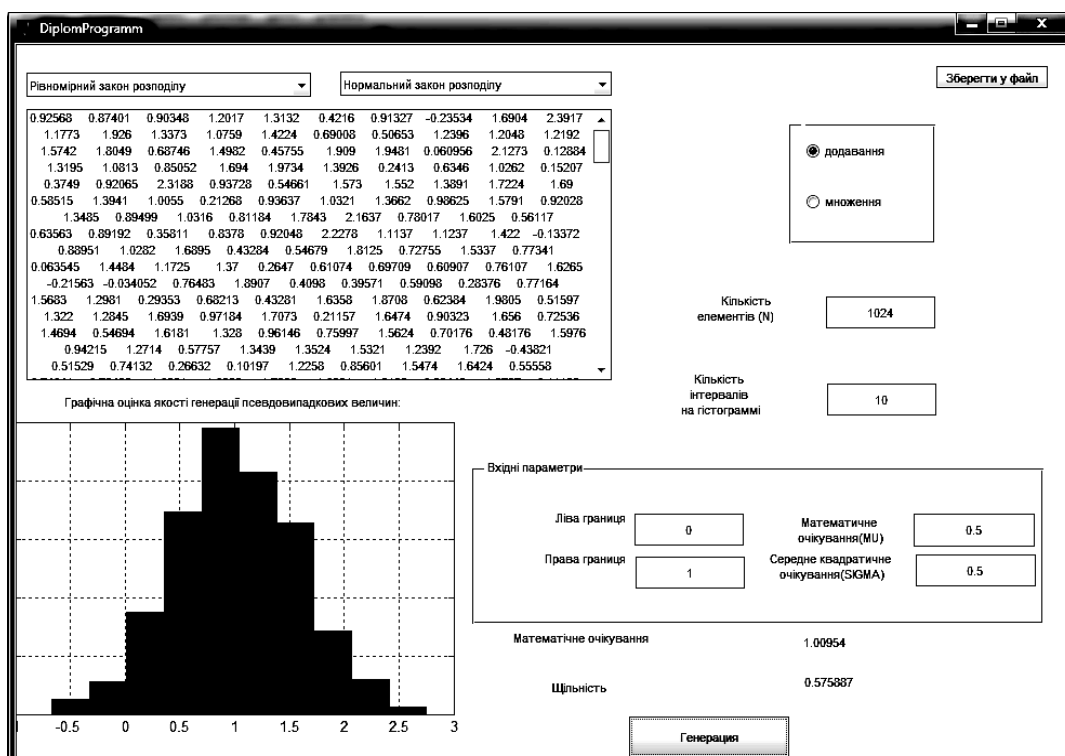


Рисунок 3 - Приклад адитивної композиції двох законів розподілу

Висновки

1. Створено додаток, який дозволяє формувати як окремі випадкові числа із різними законами розподілу, так і довільні композиції випадкових чисел із різними заданими числовими характеристиками.

2. Програмний продукт, створений на основі прикладного пакету MatLab з використанням відповідних бібліотек, має функціонально закінчений вигляд, застосовується автономно, у вигляді окремого виконавчого файлу і потребує близько 200 Мб пам'яті, що суттєво менше, ніж при встановленні повної версії MatLab.

ЛІТЕРАТУРА

1. Справочник по надежности. [Текст]/. - Перевод с англ. Ю.Г. Епишина, Б.А. Смиренина.- п/ред.Б.Р. Левина. – М.: "Мир", т.1, 1969. – 340 с.
2. Смоленцев Н. К. MATLAB: Программирование на Visual C#, Borland JBuilder, VBA [Текст]/Учебный курс (+CD).- М.: ДМК Пресс: СПб.: Питер, 2009.- 464с.
3. Консультативний центр MatLab. Список функцій. – <http://matlab.exponenta.ru/statist/book2/index.pxp>
4. Генерація випадкових чисел в MatLab.
<http://www.edu.nstu.ru/course/msos/lab3.html>
5. Функції MatLab.
http://www.nsu.ru/matlab_RU/statist/book2/index.asp.html
6. MATLAB GUI Tutorial.- <http://blinkdagger.com/matlab/matlab-gui-tutorial-plotting-data-axes/>

И.В. Пономарев, Ю.М. Рыбка

АЛГОРИТМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАЛИЧИЯ ПАРАМЕТРОВ В СИСТЕМАХ

Аннотация. В данной работе рассмотрены методики идентификации определенных параметров (событий, элементов) в системах (множествах) из числа заданных с точностью до элемента или до конкретной группы элементов.

Ключевые слова: система; тест; вектор симптомов; множество параметров; матрица покрытий тестов.

Постановка задачи. Пусть имеется множество $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ параметров (событий), далее – элементов некоторой системы и множество $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ тестов, каждый из которых определяет наличие в системе соответствующих подмножеств элементов $Y_1, Y_2, \dots, Y_m, \forall Y_i \in X$. Необходимо предложить методику, позволяющую производить идентификацию наличия в системе любого из параметров системы с точностью до элемента или до конкретного набора элементов.

Основные результаты. По результатам проведенного тестирования сопоставим каждому из тестов $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ вектор симптомов $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$, причем, $\forall s_i = 1$, если тест T_i свидетельствует о наличии подмножеств элементов Y_i в системе и $\forall s_i = 0$, если таких подмножеств в системе нет.

В работе [1] были предложены структурные алгоритмы нахождения списков подозреваемых неисправностей электронных устройств, которые в работе [2] были адаптированы с целью решения задач идентификации параметров систем.

В соответствии с введенной выше системой обозначений, основные два из алгоритмов работы [1] можно записать следующим образом:

$$L = \bigcap_{i \in S_i=1} Y_i \setminus \bigcup_{j \in S_j=0} Y_j \quad (1)$$

$$L = \bigcup_{i \in s_i=1} Y_i \setminus \bigcup_{j \in s_j=0} Y_j, \quad (2)$$

где L – список элементов, имеющих в системе, причем, сначала L находится в соответствии с алгоритмом (1), а если при этом получается пустое множество, то применяется методика (2).

Замечание 1. Так как рассматриваемые системы, представимы в виде графов причинно-следственных связей [3] без циклов, подмножества $Y_1, Y_2, \dots, Y_m$ элементов, охватываемых тестами, соответствуют строкам матриц путей таких графов, а столбцы – элементам систем. Поэтому, для удобства применения аппарата матриц, способ обозначения симптомов, по сравнению с применяемым в работе [1] изменен: вместо единицы ставится ноль и наоборот.

Первый случай соответствует наличию в системе, скорее всего, одного или, возможно, нескольких элементов из списка L , а второй – свидетельствует о присутствии в ней сразу нескольких элементов данного списка.

В данной же работе поставлена задача определения одного конкретного элемента системы, или точная идентификация конкретного подмножества ее элементов, а не списка элементов, который, является результатом работы приведенных выше алгоритмов.

Поэтому, в дальнейшем, будем считать, что в системе присутствует только один элемент или определенная группа элементов.

Как и в работе [2], введем в рассмотрение бинарную матрицу покрытий тестов C , имеющую m строк и n столбцов, где $c_{ij}=1$, если i -й тест проверяет наличие j -го элемента в системе, и $c_{ij}=0$, если это не так. При этом было учтено замечание 1.

Отметим также, что данная матрица представляет собой матрицу путей графа причинно-следственных связей, если рассматриваемую систему представить в виде такового.

Из особенностей матрицы C легко видно, что ее столбцы представляют векторы симптомов соответствующих элементов для случая наличия в системе только одного конкретного элемента, а так как однозначность при идентификации наличия элементов системы будет достигнута при полной различимости всех векторов симптомов, то необходимым и достаточным условием для этого является такая же различимость всех столбцов матрицы.

Поэтому, для обеспечения различимости всех элементов, в случае равенства каких-либо столбцов матрицы C , необходимо вводить дополнительные строки (тесты) [2].

Далее в работе [2] для случая, когда в матрице имеется два одинаковых столбца, или таких пар несколько был предложен способ решения данной задачи, который здесь мы сформулируем в виде утверждения.

Утверждение 1. С целью обеспечения различимости пары столбцов матрицы C необходимо продублировать в ней любую строку, содержащую единицу в данных столбцах, заменив при этом одну из таких единиц на ноль в одной из этих строк.

Если интерпретировать последнее утверждение в терминах задачи построения тестов, то данная операция соответствует случаю, когда при генерации нового теста просто копируется один из старых тестов и, при этом, в новом тесте исключается процедура проверки наличия одного из двух, в данном случае, элементов.

Покажем теперь, что выполнив данную процедуру, можно, не увеличивая размерности матрицы C , и, соответственно, множество тестов, идентифицировать наличие в системе также и нескольких конкретных элементов с помощью алгоритмов (1) и (2).

Очевидно, что данное представляется возможным, если все столбцы рассматриваемой матрицы различны и всего таких столбцов меньше, чем $2^m - 1$, так как нулевого столбца в матрице C не существует (это случай отсутствия какого-либо параметра в системе).

Для достижения поставленной цели требования утверждения 1 необходимо: расположить дублируемые строки рядом и заменить единицу на ноль, например, в верхней строке, хотя, впрочем, эти правила можно и не соблюдать, но, в этом случае, будет значительно сложнее указать конкретный элемент.

Затем матрицу C следует расширить добавив в нее новые столбцы, соответствующие некоторым парам различных элементов. Данная процедура состоит в том, что каждый новый столбец образуется в результате операции ЛОГИЧЕСКОЕ ИЛИ двух столбцов исходной матрицы и при этом перебираются все возможные пары столбцов. Среди полученных таким образом столбцов следует исключить столбцы, содержащиеся в матрице C изначально.

Замечание 2. Столбцов, которые имеют единицу в верхней дублируемой строке и ноль – в нижней в полученной матрице быть не должно, ибо это противоречит “строгой” версии утверждения 1.

Пример. Пусть имеется следующая матрица покрытий тестов

	1	2	3	4	5
t ₁	1	1	1	0	0
t ₂	1	0	0	1	0
t ₃	1	0	0	0	1

Неразличимыми являются второй и третий столбцы, что соответствует неоднозначной идентификации 2-го и 3-го элементов. Введем дополнительный тест, что приводит к их различимости. Матрица C будет выглядеть:

	1	2	3	4	5
t ₄	1	1	0	0	0
t ₁	1	1	1	0	0
t ₂	1	0	0	1	0
t ₃	1	0	0	0	1

После применения предложенной выше методики, матрица C примет свой окончательный следующий вид:

	1	2	3	4	5	2,5	3,4	3,5	,5	2,3,4	3,4,5
t ₄	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0
t ₁	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1
t ₂	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1
t ₃	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1

Максимально возможная размерность матрицы по столбцам – 15, а фактическая – 11. Вектор-столбцы $\langle 1\ 0\ 0\ 0 \rangle$, $\langle 1\ 0\ 0\ 1 \rangle$, $\langle 1\ 0\ 1\ 0 \rangle$ и $\langle 1\ 0\ 1\ 1 \rangle$ в ней отсутствуют, что соответствует замечанию 2.

В работе предлагалось при расширении матрицы C использовать пары элементов, однако в данном примере найдены и две тройки однозначно идентифицируемых элементов.

Выводы. Таким образом, в данной работе предложена методика, позволяющая производить идентификацию конкретного (одного) элемента (параметра) в определенной системе или определение одно-временного наличия конкретных групп элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рыбка Ю.М. Алгоритмы структурно-функционального диагностирования электронных устройств. – В сб. Приборы и методы автоматизации экспериментальных исследований. Днепропетровск, ДГУ, 1984, С 88-91.
2. Рыбка Ю.М. Методика идентификации параметров систем // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 1(72) – Дніпропетровськ, 2011. – С 51-53.
3. Основы технической диагностики. Кн. I. Модели объектов, методы и алгоритмы диагноза/Под ред. П.П. Пархоменко.– М.:«Энергия», 1976. – 464 с.

Н.И. Твердоступ

ВЫСОКОДОБРОТНЫЙ УМНОЖИТЕЛЬ ИНДУКТИВНОСТИ

Аннотация. Проведены исследования входного импеданса линейной комбинированной операционной схемы с индуктивностью в цепи обратной связи усилителя. Разработана схема, в которой реализуется эффект увеличения входного индуктивного импеданса с одновременным ростом его добротности за счет компенсации активного сопротивления умножаемой индуктивности.

Ключевые слова: импеданс, операционная схема, индуктивность, добротность, активное сопротивление, усилитель, обратная связь.

Актуальность. Применение индуктивных датчиков в резонансных измерительных устройствах на низких частотах ограничивается малыми значениями их собственных индуктивности и добротности. Поэтому актуальным является создание устройств, позволяющих увеличивать индуктивность датчика до необходимого значения с одновременным повышением ее добротности.

Анализ исследований. Общим вопросам синтеза преобразователей реактанса посвящены работы [1, 2, 3], частные схемотехнические решения умножителей индуктивности рассмотрены в [4, 5, 6]. Анализ результатов, полученных в [7], обосновывает целесообразность использования комбинированной операционной схемы для создания умножителей индуктивности.

Постановка задачи. Целью работы является разработка высокодобротного умножителя индуктивности на основе комбинированной операционной схемы.

Основная часть. Линейная комбинированная операционная схема (ЛКОС) [7] обладает свойством масштабирования импеданса с сохранением знака, что дает возможность на ее основе создавать умножители реактанса. В работе [6], на основе ЛКОС был разработан умножитель импеданса, в котором увеличение индуктивности сопровождалось пропорциональным увеличением ее активного сопротивления, что приводило к снижению добротности. Для реализа-

высокодобротного умножителя индуктивности следует учесть, что входной импеданс ЛКОС состоит из положительной и отрицательной частей, которые целесообразно использовать следующим образом: положительную часть для умножения импеданса индуктивности, а отрицательную – для компенсации активной составляющей умноженного импеданса, что должно привести к увеличению добротности входной индуктивности.

В линейной комбинированной операционной схеме (рис.1) с индуктивным импедансом в цепи отрицательной обратной связи характерным является наличие комбинированной обратной связи, а также то, что внешние сигналы возбуждения поступают синфазно на оба входа операционного усилителя.

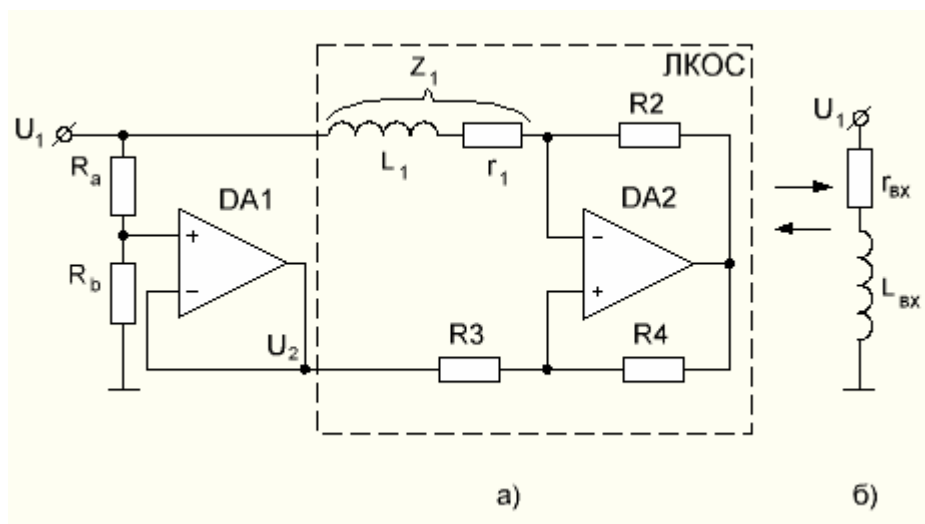


Рисунок 1 – Линейная комбинированная операционная схема (а), ее эквивалент (б)

Из выводов к работе [7] следует, что входной импеданс такой схемы равен

$$\dot{Z}_{BX} = \frac{\dot{Z}_1 - \frac{R_2 R_3}{R_4}}{1 - n}, \quad (1)$$

где $\dot{Z}_1 = r_1 + j\omega L_1$ – комплексный импеданс индуктивности L_1 с активным сопротивлением r_1 ; R_2 , R_3 , R_4 – активные сопротивления цепи комбинированной обратной связи усилителя DA2; $n = U_2/U_1$, U_1 и U_2 – напряжения сигналов возбуждения. Повторитель на усилителе DA1 с резистивным делителем R_a , R_b представляет собой источник напряжения возбуждения U_2 , синфазного входному U_1 .

Из (1) следует, что отношение n напряжений возбуждения оказывает основное влияние на величину $\dot{Z}_{\text{вх}}$, а именно: при $n \rightarrow 0$ и $U_2 < U_1$ значение входного импеданса $\dot{Z}_{\text{вх}}$ существенно увеличивается. Можно считать, что значение n определяет величину коэффициента преобразования индуктивного импеданса $\dot{Z}_1$ во входной импеданс $\dot{Z}_{\text{вх}}$.

Отношение n напряжений возбуждения можно представить через отношение сопротивлений делителя в виде

$$n = \frac{R_b}{R_a + R_b}, \quad (2)$$

тогда входной импеданс $\dot{Z}_{\text{вх}}$, выраженный через параметры схемы, будет

$$\dot{Z}_{\text{вх}} = \left(1 + \frac{R_b}{R_a}\right) \left(r_1 + j\omega L_1 - \frac{R_2 R_3}{R_4}\right), \quad (3)$$

Справедливо также, что $\dot{Z}_{\text{вх}}$ равен

$$\dot{Z}_{\text{вх}} = r_{\text{вх}} + j\omega L_{\text{вх}}, \quad (4)$$

где $r_{\text{вх}}$, $L_{\text{вх}}$ – входные активное сопротивление и индуктивность. Тогда из (3) и (4) следуют выражения активной и индуктивной составляющих входного импеданса

$$r_{\text{вх}} = \left(1 + \frac{R_b}{R_a}\right) \left(r_1 - \frac{R_2 R_3}{R_4}\right), \quad (5)$$

$$L_{\text{вх}} = \left(1 + \frac{R_b}{R_a}\right) L_1, \quad (6)$$

показывающие, что в настоящей схеме индуктивность L_1 с активным сопротивлением r_1 преобразуются во входные индуктивность $L_{\text{вх}}$ и сопротивление $r_{\text{вх}}$ с коэффициентом умножения равным

$$m = 1 + \frac{R_b}{R_a}, \quad (7)$$

который при выполнении условия $R_b \gg R_a$, может принимать большие значения.

Из (5) следует, что умножение активного сопротивления r_1 сопровождается его компенсацией отрицательной активной составляющей входного импеданса ЛКОС равной

$$R_{(-)} = -\frac{R_2 R_3}{R_4}. \quad (8)$$

Очевидно, что при $|R_{(-)}| \rightarrow r_1$ входное сопротивление $r_{вх} \rightarrow 0$.

Таким образом, в рассмотренной схеме возможно умножение индуктивности с компенсацией ее активного сопротивления. Это дает возможность реализовать индуктивность большой величины с высокой добротностью.

Умножитель индуктивности по схеме на рис.1 был построен на операционных усилителях с большим коэффициентом усиления дифференциального сигнала. (Последовательно испытывались усилители типов К140УД17, МСР604, ICL7650), в качестве умножаемого импеданса использовалась катушка с индуктивностью $L_1=4,59$ мГн и активным сопротивлением r_1 равным в одном случае 11,36 Ом и в другом – 1,35 Ом. Исследования проводились на частоте 1 кГц.

Результаты исследования возможности умножения индуктивного импеданса показаны на рис.2 в виде экспериментальных зависимостей (в логарифмическом масштабе) входных индуктивности $L_{вх}$, сопротивления $r_{вх}$ и добротности Q (здесь $Q = \omega L_{вх} / r_{вх}$) от отношения n напряжений возбуждения; зависимости 1, 2, 3 получены при отсутствии компенсации сопротивления r_1 (условие $R_2 R_3 / R_4 = 0$), а зависимости 2', 4, 5 — при наличии компенсации до значения $r_1 - R_2 R_3 / R_4 = 0,02$ Ом.

Видно, что без компенсации активного сопротивления катушки (см. зависимости 1, 2 и 3) изменение n от 0 до 0,99 приводит к росту $L_{вх}$ и $r_{вх}$ от начальных значений L_1, r_1 до $L_{вх} = 500$ мГн и $r_{вх} = 2600$ Ом. Это подтверждает наличие в схеме эффекта умножения индуктивности; из-за большого активного сопротивления добротность Q входной индуктивности здесь невелика, около 3,2. При наличии компенсации r_1 добротность Q (зависимость 4) принимает значение 1450 при $n = 0$, которое затем уменьшается с увеличением n , что объясняется ростом входного сопротивления $r_{вх}$ (зависимость 5); зависимость $L_{вх}(n)$ практически остается без изменений (см. 2') следовательно, эффект умножения индуктивности не зависит от величины ком-

пенсации ее активного сопротивления, что подтверждает справедливость выражений (5) и (6).

Результаты исследования возможности повышения добротности умноженной индуктивности путем компенсации ее активного сопротивления показаны на рис.3.

Для индуктивности L_1 с $r_1 = 11,36 \text{ Ом}$ при отсутствии компенсации ($|R_{(-)}| = 0$) активное входное сопротивление $r_{\text{вх}} = 570 \text{ Ом}$, начальная входная добротность $Q = 2$ (см. зависимости 2, 6); при увеличении компенсирующего отрицательного

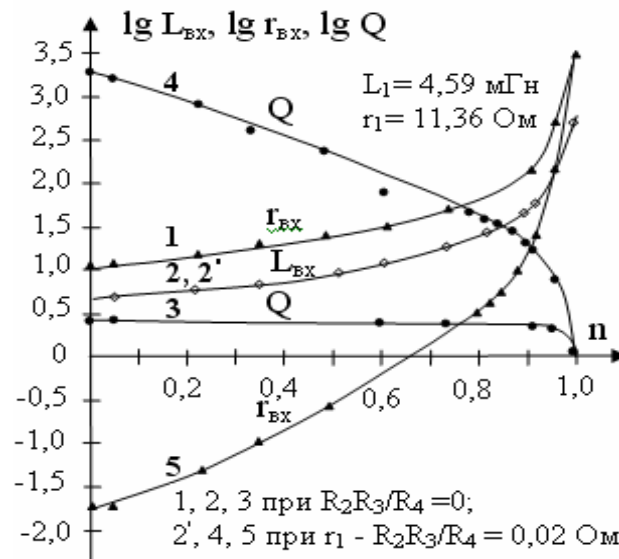


Рисунок 2 – Входные индуктивность $L_{\text{вх}}$, сопротивление $r_{\text{вх}}$ и добротность Q как функции отношения n напряжений возбуждения

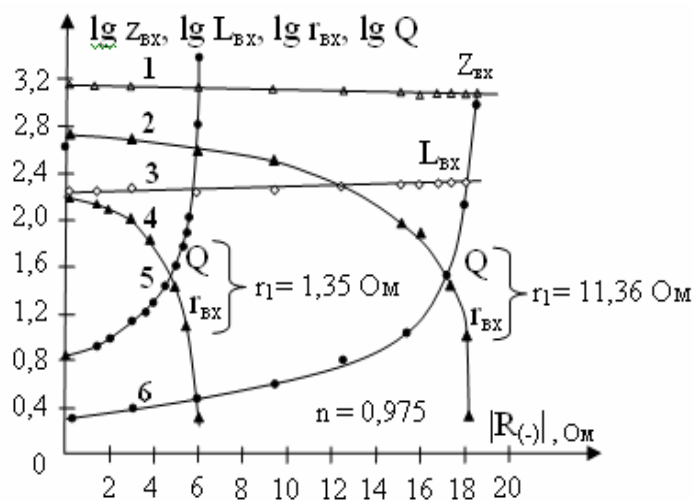


Рисунок 3 – Влияние компенсирующего сопротивления $|R_{(-)}|$ на добротность Q , входной импеданс $Z_{\text{вх}}$ и его составляющие $L_{\text{вх}}$, $r_{\text{вх}}$

$|R_{(-)}|$ до 18,2 Ом $r_{вх}$ уменьшается до 0,3 Ом, входная добротность увеличивается более чем в 500 раз и становится равной 1100. Для индуктивности с меньшим активным сопротивлением $r_1 = 1,35$ Ом (зависимости 4, 5) при увеличении $|R_{(-)}|$ до 6 Ом входная добротность возрастает от 7,4 до 2500 (увеличивается в 330 раз). Компенсация входного сопротивления, при выбранных значениях L_1 и r_1 , незначительно влияет на входной импеданс $Z_{вх}$ схемы и величину умноженной индуктивности $L_{вх}$ (см. зависимости 1, 3).

Экспериментальные исследования показали, что в ЛКОС путем выбора отношений амплитуд напряжений возбуждения $n = 0,99$ получено увеличение входной индуктивности более чем в 100 раз; компенсация активного сопротивления позволила увеличить добротность входной индуктивности более чем в 500 раз на частоте 1 кГц.

Вывод. На основе линейной комбинированной операционной схемы возможна реализация высокодобротных умножителей индуктивности на низких рабочих частотах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карпов Е.А., Марунчак Л.В., Рядинских А.С. Синтез нелинейных преобразователей. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 136 с.
2. Кустов О.В., Лундин В.З. Операционные усилители в линейных цепях. – М.: Связь, 1978. – 144 с.
3. Марше Ж. Операционные усилители и их применение. Л.: Энергия, 1974. – 216 с.
4. А.с. 813696 СССР Индуктивный двухполюсник/ А.Ф. Гришков, А.Н. Гуляев, И.Г. Дорух, А.В. Маргелов. Бюл. №10, 1981.
5. А.с. 836784 СССР. Преобразователь сопротивления/ С.А.Новосельцева, М.З. Чаповский. Бюл. №21, 1981.
6. Твердоступ Н.И. Умножитель индуктивности // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных трудов. – Выпуск 1(60). – Днепропетровск, 2009. - с.82 – 87.
7. Твердоступ Н.И. О функционально полном наборе входных импедансов комбинированной операционной системы // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных трудов. – Выпуск 6(41). – Днепропетровск, 2005. - с.47 – 53.

И.В. Пономарев

ЯЗЫКОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ ДЛЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ АСИНХРОННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ НА РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ МНОГОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМАХ

Аннотация. Предложен язык параллельной обработки для многопроцессорных вычислительных систем, позволяющий эффективно проводить вычисления при реконфигурации системы.

Ключевые слова: язык программирования, параллельные асинхронные вычисления.

Введение. Реконфигурируемые многопроцессорные вычислительные системы (МВС) представляют собой системы, у которых возможно изменение числа мультипроцессоров. Актуальной является разработка языка программирования для параллельных асинхронных вычислений на реконфигурируемых многопроцессорных системах.

Постановка задачи. Необходимо разработать языковые конструкции для эффективных параллельных асинхронных вычислений на реконфигурируемых многопроцессорных системах.

Основная часть. Модель обработки данных с учетом пространственного параллелизма и параллелизма задач для выполнения на МВС предложена в [1].

Управление выполнением задания базируется на методе асинхронного программирования [2]. Изначально все процедуры считаются взаимно-независимыми и параллельными. Каждое возможное упорядочивание выполнения процедур задается наложением определенных ограничений с помощью управляющих переменных. Управляющие взаимодействия между процедурами осуществляются путем изменения управляющих переменных, индивидуального отслеживания этих значений и индивидуальной реакции на их изменение.

Программист явно определяет информационные и управляющие связи между процедурами.

Каждой процедуре ставится в соответствие условие инициирования - спусковая функция, представляющая собой логическую функцию от управляющих переменных. Спусковая функция служит для указания используемых данных (информационные связи) и процедур, после которых может быть запущена данная процедура (управляющие взаимодействия).

В качестве управляющих переменных используются логические переменные процедур, наборов данных и параметров, имеющие соответствующие идентификаторы, логические переменные для синхронизации, а также специальные переменные, задаваемые и модифицируемые в процессе выполнения задания.

В разделе управления задания описываются управляющие переменные и определяются связи между процедурами. Для процедуры задается ее вызов, спусковая функция, выход и, если необходимо, модификация специальных переменных.

Вызов процедуры служит для активации процедуры. В выходе процедуры указываются общие наборы данных, которые использовались процедурой и освобождаются ею, ее выходные параметры, необходимые другим процедурам.

Каждой процедуре задания соответствует логическая переменная, значение которой до выполнения процедуры равно 0, а после – 1. Набору данных или параметру процедуры, указанному в спусковой функции, соответствует логическая переменная, которая принимает значение 1, если набор данных свободен, а параметр выдан процедурой, и 0, если набор данных занят, а параметр еще не выдан процедурой.

Специальные переменные и выходные параметры процедур используются для организации циклов и условных переходов в задании.

Инициализация управляющих переменных задает следующие их значения. Все логические переменные общих наборов данных устанавливаются в 1. Логические переменные выходных параметров устанавливаются в 0. Специальные переменные, управляющие логические переменные и параметр конфигурации принимают значения заданные в описании.

Для указания возможности параллельного выполнения одной процедуры над разными фрагментами данных она параметризует-

ся. Вместе с процедурами могут быть параметризованы наборы данных, параметры процедур, соответствующие им управляющие логические переменные, а также специальные переменные. Параметризация задается указанием идентификатора параметра в квадратных скобках после идентификатора процедуры или управляющей переменной. Состояние i -го экземпляра процедуры (набора данных, параметра) определяется i -м элементом массива соответствующих переменных.

Приведем описание синтаксиса раздела управления задания с помощью модифицированных форм Бэкуса-Наура.

```

раздел_управления ::= control инициализация_переменных
                               задание_параметра_конфигурации
                               определение_связей
задание_параметра_конфигурации ::= идентификатор = диапа-
зон ;
инициализация_переменных ::= { идентификатор [пара-
метр_конфигурации] = выражение ; }
определение_связей ::= оператор_связи { ; оператор_связи }
оператор_связи ::= спусковая_функция / [пара-
метр_конфигурации]
                               вызов_процедуры / [выход] /
[ : модификация_спец_перем]
вызов_процедуры ::= имя_процедуры (спи-
сок_фактических_параметров)
выход ::= идентификатор [параметр_конфигурации]
        { , идентификатор [параметр_конфигурации] }
модификация_спец_перем ::= спец_перем = выражение
спусковая_функция ::= логическое_выражение

```

В определенные моменты времени проверяются значения спусковых функций всех процедур. Те процедуры, значения спусковых функций которых «истинны», объявляются готовыми к выполнению. Это значит, что данные необходимые для этих процедур уже вычислены и/или управление передано на эти процедуры.

В случае указания выходного параметра процедуры в спусковой функции некоторой процедуры, ее запуск задерживается до окончания процедуры, выдающей этот параметр. Затем выполняется пересылка параметра к данной процедуре. При использовании общих

данных процедура считается готовой к выполнению, если никакая другая процедура в данный момент времени не работает с указанными в спусковой функции общими данными.

После выполнения процедуры значения управляющих логических переменных, указанных в выходе, устанавливаются в 1 и производится модификация специальных переменных.

При описании переменных задаются значения параметров конфигурации МВС. Параметризация процедур в разделе управления дает возможность выполнять задание на реконфигурируемой МВС с любым числом мультипроцессоров.

Для автоматического выполнения задачи над всем изображением в спецификации процедуры описываются системные параметры, такие как размеры фрагмента и число мультипроцессоров. Число фрагментов набора данных является одной из специальных управляющих переменных. В спусковой функции перехода, соответствующей прикладной процедуре, присутствует проверка на неравенство нулю этой специальной переменной. После обработки одного фрагмента она уменьшается на единицу в процедуре модификации управляющих переменных перехода.

Пример описания раздела управления заданием. Прикладная процедура PSG выполняет обработку входного изображения из файла А, результирующее изображение записывается в файл В.

```
control
i=1..nmp;
nfr; S[i]=1; IB[i]=nbi; OB[i]=nbo;
A and S[i] and nfr>0 and IB[i]>0 / [i] INP() / AM,A,S[i], nfr--,
IB[i]--
AM[i] and OB[i]>0 / [i] PSG() / BM[i],OB[i]--,IB[i]++
BM[i] and B and S[i] / [i] OUT() / B, S[i], OB[i]++
nmp – число мультипроцессоров в МВС,
nfr – число фрагментов изображения,
INP(), OUT() – процедуры ввода и вывода соответственно,
AM, BM – входной и выходной фрагменты изображения,
i, IB, OB – параметры конфигурации, соответствующие мультипроцессорам, входным и выходным буферам,
nbi, nbo – число входных и выходных буферов соответственно,
S – управляющая переменная.
```

Возможно моделирование выполнения задания, описанного на приведенном языке, параметризированной сетью Петри, описанной в [3].

Выводы. Предложены языковые конструкции раздела управления языка параллельных вычислений на реконфигурируемых МВС, которые предоставляют возможность описания задания на обработку. Эффективное выполнение обработки системой определенной архитектуры достигается за счет задания системных параметров конфигурации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пономарев И.В., Федотов А.Г. Структурные свойства данных и методы построения программного обеспечения реконфигурируемых многопроцессорных систем с общим управлением.- М.: Вопросы кибернетики, 170, 1991, с. 132-158.
2. Элементы параллельного программирования/ Под ред. В.Е. Котова. М.: Радио и связь, 1983. 240 с.
3. Пономарев И.В. Моделирование параллельных вычислений для эффективной организации процесса обработки изображений на МВС // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. Выпуск 1(72). – Днепропетровск, 2011, - с. 45-50.

В.С. Хандецкий, Ю.А.Тонкошкур

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ДЕПОЛЯРИЗАЦИОННОГО АНАЛИЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФУНКЦИИ КОЛЬРАУША-УИЛЬЯМСА-ВАТТА

Аннотация. Исследованы механизмы аппроксимации для описания изменений деполяризационного тока в неоднородных материалах с использованием функции Кольрауша-Уильямса-Ватта. Показана возможность восстановления релаксационной зависимости тока в широком временном диапазоне на основе суперпозиции функций рассматриваемого вида.
Аннотация.

Ключевые слова: моделирование, аппроксимация, изотермический деполяризационный анализ, релаксационные зависимости, функция Кольрауша-Уильямса-Ватта.

Введение. Изотермический деполяризационный (ИТД) анализ традиционно применяется для исследований электронных процессов в диэлектриках [1-7]. Он основывается, как правило, на фиксации кинетики разрядных токов диэлектриков, возникающих после их поляризации постоянным напряжением, с последующим анализом ее спектра в диапазоне низких (инфранизких) частот [8, 9, 10].

В последнее время интенсифицировалось применение ИТД анализа для спектроскопии «медленных» электронных состояний в неоднородных полупроводниковых структурах с межкристаллитными потенциальными барьерами, в частности, варисторной металлоксидной керамике [11, 12]. Одним из ограничений его применения к исследованию и диагностике таких неоднородных материалов являются трудности фиксации релаксационных зависимостей тока ИТД в диапазоне больших времен. Это требует измерений в диапазоне малых ($< 10^{-12}$ А) токов, подавления шумов с широким спектром.

Одним из перспективных подходов к преодолению указанных трудностей является использование аппроксимирующих функций,

описывающих изменение деполяризационного тока в широком временном диапазоне, в частности функции Кольрауша-Уильямса-Ватта (КУВ) [13,14].

В настоящей работе предложены и протестированы с использованием численных экспериментов базирующиеся на использовании функции КУВ алгоритмы:

- восстановления релаксационной зависимости тока изотермической деполяризации в широком временном диапазоне;
- определение параметров релаксационной зависимости с использованием суперпозиции функций рассматриваемого вида.

Влияние диапазона фиксации временной зависимости деполяризационного тока на его спектральную характеристику. Выражение для КУВ функции, используемой для описания релаксационных зависимостей деполяризационного тока, может быть представлено обобщенно в виде [13, 14]

$$j_{ID}(t) = j_0 \exp \left[- \left(\frac{t}{\tau} \right)^\beta \right], \quad (1)$$

где $j_0 = j_{ID}(0)$; – начальное значение тока деполяризации; τ - постоянная релаксации заряда; величина β - параметр, позволяющий отобразить распределение времен релаксации.

В эксперименте β принимает значения меньшие единицы. Для рассматриваемого здесь численного тестирования примем $\beta=0,5$.

Исходные данные представляют собой зависимости $j_{ID}^{(k)}$ от t_k , где $k=0,1,...,K$ (K – число дискретных точек зависимости). Вид зависимости, принятой за основу, показан на рис. 1, а.

Для нахождения спектральной характеристики [15, 16] $j_{ID}(t)$ использовалось интегральное синус преобразование

$$J_{ID}(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \overline{j_{ID}}(t) \sin(\omega T) dt. \quad (2)$$

Непрерывная функция $\overline{j_{ID}}(t)$ выражалась через линейную интерполяцию дискретной зависимости $\log[j_{ID}^{(k)}(\log t_k)]$.

В то же время численное вычисление интеграла в (2) сопряжено с рядом трудностей. Во-первых, обеспечить требуемые пределы в эксперименте невозможно. Во-вторых, необходимость обеспечения весьма малых шагов интегрирования в области высоких частот (чтобы

на один период изменения функции $\sin(\omega t)$ приходилось несколько шагов по t) удлиняет вычислительный процесс в целом до практически неприемлемых временных затрат. Более подходящим для вычисления (2) представляется алгоритм, реализуемый следующей формулой (3).

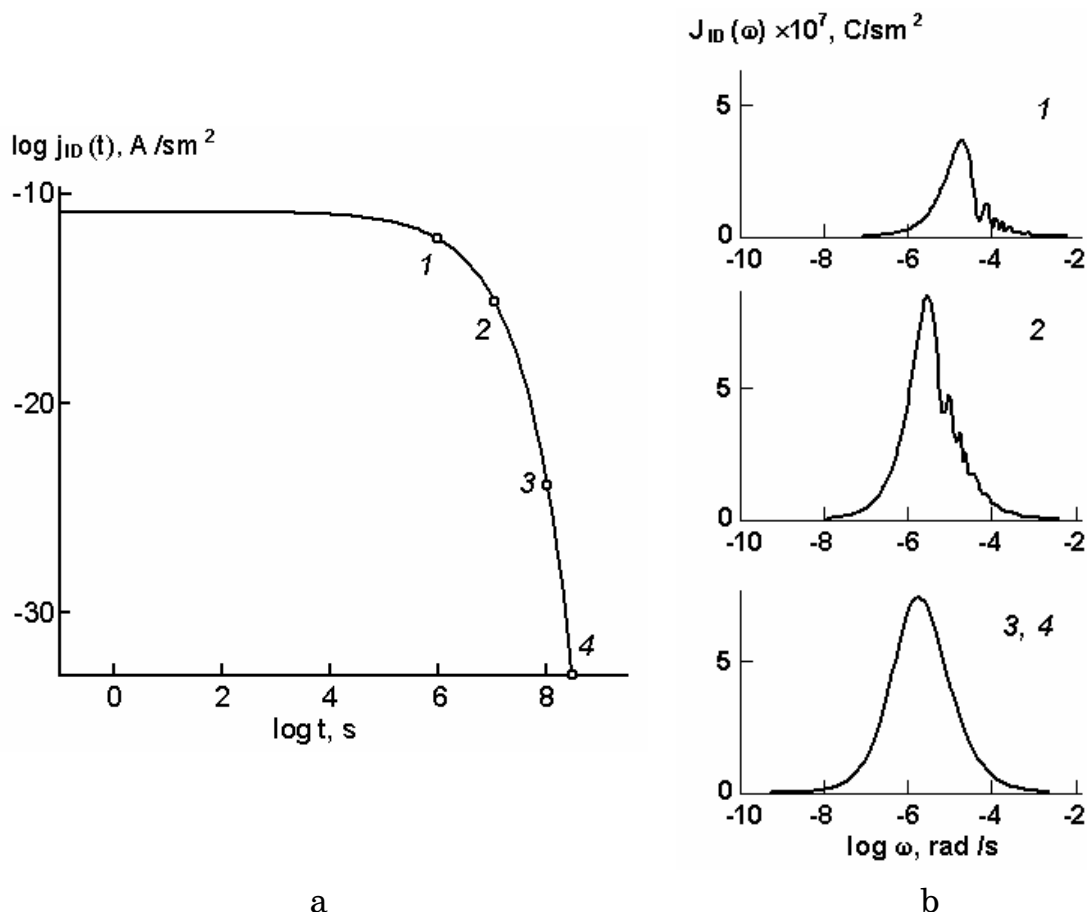


Рисунок 1 - Временные $j_{ID}(t)$ и спектральные $J_{ID}(\omega)$ зависимости тока ИТД, при $\tau=1.2 \cdot 10^6$ s, $j(0)=1.35 \cdot 10^{-12}$ A/sm²; $\beta=0,5$ для временных диапазонов фиксации тока, с: 1 – (10⁻¹...10⁶); 2 – (10⁻¹...10⁷); 3 – (10⁻¹...10⁸); 4 – (10⁻¹...10^{8,5})

$$J(\omega) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \sum_{i=0}^{n-1} \int_{t_0 + \frac{2\pi}{\omega} i}^{t_0 + \frac{2\pi}{\omega} (i+1)} \overline{j_{ID}}(t) \sin(\omega t) dt + \frac{2}{\pi} \sum_{i=0}^{n-1} \int_{t_0 + \frac{2\pi}{\omega} n}^{t_K} \overline{j_{ID}}(t) \sin(\omega t) dt, & \frac{2\pi}{\omega} < (t_K - t_0); \\ \frac{2}{\pi} \sum_{i=0}^{n-1} \int_{t_0}^{t_K} \overline{j_{ID}}(t) \sin(\omega t) dt, & \frac{2\pi}{\omega} \geq (t_K - t_0) \end{cases} ; (3)$$

где $n = \text{trunc}\left(\frac{t_k - t_0}{2\pi/\omega}\right)$; t_0 и t_k - диапазон времени, где фиксировались значения деполяризационного тока. Интегралы в (3) вычисляются стандартными функциями пакета Mathcad [17,18].

На рис. 1, б представлены полученные таким образом спектральные характеристики тока ИТД при фиксации его значений в разных диапазонах времени.

Как видно, потеря длинновременного участка релаксационной зависимости может привести к существенным искажениям спектральной характеристики деполяризационного тока. Это проявляется в уменьшении и сдвиге в сторону более высоких частот максимума $JID(\omega)$, а также в появлении за ним серии повторных меньших по амплитуде пиков.

В условиях физического эксперимента фиксация релаксационной зависимости деполяризационного тока в диапазоне больших времен осложнена вследствие его малости. Как показано выше, спектральная характеристика позволяет определить степень завершенности релаксационной зависимости и достаточности полученных данных для дальнейшего анализа.

Коррекция релаксационной зависимости деполяризационного тока. Одним из возможных подходов, позволяющих дополнить имеющуюся дискретную (экспериментальную) релаксационную зависимость деполяризационного тока является экстраполяция в область больших времен с помощью аппроксимирующей функции КУВ. Для этого необходимо произвести ее идентификацию, т.е. определить параметры функции (1) – j_0 , β и τ по имеющимся дискретным данным (рис.1). Поскольку непосредственное решение задачи аппроксимации нелинейной функции с высокой точностью, сводящееся как правило к решению системы нелинейных уравнений или решению задачи численной минимизации целевой функции достаточно продолжительно и не всегда обеспечивает требуемую точность в настоящей работе использован следующий комбинированный алгоритм.

Для нахождения величины неизвестного коэффициента β дискретная зависимость представляется в координатах $t \times [d(\log j_{ID}^{(k)})/dt]$ и $\log(j_{ID}^{(k)})$, $k = 0, 1, \dots, K$ (K – число ее точек).

В этих координатах зависимость (1) имеет вид прямой (рис. 2):

$$t \frac{d \log j_{ID}(t)}{dt} = \beta \log j_{ID}(t) + const, \quad (4)$$

где $const = -\beta \log j_0$. Выражение (4) получено дифференцированием логарифма выражения (1) и учетом того, что $(t/\tau)^\beta \log e = -\log[j_{ID}(t)/j_0]$.

Как видно параметр β является тангенсом угла наклона прямой (4) - $\beta = \Delta\{t \times [d(\log j_{ID})/dt]\} / \Delta \log(j_{ID})$. Учитывая вероятность разброса экспериментальных точек для повышения точности вычисления величины β предпочтительно использовать их линейную аппроксимацию вида $y(x) = b_0 + b_1 x$ с использованием метода наименьших квадратов [17]. Полученные результаты показаны на рис. 2.

Тогда

$$\beta = b_1 = \left[(K+1) \cdot \sum_{k=0}^K x_k y_k - \sum_{k=0}^K x_k \cdot \sum_{k=0}^K y_k \right] / \left[(K+1) \cdot \sum_{k=0}^K x_k^2 - \left(\sum_{k=0}^K x_k \right)^2 \right], \quad (5)$$

где $x_k = \log(j_{ID}^{(k)})$; $y_k = t_k \times [d(\log j_{ID}^{(k)})/dt]$.

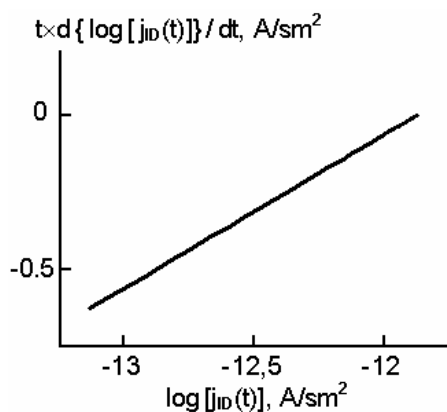


Рисунок 2 - Аппроксимирующая функция КУВ в форме (4). Временной диапазон фиксации тока от 10⁻¹ до 10⁷ с.

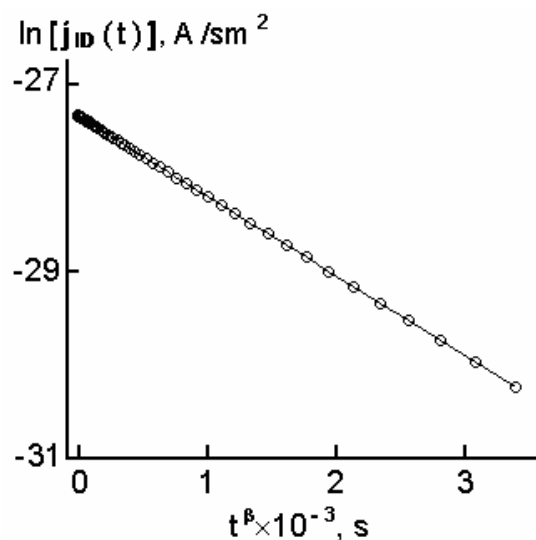


Рисунок 3 - Аппроксимирующая функция КУВ в форме (6). Временной диапазон фиксации тока от 10⁻¹ до 10⁷ с. Точками показаны исходные данные, сплошной линией - аппроксимирующая функция.

Для нахождения остальных неизвестных параметров следует представить исходные дискретные данные в координатах $\ln(j_{ID}^{(k)})$ и

$(t_k)^\beta$, $k = 0, 1, \dots, K$ (K – число точек). Соответственно (1) и рис. 3 в этом случае искомая зависимость также представляется прямой линией

$$\ln[j_{ID}(t)] = \ln[j_0] - (t/\tau)^\beta \quad (6)$$

Оставшиеся неизвестные параметры определяются по формулам

$$\tau = [-\Delta \ln(j_{ID}) / \Delta(t^\beta)]^{-1/\beta}; \quad j_0 = \exp\{\ln[j_{ID}(t)] + (t/\tau)^\beta\}. \quad (7)$$

С учетом линейной аппроксимации аналогичной используемой выше

$$\ln[j_{ID}(t)] + (t/\tau)^\beta = b_0; \quad \Delta \ln(j_{ID}) / \Delta(t^\beta) = b_1; \quad x_k = t_k^\beta; \quad y_k = \ln(j_{ID}^{(k)});$$

$$b_0 = \left(\sum_{k=0}^K y_k \cdot \sum_{k=0}^K x_k^2 - \sum_{k=0}^K x_k \cdot \sum_{k=0}^K x_k y_k \right) / \left[(K+1) \cdot \sum_{k=0}^K x_k^2 - \left(\sum_{k=0}^K x_k \right)^2 \right].$$

На рис. 4 представлены результаты восстановления тестовой релаксационной зависимости деполяризационного тока, заданной в диапазоне 10⁻¹ до 10⁷ с (кривая до точки 2 на рис.1а)

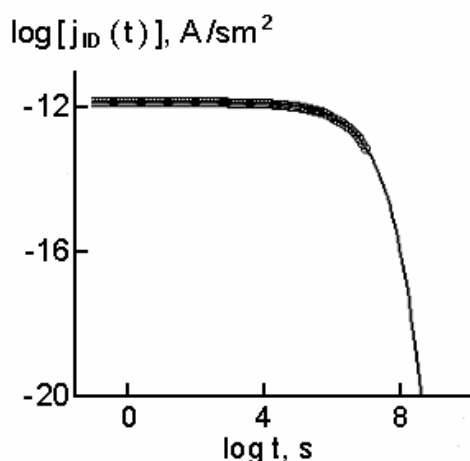


Рисунок 4 - Исходная (жирная линия) и восстановленная с помощью функции КУВ (тонкая линия) кинетические зависимости деполяризационного тока

Полученные путем предлагаемых расчетов и исходные параметры релаксационной функции удовлетворительно совпадают. Относительная погрешность не превышает 0,5%. Следует отметить, что интегрирование зависимости $j_{ID}(t)$ приводит к следующему явному выражению для величины заряда, участвующего в процессе деполяризации

$$Q_s = \int_0^\infty j_{ID}(t) dt = j_0 \frac{\tau}{\beta} \Gamma\left(\frac{1}{\beta}\right), \quad (8)$$

где $\Gamma(x)$ - гамма - функция [19].

Особенности обработки данных кинетики релаксационных токов с отличающимися временами релаксации. Следует отметить, что

выражение вида (1) аппроксимирует релаксационную зависимость тока изотермической деполяризации в случае достаточно компактного распределения времен относительно наиболее вероятного τ , что характеризуется введением параметра β . В случае наличия нескольких (m) слабо пересекающихся областей с отличающимися параметрами τ_i , выражение (1) приобретает следующий вид

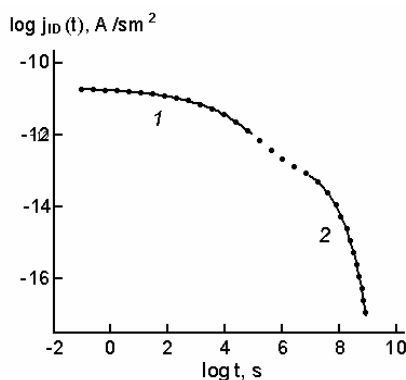
$$j_{ID}(t) = \sum_{i=1}^m j_i \exp \left[- \left(\frac{t}{\tau_i} \right)^\beta \right], \quad (9)$$

Применение методики описанной выше может обеспечить оценку всех параметров функции КУВ для нескольких областей.

На рис. 5, а представлена исходная дискретная (тестовая) зависимость, полученная в соответствии с (8) для $m=2$ и параметров, приведенных в табл. 1. На рисунке также представлены результаты тестирования предложенного алгоритма, получаемые на различных шагах: определения спектральной зависимости тока (рис.5, б), параметров β_i (рис. 5, с), τ_i и j_i (рис. 5, d и f). Как видно спектральная зависимость тока ИТД (рис. 5, б) более широкая, чем для случая одного времени релаксации. Наличие повторяющихся и убывающих по амплитуде пиков после максимума свидетельствует о том, что кинетика тока ИТД описывается зависимостями с параметрами $\beta < 1$.

В зависимости $t \times [d(\log j_{ID}^{(k)})/dt]$ от $\log(j_{ID}^{(k)})$, $k=0,1,\dots,K$ (рис. 5, с) проявляются два линейных участка, что позволяет оценить значения параметров β_1 и β_2 ; представить исходную дискретную зависимость рис. 5, а в координатах

$\ln(j_{ID}^{(k)})$ и $(t_k)^\beta$, $k=0,1,\dots,K$ и найти оценки остальных параметров аппроксимации (9) - τ_i и j_i (рис. 5, d и f).



а

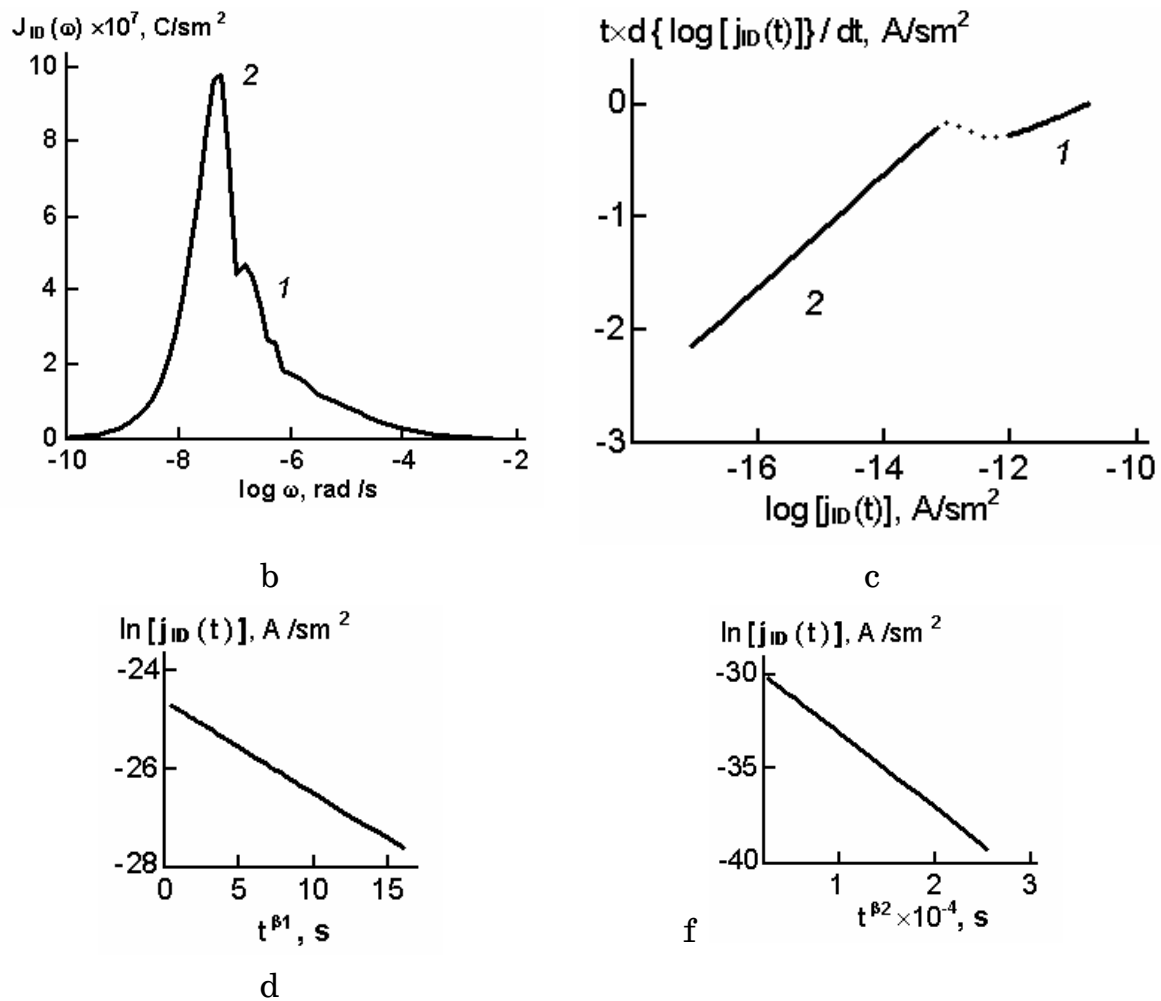


Рисунок 5- Исходные временные (а) и спектральные (б) зависимости тока ИТД с двумя релаксационными областями и результаты применения к ним алгоритма определения параметров функции КУВ (с, d, f) в соответствии с (4) - (7)

Таблица 1

Сравнение расчетных параметров с истинными

Параметр	Расчетное значение	Истинное значение	Относительная погрешность, %
β_1	0.242	0.25	3
$\tau_1, \text{ s}$	$1.07 \cdot 10^3$	103	7
$j_1, \text{ A/sm}^2$	$2.03 \cdot 10^{-11}$	$2 \cdot 10^{-11}$	1,5
β_2	0.49	0,5	2
$\tau_2, \text{ s}$	$8.97 \cdot 10^6$	107	10
$j_2, \text{ A/sm}^2$	$2.14 \cdot 10^{-13}$	$2 \cdot 10^{-13}$	7

Полученные оценки можно рассматривать в качестве начального приближения. Для получения более точных их значений следует использовать метод наименьших квадратов [17], где они могут быть получены минимизации функции вида.

$$\Phi[\beta_1, \dots, \beta_m; \tau_1, \dots, \tau_m; j_1, \dots, j_m] = \sum_{k=0}^n \left\{ j_{ID}^{(k)} - \sum_{i=1}^m j_i \exp[-(t_k/\tau_i)^{\beta_i}] \right\}^2 = \min. \quad (10)$$

Определенные согласно (10) значения параметров β_i , τ_i и j_i ($i=1$ и 2 , соответственно) удовлетворительно согласуются с принятыми при генерации тестируемой зависимости (табл. 1).

Выводы.

1. Исследованы спектральные характеристики токов изотермической деполяризации. Установлено, что при отсутствии фиксации завершающего длинновременного участка релаксации тока спектральная его характеристика искажается по абсолютным параметрам (высота и частота пика) и по форме (появляется серия небольших пиков, следующих за главным).

2. Предложен алгоритм коррекции релаксационной зависимости тока ИТД, основанный на экстраполяции в область больших времен с использованием функции Кольрауша-Уильямса-Ватта.

3. Показано, что предлагаемый метод пригоден и для определения параметров релаксационных зависимостей, которые аппроксимируются суперпозицией двух функций рассматриваемого вида.

ЛИТЕРАТУРА

1. Neagu, E.R., Neagu R. M. A new method for analysis of isothermal discharging current. // Thin Solid Films. – 2000. – V. 358. – P. 283-291.
2. Lei Qingquan, Tian Fuqiang, Yang Chund, He Lijuan and Wang Yic Modified isothermal discharge current theory and its application in the determination of trap level distribution in polyimide films // J. Electrostatics. – 2010. – V. 68, Issue 3, P. 243-248.
3. Menegotto J., Demont P., Lacabanne C. Secondary dielectric -relaxation in amorphous poly(ethylene terephthalate): combined thermally stimulated and isothermal depolarization current investigations // Polymer. - 2001. - V. 42, N. 9. - P. 4375-4383.
4. Eugen R., Neagu, and Rodica M. Neagu. On the nature of the origin of the iso-thermal and non-isothermal current released from dielectric materials // Thin Solid Films. - Volume 384, Issue 1, 1 March 2001, Pages 15-22.

5. Fedosov S.N., Revenyuk T.A., Sergeeva A. E.. Isothermal charging and discharging currents in doped polystyrene // *Photoelectronics*– 2006. - V.15 – P. 15-21.
6. Шаламов, И. В., Ухарцева, И. Ю., Цветкова, Е. А., Гольдаде, В. А. Исследование электрофизических свойств жидкодисперсных систем методом изотермической деполяризации // *Материаловедение*. - 2003. - № 3. - С. 28-31.
7. Baird M.E. Determination of Dielectric Behavior at Low Frequencies from Measurements of Anomalous Charging and Discharging Currents // *Rev. Modern. Phys.* - 1988. – Vol. 40, No. 1 – P. 219-227.
8. Дегтярев А.В., Тонкошкур Ю.А. Диэлектрическая спектроскопия неоднородных структур в диапазоне инфранизких частот // *Вісник Дніпропетровського університету. Серія Фізика. Радіоелектроніка*. 2009. – №2. -Вип.. 16. - С. 137-142.
9. Тонкошкур А.С., Гомилко И.В. Ляшков А.Ю. Особенности изотермической деполяризации в оксидно-цинковой варисторной керамике // *Неорганические материалы*. - 1998. - Т. 34, №9. - С. 1123-1127.
10. Tsonos C., Kanapitsas A., Neagu E., Stavrakas I., Anastasiades C., Triantis D., Pissis P. Dielectric response of ZnO-based varistor // *6th International Discussion Meeting on Relaxations in Complex Systems*. - Rome, Italy. - 2009. List of Abstracts. – P. 175.
11. Тонкошкур А.С., Скляр С.Ф., Афонько Е.Ф., Влияние «встроенного» заряда на диэлектрические явления в неоднородных структурах матричного типа // *Изв. вузов СССР. Физика*. 1988. – № 8. – С. 108 – 110.
12. G. Williams and D. C. Watts . Non-symmetrical dielectric relaxation behaviour arising from a simple empirical decay function // *Trans. Faraday Soc.*, 1970, 66, 80-85.
13. George H. Weiss, Menachem Dishon, Andrea M. Long, John T. Bendler, Alan A. Jones, Paul T. Inglefield, Athinodoros Bandis. Improved computational methods for the calculation of Kohlrausch-Williams/Watts (KWW) decay functions // *Polymer*.- Volume 35, Issue 9, 1994, P. 1880-1883.
14. Stephan A. Baeurle, Atsushi Hotta and Andrei A. Gusev. A new semi-phenomenological approach to predict the stress relaxation behavior of thermoplastic elastomers.// *Polymer*.- Volume 46, Issue 12, 26 May 2005, Pages 4344-4354.
15. M.Dishon, G.H.Weiss and J.T.Bendler, Stable Law. Densities and Linear Relaxation Phenomena // *J. Res.N.B.S.* – 1985. – V.90, No. 1. – P.27 – 40.
16. Калиткин Н.Н. Численные методы. – М.: Наука, 1978. – 512 с
17. Дьяконов В. П. Mathcad 2001: учебный курс.–СПб.: Питер, 2001.–624 с.
18. Г.Корн, Т. Корн. Справочник по математике. Для научных работников и инженеров. М.:Наука, 1974. – 832 с.

В.М. Григорьев

ВИРТУАЛИЗАЦИЯ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА ПО КОМПЬЮТЕРНЫМ СЕТЯМ

Аннотация. Представлены принципы использования виртуальных машин для организации изучения сетевых технологий. Решается задача выбора виртуальной машины и операционной системы сетевого устройства для организации одновременной работы большого числа студентов в случае ограниченности ресурсов хост-компьютера. В ходе исследований выбор пал на виртуальную машину Qemu в рамках оболочки GNS3 под управлением Ubuntu и операционную систему RouterOS сетевых устройств фирмы Mikrotik.

Ключевые слова: сетевая топология, виртуальная машина, RouterOS, Mikrotik, Qemu, GNS3, Ubuntu .

Актуальность темы. Сетевые маршрутизаторы работают под управлением операционных систем. В ряде случаев эти операционные системы можно запустить внутри виртуальных машин. Сетевые устройства в сети соединены каналами связи. Для организации виртуальной сетевой лаборатории надо соединить между собой виртуальные машины, в которых запущены операционные системы сетевых устройств.

На лабораторном занятии в такой виртуальной лаборатории по компьютерным сетям обычно присутствует десяток студентов, и каждый из них изучает сетевую топологию, состоящую из нескольких сетевых устройств. Одновременно работают десятки виртуальных машин. Возникает задача такого выбора операционной системы сетевого устройства и виртуальной машины, чтобы обеспечить студентам комфортную одновременную работу при условии ограниченности ресурсов хост-компьютера.

Анализ последних исследований. Идея виртуальных сетевых лабораторий не нова, и для их реализации существуют специализированные решения. Для моделирования устройств Cisco, работающих

под управлением операционной системы IOS, используются программы Cisco Packet Tracer и Boson NetSim, имеющие удобный графический интерфейс, позволяющий быстро создавать достаточно сложные сетевые топологии. Однако встроенная в них урезанная версия IOS позволяет изучать лишь сетевые технологии начального уровня.

Постановка задачи. Большой интерес представляет использование операционных систем реальных сетевых устройств. При этом возникают вопросы, касающиеся выбора операционной системы устройства и виртуальной машины для запуска этой операционной системы. Вопросы касаются того, сколько ресурсов хост-машины потребляет виртуальная машина; каково время запуска операционной системы внутри виртуальной машины; какие средства предоставляют виртуальные машины для соединения между собой запущенных внутри них операционных систем и как быстро создать сложную сетевую топологию из десятков устройств.

Обоснование полученных результатов. Для моделирования сетевых топологий широко используется контейнер виртуальных машин GNS3. Для создания сетевых топологий в GNS3 используется технология Drag-and-Drop: зацепил устройство мышью и перетащил его на рабочее поле. GNS3 поддерживает две виртуальные машины: Dynamips и Qemu. Выбор именно этих машин для включения в GNS3 обусловлен наличием в их составе развитых средств для соединения между собой операционных систем.

Виртуальная машина Dynamips позволяет запустить внутри себя реальную IOS для очень широкого класса устройств Cisco. Однако при работе с Dynamips следует подбирать параметры для уменьшения нагрузки на центральный процессор. Без должных настроек Dynamips использует все ресурсы компьютера уже для топологии из трёх маршрутизаторов.

Под Qemu работает весьма широкий класс сетевых, встроенных и мобильных операционных систем: Juniper JunOS, Vyatta, Openwrt, файерволы Cisco IDS, Google Android, Mikrotik RouterOs и др. Наш выбор был сделан в пользу Qemu в составе GNS3.

Нельзя не упомянуть виртуальную машину IOU для Cisco IOS. В ней можно запустить пару операционных систем Cisco IOS с весьма мощной функциональностью, и она не требует такой настрой-

ки, как Dynamips. К сожалению, IOU не обладает графическим интерфейсом.

Следовало определиться, в чём работать: в Windows или в Linux. GNS3 и Qemu задуманы, сделаны и развиваются в Linux. Qemu под Linux поддерживает аппаратную виртуализацию KVM. Qemu под Windows не поддерживает KVM и при запуске нескольких экземпляров Qemu используется только одно ядро центрального процессора, что существенно замедляет работу с большими сетевыми топологиями.

Возникает вопрос выбора дистрибутива Linux. GNS3 написан на Python и требует библиотеки Qt4. После ряда экспериментов с различными дистрибутивами Linux по установке GNS3 из исходных кодов выбор пал на настольную 64-х разрядную версию Ubuntu.

Виртуальная машина Qemu в составе GNS3 под управлением Ubuntu оказалась лучшим выбором для организации виртуальной лаборатории.

Определим операционную систему сетевого устройства для запуска под Qemu. Если потребовать, чтобы устройство поддерживало сетевую технологию MPLS, то выбор сразу сократится: это либо операционная система JunOS фирмы Juniper, либо RouterOS фирмы Mikrotik.

По объёму потребляемых ресурсов JunOS существенно превосходит RouterOS. Например, на процессоре с частотой 2.4 ГГц время загрузки RouterOS версии 5.5 в Qemu под Ubuntu составляет 6 (шесть) секунд, а JunOS версии 10.1R1.8 грузится 80 секунд. При выключенной поддержке KVM время загрузки было в два раза больше. RouterOS требует минимум 64 Мб памяти, JunOS — 512 Мб. Образ диска RouterOS - 40 Мб, JunOS - 2.6 Гб. Мы остановились на операционной системе RouterOS фирмы Mikrotik.

На рис. 1 представлен снимок виртуальной лаборатории по изучению компьютерных сетей.

Для обеспечения непрерывности процесса обучения студентов было решено организовать доступ к виртуальной лаборатории через Интернет. Использовался компьютер с доменным именем lib.dnu.dp.ua, работающий под управлением операционной системы Windows server 2008 R2 Sp1. На этом компьютере активирована роль виртуальных машин HYPER-V. В HYPER-V запущена виртуальная

машина под управлением операционной системы Ubuntu-11.04-desktop-amd64. В Ubuntu установлены GNS3 0.7.4, Qemu 13.0. Доступ к Ubuntu из внешнего мира осуществляется через OpenVPN с использованием RSA-сертификатов.

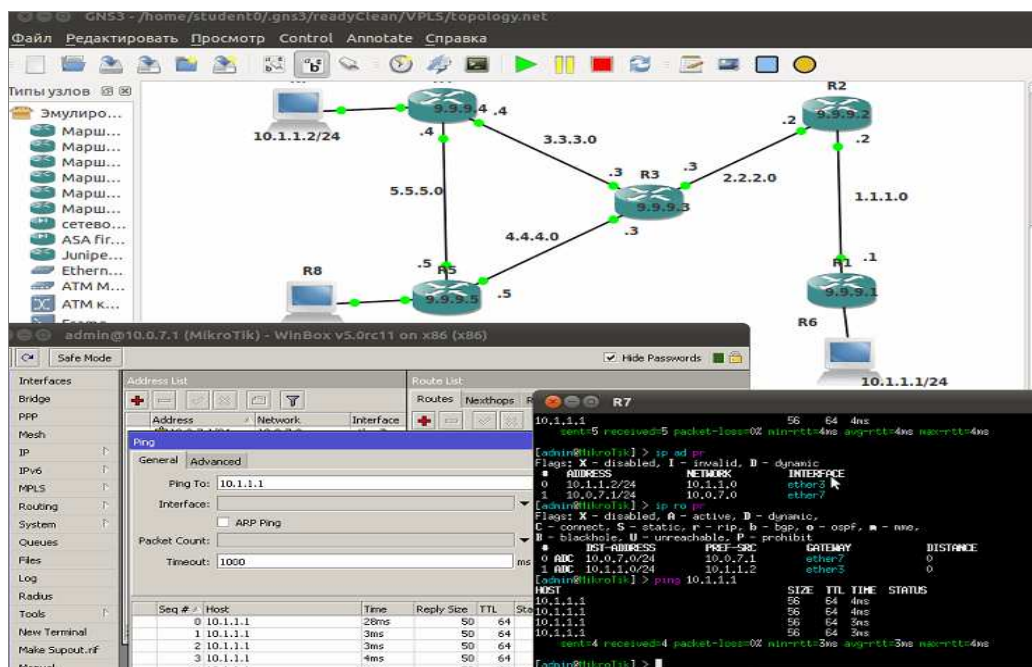


Рисунок 1- Виртуальная лаборатория по компьютерным сетям

Для доступа к окну GNS3 на удалённом рабочем столе Ubuntu используется технология фирмы Nomachine, основанная на X-протоколе. Для удалённого подключения к GNS3 можно использовать и обычный X-сервер для Windows, например Xming. Организована удалённая работа в лаборатории и по протоколу VNC.

Qemu в Ubuntu под управлением HYPER-V работает несколько медленнее, чем Qemu в Ubuntu на реальном компьютере. Это обусловлено, в частности, и тем, что аппаратный ускоритель KVM не работает на виртуальной аппаратуре HYPER-V. Так время загрузки RouterOS в Qemu под Ubuntu в HYPER-V составила 12 секунд против 6 секунд в Qemu под Ubuntu на реальном процессоре частотой 2.4 ГГц. Хост-компьютер HYPER-V имеет 8-ядерный процессор Intel Core i7 950 3066 МГц.

Многоядерность процессоров уменьшает время загрузки нескольких экземпляров RouterOS под управлением Qemu. Так время загрузки 10 экземпляров RouterOS на реальном 2-х ядерном процес-

соре частотой 2.4 ГГц. и виртуальном 4-х ядерном процессоре HYPER-V оказалось одинаковым и равным 30 секундам.

Число одновременно работающих экземпляров RouterOs под Qemu определяется свободной памятью хост-машины. Так выделение для Ubuntu под HYPER-V 8 Гб памяти позволило запустить сто экземпляров RouterOs. При 4-х виртуальных процессорах время загрузки составило 300 секунд.

Связь между хост-машиной Ubuntu и устройствами внутри виртуальной лаборатории осуществляется как через консоль по протоколу Telnet, так и с использованием tap-интерфейсов. Для этой цели в Ubuntu создано несколько сотен tap-интерфейсов. Каналы связи между сетевыми устройствами в сетевой топологии организованы с помощью UDP-протокола. Для избежания конфликтов при одновременном доступе к лаборатории нескольких пользователей получают непересекающиеся диапазоны UDP-портов и TCP-портов для консоли, а также разные наборы tap-интерфейсов. Организована маршрутизация из локального компьютера в запущенные экземпляры RouterOs в Qemu. При плохом качестве связи к lib.dnu.dp.ua пользователь может не использовать удалённый рабочий стол Ubuntu и осуществлять настройку сетевых устройств напрямую с помощью локально запущенных утилит Winbox, которые удалённо подключаются к устройствам в топологии.

Операционная система RouterOs поддерживает практически все современные сетевые технологии. Это позволило разработать лабораторный практикум для изучения следующих сетевых технологий: Ethernet-мосты, DHCP, балансировка нагрузки, EoIP, NAT, маршрутизация RIP, OSPF и BGP, перераспределение маршрутов, PPP, PPTP, SSTP, L2TP, OpenVPN, виртуальные частные сети 2-го и 3-го уровня, IPSec, MPLS, VPLS, VRF. Представляется нереальной комплектация учебной лаборатории вуза реальным сетевым оборудованием, позволяющим практически освоить перечисленные сетевые технологии. С лабораторным практикумом можно ознакомиться на сайте <http://lib.dnu.dp.ua>.

Образ установочного CD операционной системы RouterOs находится на сайте фирмы Mikrotik в свободном доступе, но имеет одно ограничение – время непрерывной работы составляет одни сутки. Этих суток хватает пользователю на несколько лабораторных заня-

тий. По истечении срока пользователи должны сохранить настройки операционных систем RouterOs и сетевую топологию выполняемой лабораторной работы, запустить сохранённую топологию без настроек и восстановить настройки RouterOs. Написаны скрипты, которые соединяются с помощью ssh с устройствами в топологии, посылают в устройства команды для создания или восстановления резервных копий и загружают или выгружают эти копии. Переустанавливать при этом операционную систему RouterOs не надо. Это объясняется тем, что GNS3 при первом старте каждого устройства в топологии создаёт для него копию образа диска заранее установленной операционной системы и не изменяет оригинал.

Для получения RSA-сертификата и тестового доступа к виртуальной сетевой лаборатории следует обратиться к автору и посетить сайт <http://lib.dnu.dp.ua>.

Выводы. Показано, что виртуальная учебная лаборатория по компьютерным сетям может быть создана с помощью виртуальных машин Qemu в оболочке GNS3 с использованием операционной системы RouterOS фирмы Mikrotik.

Виртуальная учебная лаборатория позволяет вместо реальной аппаратуры применять соединённые между собой виртуальные машины, в которых запущены операционные системы сетевых устройств.

АДАПТИВНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ И СИНТЕЗ ФАЗОВЫХ ПОРТРЕТОВ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ В СИНГУЛЯРНОМ БАЗИСЕ ВЛОЖЕННЫХ ВЕКТОРОВ

Аннотация. Исследован новый метод адаптивной фильтрации нелинейных нестационарных систем, не требующий априорной информации о статистических и спектральных характеристиках шумов. Показано преимущество отображения фазовых портретов таких систем в новом информационном базисе, по сравнению с известными вариантами на примерах анализа электрокардиограмм.

Ключевые слова: нелинейная система, сингулярный базис, адаптивная фильтрация, фазовый портрет, электрокардиограмма.

Постановка проблемы. Распространенным методом анализа динамических особенностей нелинейных систем является построение их фазовых портретов в системе координат $\{g(t), dg(t)/dt, d^2g(t)/dt^2\}$ [1]. Проблемой такого подхода является то обстоятельство, что операции вычисления производных чувствительны к шумам, что приводит к необходимости фильтрации. Однако, например, при анализе электрокардиограмм (ЭКГ), отсутствует априорная информация о характеристиках шумов. Помимо измерительных шумов, к ним могут относиться и физиологические шумоподобные компоненты, что не позволяет использовать методы оптимальной фильтрации. На рис. 1а представлен фрагмент ЭКГ, полученный из открытой базы данных “Physionet”, а также его первая и вторая производные.

Вторая производная (рис. 1в) носит шумоподобный характер, что затрудняет ее практическое использование.

Для частичной нейтрализации влияния шумов, во многих работах предлагается характеризовать трехмерную динамику нелинейной системы в координатах $\{g(t), g(t+\tau), g(t+2\tau)\}$, где τ рассматрива-

ется как глубина вложения, определяемая по первому нулю автокорреляционной функции анализируемой характеристики [2]. Однако, в [3] было отмечено, что параметр τ должен изменяться в зависимости от скорости изменения сигнала. Поскольку для ЭКГ характерно наличие участков с существенной разницей в динамике, то применение такого подхода (как показано ниже) так же затруднительно.

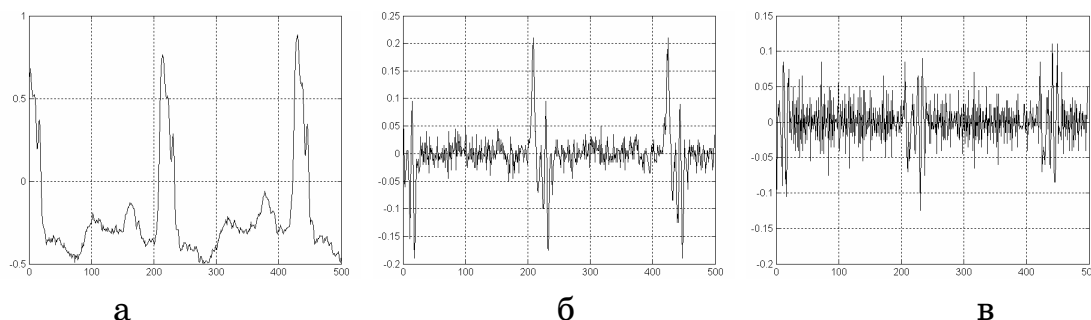


Рисунок 1 – ЭКГ (а) и его первая (б) и вторая (в) производные ($\Delta t=0.004$ сек)

Целью работы является демонстрация информационных возможностей нового метода адаптивной фильтрации ЭКГ, не требующего априорных сведений о спектральных и статистических характеристиках шумов и обеспечивающего синтез устойчивых фазовых портретов в отличие от известных методов.

Основная часть. Структура адаптивного алгоритма включает в себя следующие этапы.

1. Исходя из максимальной протяженности L ожидаемого интервала корреляции (вложения) зашумленной ЭКГ $g(t_i)$ формируется прямоугольная матрица вложенных векторов G анализируемой ЭКГ вида

$$G = \begin{bmatrix} g(t_1) & g(t_2) & \dots & g(t_L) \\ g(t_2) & g(t_3) & \dots & g(t_{L+1}) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ g(t_{N-L+1}) & g(t_{N-L+2}) & \dots & g(t_N) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

размерностью $(N - L + 1) \times L$, причем $N \gg L$.

2. Проводится сингулярное разложение матрицы G [4]

$$G = U W V^T, \quad (2)$$

где $U = [U_1 U_2 \dots U_L]$ – матрица сингулярных векторов размерностью $(N - L + 1) \times L$, формирующая ортонормированный базис пространства натянутого на столбцы матрицы G ; W – диагональная

матрица, элементы которой w_i $i=1,2,...,L$ являются сингулярными числами матрицы G , причем $w_1 \geq w_2 \geq ... w_L \geq 0$. Они являются собственными значениями матрицы $G^T G$, а V – представляет собой ортогональную матрицу размерностью $(L \times L)$.

Следует отметить, что само по себе представление одномерного сигнала в виде (1) с последующим использованием его сингулярного разложения не ново. Впервые оно было использовано в [5] под названием «сингулярный спектральный анализ». Позднее, этот же вариант, под названием метод «гусеница» [6], был использован для задач прогнозирования случайных процессов, а в работе [7], под названием «метод автоморфного отображения», был обобщен для решения задач повышения чувствительности анализа слабоконтрастных изображений. В данной работе рассматривается возможность применения такого подхода для анализа динамики ЭКГ и сравнения его известными методами.

Выяснение информационного аспекта столбцов матрицы U , т.е. сингулярных векторов было проведено на числовой модели. На рис. 2а приведен сигнал, не имеющий шума, его первые три сингулярных вектора (U_1, U_2, U_3), первая и вторая производные.

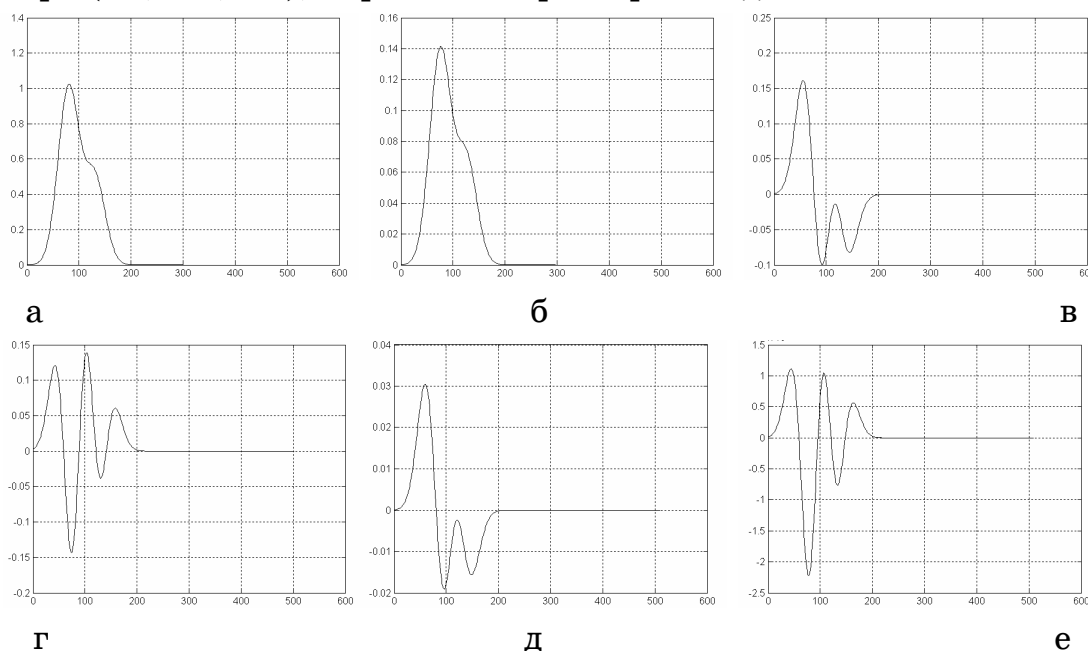


Рисунок 2 – Сопоставление операций сингулярного разложения не зашумленного сигнала (а) с операциями численного дифференцирования: а – сигнал $g(t)$; б – U_1 ; в – U_2 ; г – U_3 ; д – $dg(t)/dt$; е – $d^2g(t)/dt^2$

Из рассмотрения представленных графиков видно, что U_1 подобно исходному сигналу, а U_2 и U_3 – первой и второй производным, соответственно. На рис. 3 представлены результаты эксперимента для сигнала с наличием шумовой составляющей.

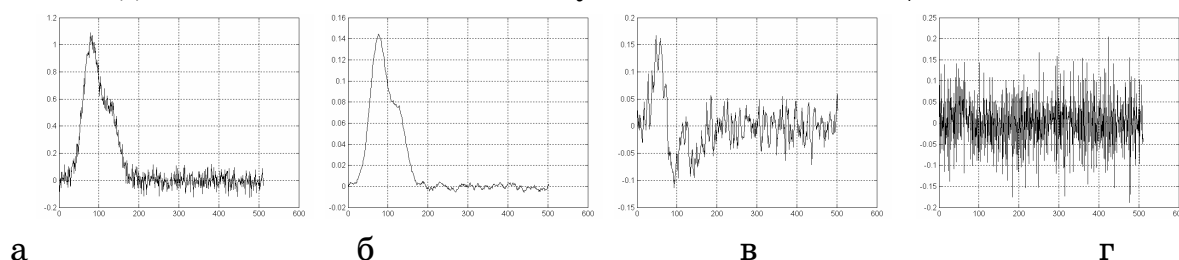


Рисунок 3 – Результат операции сингулярного разложения зашумленного сигнала: а – сигнал $g(t)$; б – U_1 ; в – U_2 ; г – $dg(t)/dt$

Сопоставление рис. 2 а и рис. 3 б показывает, что и в данном случае компонента U_1 соответствует отфильтрованному исходному сигналу. Подчеркнем, что фильтрация осуществлена без использования априорной информации об исходном сигнале и характеристиках шума. Аналогично, можно сделать вывод о соответствии компонент U_2 , U_3 отфильтрованным первой и второй производным исходного сигнала (сравнение рис. 3 в и рис. 2 в, рис. 3 г рис. 2 г).

На рис. 4 представлены первые три сингулярных вектора ЭКГ (рис. 1 а) при выборе глубины вложения $L = 30$.

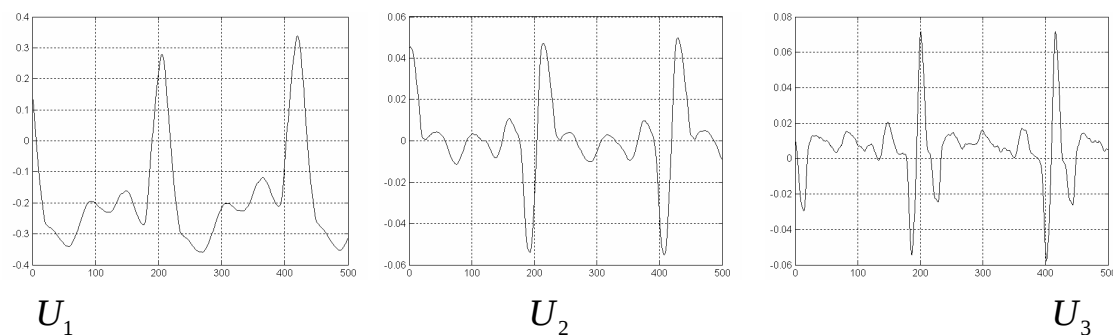
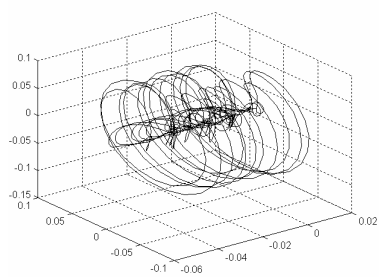


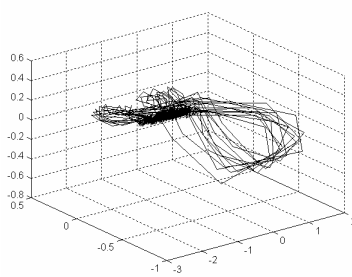
Рисунок 4 – Первые три сингулярные векторы ЭКГ

Сумма нормированных сингулярных чисел этих трех векторов ($\hat{w}_1 = 75.73\%$, $\hat{w}_2 = 17.14\%$, $\hat{w}_3 = 4.09\%$) составляет $\approx 98\%$, т.е. оставшиеся 27 сингулярных векторов отображают лишь 2% особенностей динамики ЭКГ, что позволяет эффективно отображать динамику ЭКГ в системе координат $\{U_1, U_2, U_3\}$.

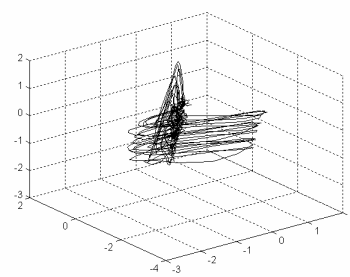
На рис. 5 а в системе координат $\{U_1, U_2, U_3\}$ представлен фазовый портрет аномальной ЭКГ (мерцательная аритмия) в сопоставлении с известными методами в системах координат $\{g(t), dg(t)/dt, d^2g(t)/dt^2\}$ (рис. 5 б) и $\{g(t), g(t+\tau), g(t+2\tau)\}$ для $\tau=6$ (рис. 5 в).



а



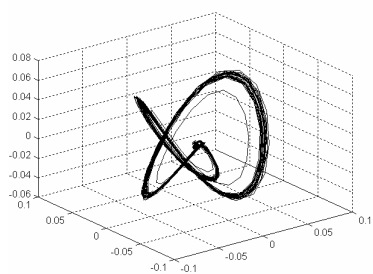
б



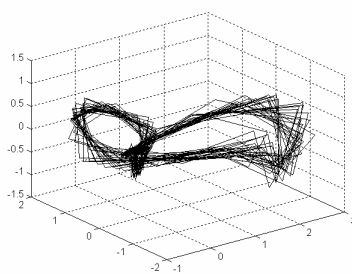
в

Рисунок 5 – Фазовые портреты аномальной ЭКГ в различных системах координат: а – $\{U_1, U_2, U_3\}$; б – $\{g(t), dg(t)/dt, d^2g(t)/dt^2\}$; в – $\{g(t), g(t+\tau), g(t+2\tau)\}$

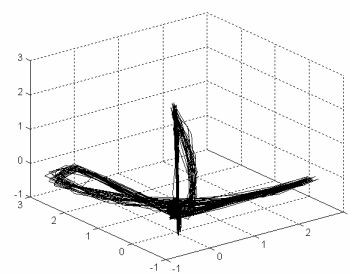
Для сопоставимости, на рис. 6 представлены фазовые портреты нормальной ЭКГ в тех же координатных системах.



а



б



в

Рисунок 6 – Фазовые портреты нормальной ЭКГ в различных системах координат: а – $\{U_1, U_2, U_3\}$; б – $\{g(t), dg(t)/dt, d^2g(t)/dt^2\}$; в – $\{g(t), g(t+\tau), g(t+2\tau)\}$

Сопоставление рис. 5 и рис. 6 показывает, что с точки зрения визуального анализа и качественной интерпретации топологических особенностей фазового портрета ЭКГ система координат $\{U_1, U_2, U_3\}$, обеспечивает большую эффективность по сравнению с известными методами.

Выводы.

1. Предложен новый помехоустойчивый метод адаптивной фильтрации для качественного анализа топологических особенностей динамики ЭКГ в ортонормированном базисе сингулярного разложения вложенных векторов.

2. Метод не требует априорной информации о спектральных и статистических характеристиках шумов.

3. Характерные особенности фазовых портретов ЭКГ проявляются в базисе первых трех сингулярных векторов, при этом первый сингулярный вектор следует рассматривать в виде отфильтрованного исходного сигнала, а второй и третий – результата фильтрации его первой и второй производных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арнольд В.И. Математические методы классической механики / – М.: Наука, 1989. – 472 с.
2. Perc M. Nonlinear time series analysis of the human electrocardiogram // European Journal of Physics. – 2005. – Vol. 26. – P. 757–768.
3. Никульчев Е.В. Идентификация динамических систем на основе симметрий реконструированных аттракторов /– М.: МГУП. –2010. –100 с.
4. Беклемишев Д.В. Дополнительные главы линейной алгебры /– М.: Наука, 1983. – 455 с.
5. Broomhead D. S., King G. P. Extracting qualitative dynamics from experimental data // Physica D. – 1986. – P.217–236.
6. Голяндина Н.Э. Метод «Гусеница»–SSA: анализ временных рядов: Учебное пособие / – СПб.: СПУ, –2004. – 76 с.
7. Ахметшин А.М., Ахметшина Л.Г. Повышение чувствительности анализа рентгеновских снимков методом автоморфного отображения в базисе собственных изображений // Клиническая информатика и телемедицина. – 2008. – Т. 4. – № 5. – С. 30 – 36.

В.Л. Зубов

ТЕРМОКИНЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПЛАВЛЕНИЯ-ЗАТВЕРДЕВАНИЯ ФЕРРОСИЛИЦИЯ РАЗЛИЧНЫХ МАРОК ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Анотація. Викладено результати термодинамічного аналізу плавлення-затверднення зразків ферросиліцію різних марок ФС45, ФС65, ФС70 промислового виробництва методом диференційної скануючої калориметрії (ДСК) та термогравіметрії. Було кількісно оцінено виникаючі під час нагрівання та охолодження термічні ефекти, зумовлені фазовими трансформаціями. Було визначено теплоємність ферросиліцію в температурному інтервалі 20-1350 °С, було проведено порівняльний аналіз температур перетворення у ферросиліції різних марок. Експериментальні криві ДСК було оброблено методом нелінійної регресії з аналізом можливих типів перетворень. Було отримано найбільшу кореляцію експериментальних даних із рівнянням Аврамі-Єрофєєва. Результати проведених досліджень мають важливе значення при виборі температурних параметрів машинної розливки ферросиліцію, а також для теплофізичних розрахунків пічних та позапічних процесів розкислення та легування сталі ферросиліцієм.

Ключові слова: ферросиліцій, термодинамічний аналіз, диференційна скануюча калориметрія, термографія, фазові перетворення, термічні ефекти, теплоємність, лебод, евтектична реакція.

Электротермический ферросилиций по своему химическому составу охватывает широкую концентрационную область диаграммы состояния системы Fe-Si – от 19 до $\geq 92\%$ Si (ДСТУ 4127-2002) [1]. В связи с этим выбор состава ферросилиция, технологии разливки, равно как и использование его в сталеплавильном производстве при раскислении и легировании сталей и сплавов различного функционального назначения, во многом определяются уровнем знаний и наличием надежных термодинамических данных о свойствах ферросилиция каждой марки.

Анализ литературных данных свидетельствует, что диаграмма равновесного состояния системы Fe-Si благодаря фундаментальным исследованиям, выполненным в последние десятилетия конца прошлого века, достаточно полно изучена, хотя ряд вопросов, как-то: составы и типы кристаллических структур соединений, температуры фазовых превращений (прежде всего лебоита) продолжают оставаться дискуссионными [2].

Электротермический ферросилиций промышленной выплавки содержит ряд примесных элементов, среди которых регламентируемыми ДСТУ 4127-2002 являются алюминий, кальций, марганец, хром, титан, фосфор, сера и углерод. Наличие этих элементов оказывает определенное влияние на фазовые превращения в ферросилиции в ходе формирования структуры, развитие ликвационных явлений, выделение избыточных фаз в слитках, а также усиление склонности их к явлению саморассыпания во влажной атмосфере с образованием ядовитых газов фосфина и арсина [3].

Производство ферросилиция имеет экспортно-ориентированный характер, что определяет его марочный состав – преимущественно ФС65 и ФС75 (реже ФС45). В этой связи в настоящей работе исследовали фазовые превращения в ферросилиции «элитных» марок, конкурентоспособных на внутреннем и международных рынках ферросплавной продукции. Использовали образцы коммерческого ферросилиция трех марок текущего производства (табл.1).

Таблица 1

Химический состав образцов промышленного ферросилиция

Марка ферросилиция	Содержание, % мас.							
	Si	Al	Mn	Cr	Ti	Cu	P	S
ФС45	45,5	0,4	0,3	0,4	0,1	0,09	0,03	0,01
ФС65	64,0	0,6	0,2	0,2	0,2	0,09	0,03	0,01
ФС70	72,2	2,3	0,2	0,2	0,2	0,05	0,02	0,01

Фазовые превращения при нагреве (охлаждении) образцов ферросилиция исследовали методом синхронного термического анализа, представляющего собой сочетание методов гравиметрии и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Принцип ДСК заключается в динамическом изменении теплового потока, направленного на исследуемый образец ферросилиция, необходимого для ком-

пенсации разницы температур между образцом и эталоном (сапфиром). В сравнении с аппаратурным оформлением традиционно применяемого дифференциального термического анализа (ДТА) аппаратура для измерения температуры при ДСК имеет специальную конструкцию измерительной части и отличается повышенной чувствительностью.

Цель данной работы – установление температур и энтальпий фазовых превращений (реакций) при нагревании (охлаждении) образцов ферросилиция по химическому составу, относящемуся к концентрационной области FeSi-Si диаграммы состояния системы Fe-Si (рис.1).

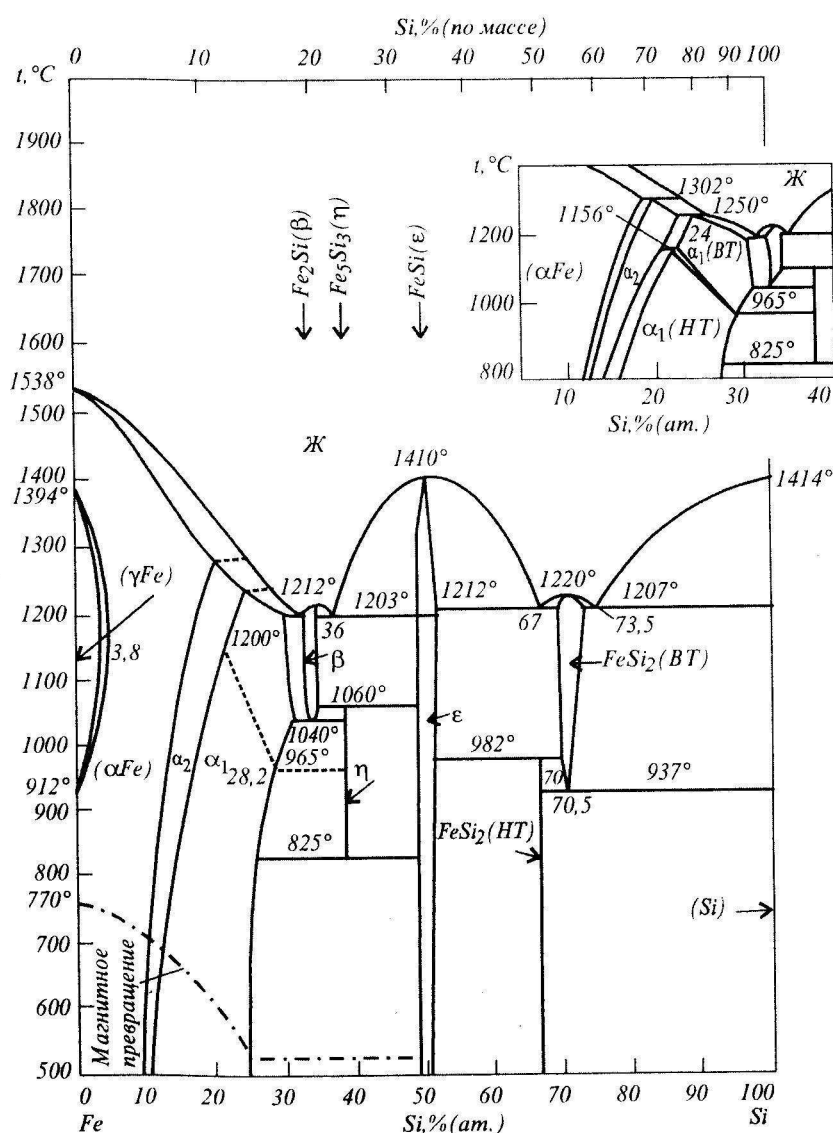


Рисунок 1 - Диаграмма состояния бинарной системы железо-кремний

Исследования выполняли на установке STA449C “Jupiter” (Netzsch Geratedau GmbH, Германия), позволяющей осуществлять синхронный термический анализ с чувствительностью по массе до 0,1 мкг и по энтальпии до 2%. Образцы массой 0,3...0,4 г нагревали в атмосфере чистого аргона в алундовых калиброванных тиглях со скоростью 20 град/мин до температуры 1350⁰С, выдерживали 30 мин и охлаждали со скоростью 5 град/мин, регистрируя изменение массы и температуры. В качестве эталона использовали сапфировый диск с известной теплоемкостью. Экспериментальные данные и корреляционная кривая удельной теплоемкости сапфира в зависимости от температуры, полученные при калибровке прибора, приведены на рис.2. Теоретические значения теплоемкости фаз частной системы FeSi-Si представлены в табл.2.

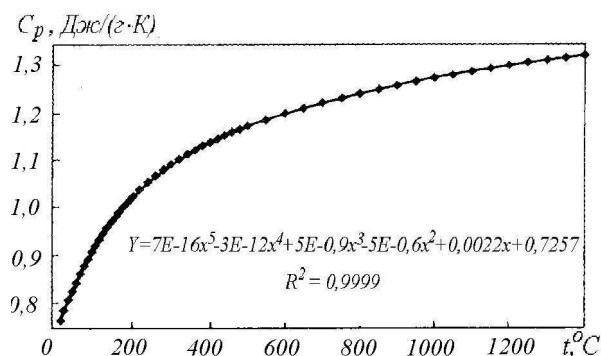


Рисунок 2 - Зависимость удельной теплоемкости сапфира ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) от температуры (значки на корреляционной кривой - экспериментальные данные)

Таблица 2

Теоретические значения удельной теплоемкости (Дж/(г·К)) кремния и силицидных фаз в частной системе FeS-Si

Фаза	$c_p = A + B \cdot 10^3 T + C \cdot T^{-2} + D \cdot 10^{-9} T^2$				
	A	B	C	D	T, K
Si	0,81264	0,13736	-12600	-	298...1685
FeSi _{2,43}	0,60689	-	-	-	298...398
FeSi _{2,33}	0,58282	0,2783	-6799,63	-	298...900
$\beta\text{-FeSi}_2$	0,4946	0,2606	44,635	-	298...900
FeSi	0,4553	0,26714	319,3	-2,44	298...1683

Примечание. База данных HSX 4.04, Outokumpu Research, Finland, TAPP 3.0, ESM Inc., USA.

Теплоемкость образцов ферросилиция определяется по формуле:

$$C_p = \frac{dH}{dT} / m(T(\tau)),$$

где dH – изменение энтальпии;

T – температура;

m – масса образца, которая может зависеть от времени τ и температуры.

Поэтому в соответствии с методом ДСК удельную теплоемкость можно представить выражением:

$$c_p = \frac{m_{std} ДСК_s - ДСК_{base}}{m_s ДСК_{std} - ДСК_{base}} c_{pstd},$$

где индексы «s», «std», «base» – соответственно образец, стандарт и базовая линия; ДСК – сигнал.

Ниже представлены результаты проведенных нами экспериментов и их анализ. Типичные кривые ДСК и термогравиметрии термического анализа ферросилиция ФС45, показаны на рис.3.

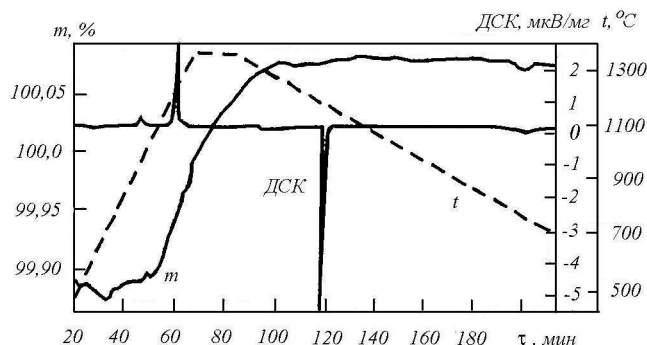
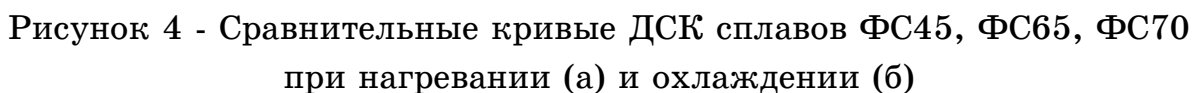


Рисунок 3 - Типичные кривые дифференциальной сканирующей калориметрии – термогравиметрии

Штриховая линия характеризует подъем температуры образцов сплава в алундовом тигле во времени с заданной постоянной скоростью (20 град/мин), изотермическую выдержку в течение 30 мин и охлаждение образца с тиглем со скоростью 5 град/мин. Масса образца ферросилиция увеличивается только на участке нагрева и выдержки, вероятно, за счет окисления сплава, а при охлаждении остается практически постоянной во всем интервале температур от 1200 °С и ниже, о чем свидетельствует горизонтальный участок на кривой m .

На рис.4, а, б представлены сравнительные кривые ДСК всех сплавов при нагревании и охлаждении соответственно. Изменение

Вместе с тем, при охлаждении образцов сплавов с меньшей скоростью (5 град/мин) по сравнению с нагревом проявляется эффект переохлаждения (на 10...40 град), что может быть обусловлено влиянием примесных элементов в ферросилиции на температуры эвтектик, так как температура ликвидус практически совпадает с соответствующими температурами плавления сплавов по данной равновесной диаграмме состояния системы Fe-Si (рис.4, б).



Идентификация пиков на кривой ДСК ферросилиция марки ФС45 позволяет заключить, что сплав претерпевает эвтектическое превращение при нагревании до 1223°C (охлаждении 1166°C) и ликвидусное превращение при $1289...1304^{\circ}\text{C}$ (охлаждении 1288°C). Ферросилиций ФС65 испытывает эвтектическое превращение при нагревании до 1213°C (охлаждении 1176°C). При дальнейшем повышении температуры этот сплав испытывает ликвидусное превращение при 1283°C (охлаждении 1284°C). Практически полное совпадение ликвидуса при нагревании и охлаждении образцов ферросилиция марок ФС45 и ФС65 обусловлено очень малым температурным интервалом превращения солидус-ликвидус, хотя ликвидус промышленного ферросилиция марки ФС65 примерно на 50 град. выше температуры плавления силицида $\text{FeSi}_{2,3}$. Температуры фазовых превращений по данным идентифицированных пиков ДСК для ферросилиция марок ФС45, ФС65 и ФС70 приведены в табл.3.

Таблица 3

Сравнение температур пиков ДСК различных сплавов при нагревании (над чертой) и охлаждении (под чертой)

Возможное превращение	Температура фазового превращения, $^{\circ}\text{C}$			
	ФС45	ФС65	ФС70	По диаграмме состояния (рис.1.1)
Эвтектическое-1	<u>1223</u> 1166	-	-	1212
Эвтектическое-2	-	<u>1213</u> 1176	<u>1212</u> 1160	1207
Ликвидусное-1	<u>1289...1304</u> 1288	-	-	1300
Ликвидусное-2	-	<u>1283</u> 1284	<u>1310</u> 1300	1285(65%) 1310(70%)

В соответствии с частной диаграммой состояния системы FeSi-Si эвтектика-1 представляет собой $\text{FeSi}_{2,3}$ (лебоит)+ FeSi , эвтектика-2 – $\text{Si}+\text{FeSi}_{2,3}$, а ликвидусы 1 и 2 – температуры перехода из двухфазных областей (твердая – жидкая) в жидкое состояние.

На кривых ДСК сплавов ФС45 и ФС70 выявлен ряд пиков, которые не удалось идентифицировать, несмотря на их повторяемость

при последующих нагревах (охлаждениях) образцов. Эти пики связаны с превращением в сплавах в твердом состоянии, хотя один пик 1255°C обнаруживается при нагревании образца сплава ФС45 в двухфазной температурной области.

Прогнозируемые реакции для интерпретации идентифицированных пиков на кривых ДСК для сплавов ФС45 и ФС70 приведены в табл.4.

Термокинетический анализ плавления (затвердевания) ферросилиция. Термокинетический анализ плавления (затвердевания) ферросилиция имеет теоретические и практическое значение и, прежде всего, для выбора температурно-временных параметров разливки сплавов, а также раскисления и для легирования стали.

Таблица 4

Неидентифицированные пики ДСК различных сплавов при нагревании (над чертой) и охлаждении (под чертой)

Возможное превращение	Температура фазового превращения, $^{\circ}\text{C}$	
	ФС45	ФС70
Перитектоидное лебоит $\text{FeSi} \rightarrow \beta\text{-FeSi}_2$	$\frac{-}{753}$	-
Перитектоидное $\beta\text{-FeSi}_2 \rightarrow \text{лебоит} + \text{Si}$	-	$\frac{909}{-}$
Перитектоидное $\beta\text{-FeSi}_2 \rightarrow \text{лебоит} + \text{FeSi}$	$\frac{938}{-}$	-
Обусловлено примесными фазами То же	$\frac{1151}{-}$	-
	$\frac{1255}{-}$	-
	-	-

В литературе не удалось обнаружить результатов подобного термического анализа эвтектических реакций, имеющих место при плавлении (затвердевании) ферросилиция ФС45, ФС65 и ФС70. Для пополнения этих данных в настоящей работе экспериментальные кривые ДСК после необходимой коррекции (нулевой линии прибора и термического сопротивления образца сплава) обработаны методом нелинейной регрессии с анализом возможных типов реакций (первого,

второго и высших порядков, процессов, контролируемых диффузией и т.д.) (рис.5).

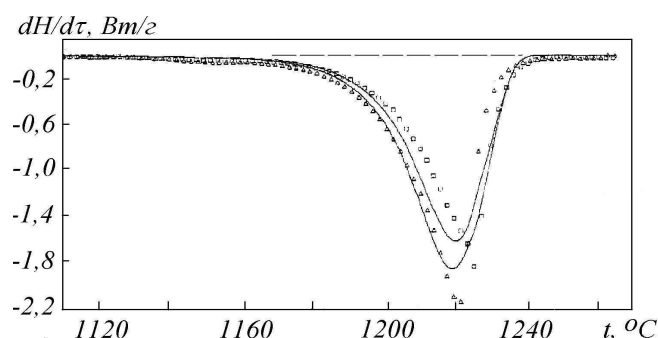


Рисунок 5 - Кинетические кривые плавления двух образцов ферросилиция ФС45: значки – экспериментальные данные; линии – данные оптимизированной модели по уравнению Аврами-Ерофеева

Наибольшая корреляция получена двумя уравнениями Аврами-Ерофеева, отражающими в формальной теории химической кинетики процессы объемной нуклеации:

$$\frac{d[A]}{d\tau} = F \cdot e^{-E/RT} n[A] \left\{ -\ln[A] \frac{n-1}{n} \right\}$$

где $[A] = A/A_0$ – относительная концентрация исходной фазы; n – порядок реакции;

F – предэкспоненциальный фактор;

E – кажущаяся энергия активации эвтектической реакции.

Для данных рис.5 приведенное выше выражение можно записать в виде:

$$\frac{d[A]}{d\tau} = 355 \cdot e^{-13830} [A] \{-\ln A\}$$

с кажущейся энергией активации процесса плавления 115 кДж/моль.

По приведенной методике рассчитана удельная теплоемкость сплава ФС70 (рис.6).

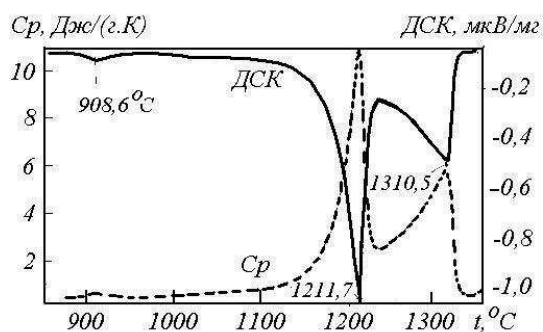


Рисунок 6 - Кривые дифференциальной сканирующей калориметрии и удельной теплоемкости при нагреве ферросилиция марки ФС70

Знание теплоемкости как функции температуры позволяет вычислить энтальпию сплава интегрированием (рис.7).

При анализе определено изменение энтальпии сплава ФС70 для частных реакций «ликвидусная-2», «эвтектическая-2» и «перитектоидная $\beta\text{-FeSi}_2 \rightarrow \text{ле-боит} + \text{Si}$ ». Для этого пики кривой теплоемкости были разделены по методу Фразера-Сузуки [4] с помощью процедуры нелинейной регрессии. В этом методе сигнал аппроксимируется асимметричным пиком по уравнениям:

$$y = A \exp \left[- \ln 2 \left(\frac{\ln \left\{ 1 + 2a(x - x_{\text{реакц}}) / W \right\}}{a} \right) \right];$$

$$S = \frac{\sqrt{\pi}}{2\sqrt{\ln 2}} A \cdot W \exp \left[\frac{a^2}{4\ln 2} \right],$$

где y – сигнал; A – амплитуда; W – полуширина пика; S – площадь пика; a – асимметрия пика; x – текущая координата; $x_{\text{реакц}}$ – положение пика.

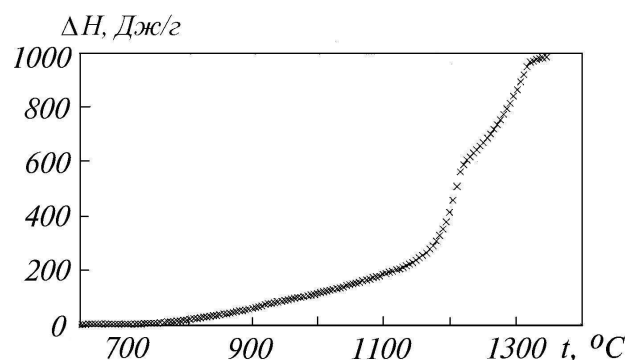


Рисунок 7 - Изменение энтальпии ферросилиция марки ФС70 в зависимости от температуры

Из результатов разделения (рис.8) следует, что пик ликвидуса (пик 3) должен простирается в область достаточно низких температур (менее 800°C).

В сплаве ФС70 присутствует значительное количество первичного кремния (порядка 30% при 1210°C). Уменьшение содержания его и постоянное увеличение теплоемкости в широком интервале температур смещает базовую линию теплоемкости в сторону более высоких значений.

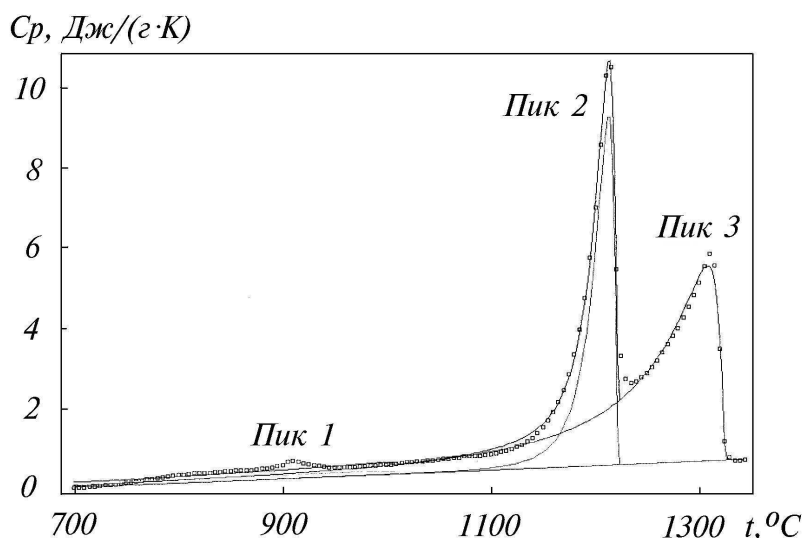


Рисунок 8 - Разделение и интегрирование пиков кривой удельной теплоемкости ферросилиция марки ФС70

Поэтому численные значения оценки энтальпии реакций относятся к 1 грамму сплава, а не к 1 молю:

Пик 1	Перитектоид $\beta\text{-FeSi}_2 \rightarrow \text{лебоит} + \text{Si}$	$\Delta H_1 = -30,6 \pm 13,5 \text{ Дж/г}$
Пик 2	«Эвтектика 2»	$\Delta H_2 = -247,0 \pm 8,4 \text{ Дж/г}$
Пик 3	«Ликвидус 2»	$\Delta H_3 = -504,5 \pm 19,1 \text{ Дж/г}$

Приведенные значения изменения энтальпии являются оценочными, так как априори неизвестно количество первичного кремния и примесей, «инертных» по отношению к исследуемым реакциям. Вместе с тем, установлено, что «эвтектическое-2» и «ликвидусное-2» превращения сопровождаются существенно большими изменениями энтальпии, чем перитектоидное превращение лебоита. Трудности однозначного определения перитектоидного превращения связаны, по-видимому, как с малым тепловым эффектом реакции, так и с невысокой скоростью ее протекания. Косвенная оценка показывает, что, приняв изменение энтальпии при плавлении кремния 50206 Дж/моль и FeSi ~75540 Дж/моль, изменение энтальпии эвтектической реакции составит 44000...47000 Дж/моль. Если учитывать, что эвтектика «лебоит-кремний» расположена очень близко к фазовой области лебоита (рис.1), то практически энтальпия плавления последнего в промышленном ферросилиции составит 41440...42560 Дж/моль.

Выводы. Результаты проведенных исследований имеют важное значение для проектирования технологии машинной разливки ферросилиция, выборе температурных параметров разливки, обеспечивающих больший выход коммерческих классов крупности при фракционировании слитков дробления и рассевом, а также для теплофизических расчетов печных и внепечных процессов раскисления и легирования стали ферросилицием.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гасик М.И., Лякишев Н.П. Физикохимия и технология электроферросплавов. – Днепропетровск: ГНПП «Системные технологии», 2005 г. – 448 с.
2. Magnusson Th., Sigfusson Th, Helgason O. Phase Stability in Silicon Rich Ferrosilicium. 8th Internaional Ferroalloys Congress Proceedings, June 7-10, Beijing, China //China Science, Technology Press, 1998, p.110-115.
3. Гасик М.И., Zubov B.L. Энергодисперсионное рентгеноспектральное исследование фосфор – и мышьяк содержащих избыточных фаз выделения в микроструктуре слитков высокопроцентного ферросилиция // Проблемы специальной электротермии. – 2000. - №4. – С.51 – 63.
4. Селиванова Е.В., Стромберг А.Г., Романенко С.В. Моделирование несимметричных пиков в аналитической химии – каркасная модель несимметричного базового пика Коши-Фразера-Сузуки //Тр. 2-ой Всерос.научн. конф. «Химия и химическая технология на рубеже тысячелетий». – Томск: Изд-во ТГУ. – 2002. – т. 2. – С.160-168.

ПРО РЕГУЛЯРИЗАЦІЮ ФАЗОВИХ ОБМЕЖЕНЬ В ОДНОМУ КЛАСІ ЗАДАЧ ВЕКТОРНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ

Анотація. В роботі досліджується проблема регуляризації обмежень в задачах векторної оптимізації з цільовими відображеннями, які мають ослаблену властивість напівнеперервності знизу та нетілесними впорядковуваними конусами. Введено ослаблене поняття регуляризаторів таких задач, для побудови яких залучаються ідеї векторної оптимізації. Отримано достатні умови існування ефективних регуляризаторів та наведено алгоритм їх побудови.

Вступ. На сьогоднішній день в багатьох практично важливих задачах керування нелінійними системами залучаються ідеї векторної оптимізації. В цій роботі розглядаються задачі векторної оптимізації з такими особливостями: цільове відображення має ослаблену властивість напівнеперервності знизу, впорядковувачий конус є нетілесним, складні обмеження на керування та фазові змінні системи. Властивості цільового відображення та множини допустимих пар породжують нові вимоги до регулярності в таких задачах. В таких умовах неможна стверджувати, що множина допустимих пар в задачі векторної оптимізації є не порожньою. Отже, це вимагає розгляду вихідної задачі як нерегулярної. Таким чином, виникає потреба в розробці конструктивних методів регуляризації таких класів задач. При цьому, якщо задача має регулярні розв'язки (але апіорі ця інформація невідома), то при залученні алгоритма регуляризації, необхідно отримати регулярні розв'язки. Отже, регулярні задачі мають бути включеними до класу задач, які допускають регуляризовані розв'язки.

Регуляризація обмежень в скалярних задачах оптимізації розглядалась, наприклад, в роботі [5], де для знаходження регуляризаторів деяких обмежень розглядались задачі в скалярній постановці.

В цій роботі запропоновано поняття (Λ, μ) -регуляризатора системи обмежень, для знаходження якого залучається задача векторної

оптимізації, що розширює множину таких регуляризаторів і дає можливість більш досконало підійти до пошуку ефективних регуляризаторів множин. Але задачі векторної оптимізації, як правило, набагато складніші за скалярні, що призводить до необхідності дослідження питання існування ефективних регуляризаторів. Отже, основною метою цієї роботи є приведення умов, які гарантують існування ефективного (Λ, μ) -регуляризатора в розглянутому класі задач векторної оптимізації в банахових просторах та наведення алгоритму їх побудови.

Основні поняття та постановка задачі векторної оптимізації. Нехай U – банахів простір керувань, який є дуальним до деякого сепарабельного банахового простору. Нехай X є рефлексивним банаховим простором фазових змінних системи. Будемо вважати, що простір $U \times X$, як топологічний, наділений τ -топологією, в якості якої оберемо добуток $*$ -слабкої топології в U та слабкої топології в X .

Нехай Ξ – непорожня підмножина простору $U \times X$. Нехай є заданим цільове відображення $I : \Xi \rightarrow Z$, де Z – рефлексивний банахів простір з нульовим елементом θ_Z , напіввпорядкований опуклим замкненим загостреним конусом Λ . Будемо вважати, що простір Z наділений μ -топологією, з якою будемо пов'язувати слабку топологію в ньому.

Позначимо частковий порядок в просторі Z , породжений конусом Λ , через $\leq_\Lambda$, що означає наступне:

$$z_1 \leq_\Lambda z_2 \Leftrightarrow z_2 - z_1 \in \Lambda, \quad z_1 <_\Lambda z_2 \Leftrightarrow z_2 - z_1 \in \Lambda \setminus \{\theta_Z\}.$$

Означення 2. [1] $(\Lambda, \tau \times \mu)$ -нижньою границею відображення $I : U \times X \rightarrow Z$ в точці $(u^0, x^0) \in \Xi$ називається наступна множина:

$$\liminf_{(u_k, x_k) \xrightarrow{\tau \times \mu} (u^0, x^0)}^{\Lambda, \mu} I(u, x) = \begin{cases} L_{\min}^{\tau \times \mu}(I, (u^0, x^0)), & L_{\min}^{\tau \times \mu}(I, (u^0, x^0)) \neq \emptyset, \\ \inf^{\Lambda, \mu} L^{\tau \times \mu}(I, (u^0, x^0)), & L_{\min}^{\tau \times \mu}(I, (u^0, x^0)) = \emptyset, \end{cases}$$

де $L_{\min}^{\tau \times \mu}(I, (u^0, x^0)) = L^{\tau \times \mu}(I, (u^0, x^0)) \cap \inf^{\Lambda, \mu} I(\Xi)$.

Означення 3. [1] Цільове відображення $I : U \times X \rightarrow Z$ називається секвенційно $(\Lambda, \tau \times \mu)$ -напівнеперервним знизу в точці (u^0, x^0) , якщо виконується умова $I(u^0, x^0) \in \liminf_{(u, x) \xrightarrow{\tau \times \mu} (u^0, x^0)}^{\Lambda, \mu} I(u, x)$.

Якщо ця властивість виконується в будь-якій точці $(u^0, x^0) \in \Xi$, то таке відображення називають $(\Lambda, \tau \times \mu)$ -напівнеперервним знизу на Ξ .

Розглянемо таку задачу векторної оптимізації:

$$I(u, x) \rightarrow \inf^{\Lambda, \mu}, \quad (1.1)$$

$$(u, x) \in \Xi. \quad (1.2)$$

Означення 4. [1] Пара $(u^*, x^*) \in \Xi$ називається (Λ, μ) -ефективним розв'язком задачі (1.1) – (1.2), якщо виконується умова

$$(I(u^*, x^*) - \Lambda) \cap cl_{\mu} I(\Xi) = \{I(u^*, x^*)\}.$$

Множину всіх (Λ, μ) -ефективних розв'язків задачі (1.1) – (1.2) будемо позначати через $Eff_{\tau \times \mu}(\Xi; I; \Lambda)$, тобто

$$Eff_{\tau \times \mu}(\Xi; I; \Lambda) = \{(u, x) \in \Xi : I(u, x) \in \inf^{\Lambda, \mu} I(\Xi)\}.$$

Про регуляризацію обмежень в задачі векторної оптимізації. Припустимо, що множина допустимих пар Ξ включає в себе складні обмеження на керування та фазові змінні типу нерівностей та включення. Нехай виконуються умови: $\Xi = \Xi_1 \cap \Xi_2 = \emptyset$ та $\Xi_1 \neq \emptyset$. В такому випадку задача (1.1) – (1.2) втрачає сенс. Отже, необхідно перейти до іншої постановки задачі, яка б гарантувала знаходження ефективних розв'язків вихідної задачі на множині Ξ_1 (як правило, вона включає “жорсткі” обмеження, які не можна порушувати), які в свою чергу були б «близькими» в певному сенсі до множини обмежень Ξ_2 .

Означення 5. Систему обмежень Ξ_2 будемо називати I_{Ξ_2} -регуляризовною ($I_{\Xi_2} : U \times X \rightarrow Z$ – векторнозначне відображення), якщо знайдеться така пара $(u^*, x^*) \in \Xi_1$, що $I_{\Xi_2}(u^*, x^*) \in \inf_{(u, x) \in \Xi_1}^{\Lambda, \mu} I_{\Xi_2}(u, x)$ та досяжною, якщо існує така пара $(u^*, x^*) \in \Xi_1$, що $I_{\Xi_2}(u^*, x^*) = \theta_Z$.

Розглянемо регуляризацію системи обмежень Ξ_2 в такому вигляді:

$$\Xi_2 = \{(u, x) \in U \times X : F(u, x) \leq_{\Lambda} \theta_Z\}, \quad (2.1)$$

де $F : U \times X \rightarrow Z$ – неперервне відображення відносно τ -топології в просторі $U \times X$ та μ -топології в просторі Z .

Введемо до розгляду оператор $\mu : Z \rightarrow Z$:

$$\mu(F) = |F(u, x)| + F(u, x). \quad (2.2)$$

Ясно, що оператор $\mu(F)$ задовольняє умовам:

- а) $\mu(F) = \theta_Z$, якщо $(u, x) \in \Xi_2$;
- б) $\mu(F) \geq_{\Lambda} \theta_Z$, якщо $(u, x) \in \Xi_2$.

Зауважимо, що внаслідок властивостей модуля та відображення $F : U \times X \rightarrow Z$ оператор $\mu(F)$ є неперервним відносно τ -топології в просторі $U \times X$ та μ -топології в просторі Z .

Розглянемо задачу векторної оптимізації:

$$\mu(F(u, x)) \rightarrow \inf^{\Lambda, \mu}, \quad (2.3)$$

$$(u, x) \in \Xi_1. \quad (2.4)$$

Зауваження 1. Якщо в задачі (2.3) – (2.4) в якості цільового відображення розглянути $F(u, x)$, то це може привести до того, що в множину $Eff_{\mu}(\Xi_1; F; \Lambda)$ можуть потрапити як ті елементи, які задовольняють обмеженням (2.1), так і навпаки. В якості прикладу можна розглянути наступний. Нехай $Eff_{\mu}(\Xi_1; F; \Lambda) = \{(\tilde{u}, \tilde{x}), (u^*, x^*)\}$ та $F(\tilde{u}, \tilde{x}) = 2 \sin x$, $F(u^*, x^*) = -1$. Легко бачити, що $(\tilde{u}, \tilde{x}) \notin \Xi_2, (u^*, x^*) \in \Xi_2$, але $F(\tilde{u}, \tilde{x}) \not\geq_{\Lambda} F(u^*, x^*)$. Це свідчить про необхідність використання оператора $\mu(F)$ для регуляризації системи обмежень Ξ_2 .

Залучаючи теорему 3 з роботи [1], маємо такий результат.

Теорема 1. Нехай Ξ_1 є обмеженою τ -замкненою підмножиною простору $U \times X$. Нехай простір Z є напіввпорядкованим замкненим опуклим загостреним конусом Λ та цільове відображення $\mu : U \times X \rightarrow Z$ є неперервним відносно τ -топології в просторі $U \times X$ та μ -топології в просторі Z на множині Ξ_1 . Тоді задача векторної оптимізації (2.3) – (2.4) є розв'язною та $Eff_{\mu}(\Xi_1; \mu; \Lambda) \neq \emptyset$.

Означення 6. Пару $(u^*, x^*) \in \Xi_1$ будемо називати (Λ, μ) -регуляризатором множини Ξ_2 , якщо виконується умова:

$$\mu(F(u^*, x^*)) \in \inf_{(u, x) \in \Xi_1}^{\Lambda, \mu} \mu(F(u, x)).$$

Позначимо сукупність всіх регуляризаторів множини Ξ_2 через $\mathfrak{R}$. Взявши до уваги означення 6, маємо: множина $\mathfrak{R}$ співпадає з множиною (Λ, μ) -ефективних розв'язків задачі (2.3) – (2.4).

Означення 7. (Λ, μ) -регуляризатор $(\tilde{u}, \tilde{x}) \in \Xi_1$ множини Ξ_2 будемо називати ефективним, якщо виконується умова:

$$I(\tilde{u}, \tilde{x}) \not\prec_{\Lambda} I(u, x), \quad \forall (u, x) \in \mathfrak{R}. \quad (2.5)$$

Нехай елемент y є довільним елементом множини $\inf_{(u, x) \in \Xi_1}^{\Lambda, \mu} \mu(F(u, x))$. Для знаходження такого елемента можна скористатись відомим результатом.

Теорема 2. [2] Нехай U, X, Z - банахові простори та множина Ξ_1 є непорожньою множиною простору $U \times X$. Нехай $I : \Xi_1 \rightarrow Z$ - задане цільове відображення (не обов'язково $(\Lambda, \tau \times \mu)$ -напівнеперервне знизу). Якщо існує така пара $(u^*, x^*) \in \Xi_1$ та елемент $\lambda \in \Lambda_0^*$, що виконується умова:

$$(u^*, x^*) \in \underset{(u, x) \in \Xi_1}{\operatorname{Arg\,min}} \langle \lambda, I(u, x) \rangle_{Z^*; Z},$$

то $(u^*, x^*) \in \operatorname{Eff}_{\tau \times \mu}(\Xi_1; I; \Lambda)$.

Введемо до розгляду відображення $\beta : Z \rightarrow R$ наступного вигляду:

$$\beta(\mu) = \inf_{\substack{y = \mu(\hat{u}, \hat{x}) \\ (\hat{u}, \hat{x}) \in \mathfrak{R}}} \|\mu(F(u, x)) - y\|_Z. \quad (2.6)$$

Приведемо без доведення відомий результат [3].

Теорема 3. Нехай V є банаховим простором та $Z = V^*$. Якщо $u_k \rightarrow u$ слабо в просторі Z , то виконуються такі умови:

- 1) послідовність $\{u_k\}_{k=1}^{\infty}$ є обмеженою в Z ;
- 2) $\liminf_{k \rightarrow \infty} \|u_k\|_Z \geq \|u\|_Z$, тобто норма є напівнеперервною знизу

відносно топології слабкої збіжності в просторі Z .

Враховуючи властивість неперервності відображення $(u, x) \mapsto \mu(F(u, x))$ відносно τ -топології в просторі $U \times X$ та μ -топології в просторі Z та залучаючи теорему 3, маємо: відображення $\beta(\mu)$ є напівнеперервним знизу відносно τ -топології в просторі $U \times X$.

Для знаходження ефективних (Λ, μ) -регуляризаторів множини Ξ_2 пропонується розглянути наступну послідовність задач векторної оптимізації зі «штрафом»:

$$I_\varepsilon(u, x) = I(u, x) + \varepsilon^{-1} \beta(\mu)b \rightarrow \inf^{\Lambda, \mu}, \quad (2.7)$$

$$(u, x) \in \Xi_1. \quad (2.8)$$

Залучаючи результати, отримані в роботі [4], та проводячи аналогічні дослідження, маємо наступний результат:

Теорема 4. Нехай U, X, Z - банахові простори та множина Ξ_1 є непорожньою τ -компактною множиною простору $U \times X$. Нехай $I : \Xi_1 \rightarrow Z$ задане $(\Lambda, \tau \times \mu)$ -напівнеперервне знизу цільове відображення та $\beta : \Xi_1 \rightarrow R$ секвенційно напівнеперервне знизу відносно τ -топології простору $U \times X$. Нехай простір Z частково впорядковано опуклим замкненим загостреним конусом Λ . Тоді задача (1.1) – (1.2) має непорожню множину ефективних (Λ, μ) -регуляризаторів множини Ξ_2 .

За аналогією з вищеприведеними результатами, для регуляризації обмежень типу $(u, x) \in \Xi_2$ достатньо залучити неперервний оператор $\mu : \Xi_1 \rightarrow Z$, який задовольняє умовам:

$$\text{а) } \mu(u, x) = \theta_Z, \text{ якщо } (u, x) \in \Xi_2;$$

$$\text{б) } \mu(u, x) \geq_\Lambda \theta_Z, \text{ якщо } (u, x) \in \Xi_2;$$

Для знаходження ефективних (Λ, μ) -регуляризаторів в задачі (1.1) – (1.2) необхідно розглянути послідовність задач (2.7) – (2.8) при $\varepsilon \rightarrow 0$.

Висновки. Для задач векторної оптимізації з $(\Lambda, \tau \times \mu)$ -напівнеперервним знизу цільовим відображенням та нетілесним впорядкованим конусом запропоновано метод регуляризації обмежень типу нерівностей та включень. Введено поняття (Λ, μ) -регуляризатора

системи обмежень. Приведені умови, які гарантують існування ефективного (Λ, μ) -регуляризатора в розглянутому класі задач, наведено алгоритм їх побудови.

ЛІТЕРАТУРА

1. Kogut P.I. On the existence of efficient solutions of vector optimization problems in Banach spaces / P.I. Kogut, R. Manzo, I.V. Nechay// Диференціальні рівняння та їх застосування. – 2008 - № 5 – с. 105 - 121.
2. Kogut P.I. Topological Aspects of Scalarization in Vector Optimization Problems / P.I. Kogut, R. Manzo, I.V. Nechay// Australian Journal of Mathematical Analysis and Applications. – 2010 – 7(2) – с. 25-49.
3. Когут О.П. Оптимізація в нелінійних еліптичних крайових задачах / О.П. Когут, П.И. Когут, Рядно О.А.// Монографія. – Дніпропетровськ: ДДФА, 2010.-236с.
4. Нечай І.В. Про розв'язність і регуляризацію задач не скалярної оптимізації в банахових просторах: дис. канд. фіз.-мат. наук:01.05.01/Нечай Ігор Вікторович. Дніпропетровськ, 2009. – 137с.
5. Иваненко В.И. Вариационные методы в задачах управления для систем с распределенными параметрами / В.И. Иваненко, Мельник В.С.// – Київ: Наук. думка, 1988. - 288с

Ю.А. Митиков

СИСТЕМНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРЕДПУСКОВОГО НАДДУВА БАКОВ С КИСЛОРОДОМ

Аннотация. Проведено системное расчетно-экспериментальное исследование системы предпускового наддува цилиндрического бака с жидким кислородом I ступени носителя на трех установках. Получены результаты по прогреву верхнего слоя кислорода, степени восстановления паров, скорости ввода газа в бак. Сформулированы предложения по совершенствованию системы.

Ключевые слова: предпусковой наддув, гелий, кислород, прогрев, восстановления паров, скорость ввода.

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими задачами

В настоящее время космическая индустрия в мире стремительно развивается. Все больше стран стремятся оказывать услуги по запуску самых разнообразных космических аппаратов. В связи с возрастающей конкуренцией в этой сфере все большее значение приобретают работы системного характера, направленные на совершенствование систем ракет-носителей (РН) в комплексе, в том числе и со стартовой позицией. Именно такой подход сегодня может позволить снизить стоимость выведения в космическое пространство объектов различного назначения.

В качестве окислителя для ЖРД современных РН наибольшее распространение находит (и будет находить в обозримом будущем) жидкий кислород (как правило, в паре с углеводородным горючим типа керосин, далее – РГ-1). Для наддува топливных баков с кислородом во всем мире наибольшее распространение нашел гелий. Гелиевые газобаллонные системы наддува (СН), несмотря на конструктивную сложность и достаточно большую массу [1], на сегодняшний день являются наиболее изученными, в силу чего для проектирования не требуют высокого уровня разработчиков. Учитывая развитую индустрию гелия, построенные космодромы с хранилищами для него, РН,

использующие гелий для наддува, это рабочее тело будет использоваться еще достаточно долго. Хотя ожидать заметного улучшения параметров этих систем и не приходится [2], однако поле для совершенствования, локальных улучшений конструкции СН тут еще достаточно велико.

Анализ последних исследований и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и на что опирается автор

Предпусковой наддув (ПН) баков, как известно [3], служит для обеспечения потребных давлений компонентов топлива на входе в двигатель при его запуске. Сегодня в ряде случаев выдвигается требование поддержания потребного давления газа в баках от момента запуска ЖРД и до начала движения РН с целью экономии гелия, запасенного на борту в баллонах высокого давления. Результаты проведения ПН являются исходными данными для расчетов и проектирования полетных СН.

ПН баков с кислородом (и с керосином) двигательных установок (ДУ) проводится, как правило, из наземных хранилищ космодромо-в, гелием с температурой окружающей среды. Потребное давление газа в баках контролируется в большинстве случаев сигнализаторами давления, которые через систему управления отключают (включают) расход гелия на наддув с помощью, в большинстве случаев, ЭПК. При такой постановке задачи проблемных вопросов расчетного характера по предпусковому наддуву бака с РГ-1 нет в силу незначительности температурного напора между гелием в свободном объеме бака и граничными поверхностями и мизерностью испарения горючего с его поверхности.

Иная картина наблюдается при ПН бака с жидким кислородом, который размещается, как правило, в цилиндрических нетеплоизолированных баках. После закрытия дренажного клапана окислителя и прекращения подпитки жидкий кислород в баке начинает прогреваться, растет давление его насыщенных паров. Гелий с температурой окружающей среды, введенный с определенной скоростью в бак с криогенным окислителем, способствует испарению кислорода, отдает тепло в граничные поверхности, прогревает верхний слой кислорода, остывает сам, уменьшая давление газа в свободном объеме бака.

Известные работы на эту тему [3], [4], [5] в силу ряда причин носят сугубо общий несистемный характер, рассматривая, как правило, только термодинамическую проблему наполнения емкости постоянного объема смесью газов известным расходом. Из каких соображений выбирать расход гелия на наддув, с какой скоростью и в каком направлении целесообразно его вводить в бак, сколько времени отводить на ПН, какова скорость восстановления давления насыщенных паров, каков прогрев кислорода – эти вопросы в технической литературе не освещены. А, например, ошибка в 1⁰С при определении температуры кислорода на момент старта РН для такой перспективной системы как самонаддув приводит к увеличению конечной массы газа в баке на ~ 110 кг за счет уменьшения рабочих запасов окислителя.

Постановка задачи исследований

Целью расчетно-экспериментальных исследований является выработка практических рекомендаций по системному определению основных параметров ПН, именно тех, на которые у разработчика есть определенная степень влияния. К таким параметрам следует отнести - время предпускового наддува, потребный расхода гелия на наддув, скорость и направление ввода газа наддува в бак, скорость испарения кислорода и его прогрев за время ПН. С учетом полученных рекомендаций целесообразно системно рассмотреть более простые варианты построения системы ПН с учетом конструкции газобаллонной системы полетного наддува.

Изложение основного материала исследования с полным обоснованием полученных научных результатов

Для изучения рассматриваемого вопроса были при общем подходе проведены три группы испытаний на экспериментальных модельных установках диаметрами 3,0, 2,1 и 1,25 м [6]. Материал всех баков – алюминиевый сплав. Верхнее и нижнее днища всех баков снабжены теплоизоляцией. Установки с меньшими диаметрами имели в своем составе газодинамические имитаторы внешнего теплоподвода.

Последовательность операций при всех испытаниях была одинаковой – заправка установки кипящим кислородом до требуемого уровня, стоянка с открытым дренажным клапаном (ДК) для выравнивания начального температурного профиля кислорода в баке, за-

крытие ДК (начало ПН) и ввод гелия с температурой окружающей среды в бак до настройки сигнализатора требуемого давления. Далее система управления с помощью сигнализатора давления поддерживала потребное давление газа в баке путем включения (отключения) расхода гелия на наддув. Гелий на разных экспериментах вводился в бак с разной скоростью.

Установки были оснащены системой измерения. Измерялись уровень кислорода в баке, давление газа в баке, температура верхнего днища бака, температура газа в баке (в объеме) и над уровнем кислорода с помощью поплавкового устройства. Поплавковое устройство позволяло измерять также температуру верхнего слоя топлива.

Основные результаты экспериментальных исследований сводятся к следующему. При вводе гелия в бак с любой скоростью давление в свободном объеме бака нарастало плавно без скачков. После прекращения наддува давление газа в баке плавно уменьшалось, что приводило к нескольким включениям системы ПН (до десяти).

При вводе гелия вдоль продольной оси бака со звуковой скоростью ($w \approx 880$ м/с) эффективная работоспособность газа в баке получена на уровне $(RT)_{эф} = 30410^4$ Дж/кг. С уменьшением скорости ввода газа до ~ 30 м/с работоспособность газа увеличивалась до 55410^4 Дж/кг. Аналогичная тенденция прослеживалась и при использовании в качестве рабочего тела наддува азота и паров кислорода.

Объяснить такую зависимость работоспособности газа от скорости его ввода можно интенсивным теплообменом в кратере на поверхности кислорода, который образует струя газа. Есть и второй механизм, который уменьшает работоспособность газа при его вводе в бак с большой скоростью. За счет мощной эжекции струя гелия подсасывает большое количество кислорода из свободного объема бака. При интенсивном внедрении струи в верхний слой топлива (т.н. третий режим [7]) часть паров конденсируется внутри жидкого кислорода, увеличивая прогрев верхнего слоя и уменьшая количество рабочего тела в свободном объеме бака.

Полученные результаты позволяют сформулировать выводы для выбора скорости и направления ввода гелия в бак при ПН (а также и вначале работы системы полетного наддува в виду идентичности условий). Гелий (а равно и кислород с азотом) целесообразно

вводить в бак с незначительной скоростью (по гелию до ~30 м/с). В этом случае направление его ввода не является принципиальным.

За время от закрытия дренажного клапана и до запуска ДУ (~120с) прогрев верхнего слоя кислорода в баке от газа наддува и внешнего теплоподвода достигал 2⁰С. Эта величина реализовалась при минимальной влажности окружающего воздуха и максимальной скорости ветра (максимальном аэродинамическом потоке). Полученные результаты свидетельствуют о том, что время ПН (продолжительность стоянки с закрытым дренажным клапаном) целесообразно максимально сокращать.

Расчетные исследования с помощью полученных экспериментальных данных показывают, что за время с момента закрытия ДК и до запуска двигателя (~100 ч 120с) в свободном объеме бака происходит практически полное восстановление паров кислорода, соответствующее температуре его верхнего слоя.

Расход гелия при ПН целесообразно выбирать из условия достижения за отведенное время потребного давления газа в баке при максимальном начальном свободном объеме газа в баке и минимальном входном давлении теплого гелия на входе в носитель. Желательно учитывать при выборе расхода гелия и поддержания с его помощью постоянного давления газа в свободном объеме бака при работе двигателя на предварительной ступени до выхода на режим системы полетного наддува.

Полученные результаты по прогреву кислорода и, как следствие, восстановлению его паров, ухудшающие характеристики РН, приводят к мысли о проведении ПН бака с кислородом (и с РГ-1) холодным гелием через гелиевые газобаллонные системы полетного наддува. В этом случае из состава пневмогидравлической системы I ступени носителя исключается вся линия теплого гелия, а логика ее работы до старта переносится на систему полетного наддува. Упрощается обслуживание носителя и стартовая позиция. При этом заправку баллонов холодным гелием необходимо продлить до срабатывания контактов подъема РН (аналогично системе теплого гелия). В этом случае, при прочих равных условиях, уменьшится и прогрев верхнего слоя кислорода в баке, и количество паров в начальном объеме бака. До старта носителя произойдет проверка работоспособности системы полетного наддува. И главное, в этом случае можно существенно со-

кратить время ПН, т.к. минимальное давление зарядки баллонов почти в два раза выше минимального входного давления в системе теплого гелия ($220^{+10} \cdot 10^5$ Па и $130 \cdot 10^5$ Па соответственно).

Выводы из данного исследования

Проведенные на трех модельных установках системные исследования параметров системы предпускового наддува гелием баков с жидким кислородом позволили получить необходимые соотношения для основных влияющих факторов. Сформулированы рекомендации о целесообразности ввода гелия в свободный объем бака при предпусковом наддуве (а также первые секунды полетного наддува) с небольшой скоростью (для гелия ~ 30 м/с). Направление его ввода в бак в таком случае не является критичным.

За время с момента закрытия дренажного клапана и до срабатывания контактов подъема (исследованное время ~ 120 с) в нетеплоизолированных баках с кислородом прогрев верхнего слоя окислителя может составить 2°C , а восстановление паров 100%. Эти результаты являются исходными данными для расчета параметров системы полетного наддува. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что время предпускового наддува целесообразно сокращать до минимума.

Предложен способ предпускового наддува баков через систему полетного наддува холодным гелием. Это позволит заметно упростить систему наддува и проверить ее до старта носителя. Для этого логику работы системы предпускового наддува до старта надо сохранить прежнюю, но распространить ее на исполнительные органы системы полетного наддува. В этом случае можно почти в два раза сократить время предпускового наддува в силу того, что минимальное давление зарядки баллонов на практике, как правило, почти в два раза больше минимального давления в системе теплого гелия. При сокращении потребного времени на наддув и переходе на холодный гелий уменьшится прогрев верхнего слоя кислорода и количество испарившегося кислорода в начальный газовый объем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Митиков Ю.А. Газобаллонные системы наддува и ракеты-носители нового поколения [Текст] / Митиков Ю.А. // Космическая техника. Ракетное вооружение. – Д.: ГП КБ Южное, 2012. – №1. – С. 179 – 185с.
2. Мітіков Ю.О. Надхолодне польотне наддування баків з вуглеводневим пальним ракет-носіїв [Текст] / Мітіков Ю.О. // Системи озброєння та військова техніка. – Х.: ХУПС, 2012. – №Х. – С. xx – уу.
3. Челомей, В.Н. Пневмо-гидравлические системы двигательных установок с жидкостными ракетными двигателями [Текст] / В.Н. Челомей, Д.А. Полухин, Н.Н. Миркин, В.М. Орещенко и др. М.: Машиностроение, 1978. – 240с.
4. Козлов А.А. Системы питания и управления жидкостных ракетных двигательных установок [Текст] / А.А. Козлов, В.Н. Новиков, Е.В. Соловьев. М.: Машиностроение, 1988. – 352с.
5. Беляев Н.М. Системы наддува топливных баков ракет [Текст] / Н.М. Беляев. М.: Машиностроение, 1976. – 336с.
6. Методика расчета и моделирования параметров систем наддува бака окислителя I ступени РН «Зенит» [Текст] : техн. отчет / Д.: КБ Южное; рук. Кучма Л.Д. – ОТ 21.5691.123; Инн. 49989кб, 1983. – 64с.
7. Митиков Ю.А. К вопросу определения диаметра кратера при взаимодействии струи газа с жидкой фазой [Текст] / Ю.А. Митиков, Л.В. Пронь // Известия вузов. Чёрная металлургия. – М.: МИСИС, 1981. – №3. – С.45 – 47.

ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЗАТВЕРДЕВАЮЩИЙ МЕТАЛЛ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИИ ПЛАВАЮЩЕЙ ПРИБЫЛЬНОЙ ВСТАВКИ

Представлено описание и проведен анализ особенностей применения разработанных специализированных устройств для осуществления газодинамического воздействия на затвердевающий в литейной форме металл крупных отливок.

Ключевые слова: газодинамическое воздействие, технология, устройство, конструкция.

Введение. В существующих способах литья большая часть нагрузок, связанных с используемым давлением, реализуется за счет прочности литейной формы, или емкости, в которой она находится, что существенно ограничивает возможный диапазон давления и массу отливок. При реализации технологии газодинамического воздействия нарастающее газовое давление в герметизированной за счет металла, находящегося в литейной форме, системе «отливка – устройство для ввода газа», подается через жидкую фазу к фронту кристаллизации вплоть до полного затвердевания.

Анализ предыдущих публикаций. Технология газодинамического воздействия может применяться для получения литых заготовок различной конфигурации, изготавливаемых из разных сплавов, как в постоянных, так и в разовых формах [1 - 3, 5, 7, 8].

Для осуществления технологии разработаны устройства, конструктивно учитывающие специфику способа литья, конфигурацию, материал и массу отливки [4, 6]. При этом, все варианты устройства предполагают наличие основных элементов, таких как газопровод, холодильник и система регулирования подачи сжатого газа. При этом давление в течение всего процесса затвердевания передается непосредственно жидкой фазе внутри отливки.

Целью работы является анализ конструктивных особенностей и технологических особенностей применения разработанных устройств для осуществления газодинамического воздействия на металл, затвердевающий в крупных литейных формах.

Основной материал. При литье крупных отливок или слитков с высокой продолжительностью затвердевания особенно необходимо максимально полно использовать резерв перегрева расплава в прибыльной зоне. При этом конфигурация (конструкция) холодильника должна не только обеспечивать герметизацию системы отливка-устройство для ввода газа, но и утепление максимально возможного объема металла в прибыли.

Схема конструкции, предусматривающая использование плавающей вставки из огнеупорного материала, представлена на рисунке 1.

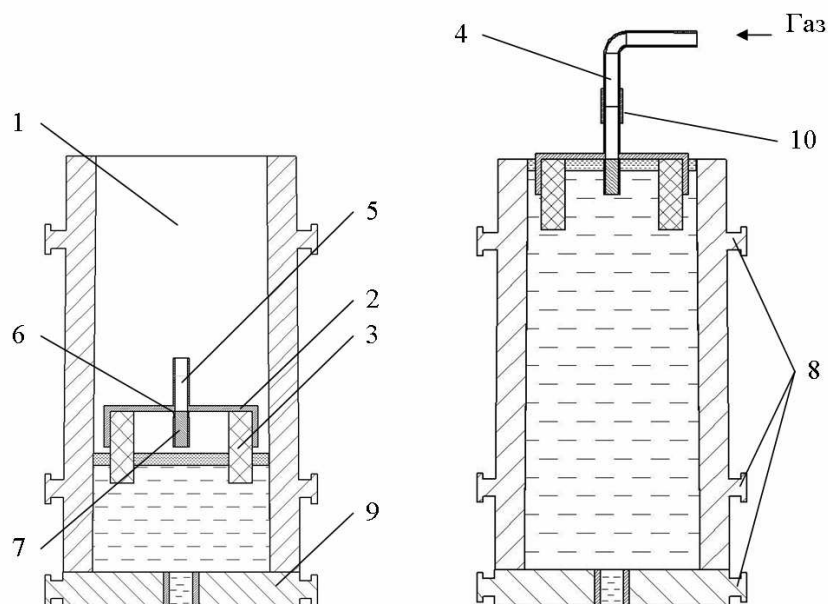


Рисунок 1 - Схема устройства с плавающей вставкой из огнеупорного материала (пояснения в тексте)

Устройство состоит из литейной формы 1, металлического корпуса 2, вставки из огнеупорного материала 3, которая расположена в металлическом корпусе, газопровода 4, соединенного с системой внешнего обеспечения газом высокого давления (на схеме не показана). Металлический корпус оборудован осевым газоподающим патрубком 5 со сквозными отверстиями 6, расположенными непосредственно под внутренней поверхностью верхней стенки металлического корпуса, а торец и отверстия газоподающего патрубка перекрыты га-

зопроницаемой пробкой 7. Газопроницаемая пробка выполняется из пористого огнеупорного материала. На литейной форме предусмотрены цапфы 8. Форма расположена на поддоне 9. Газопровод и газоподающий патрубок соединены между собой муфтой 10.

Работа устройства осуществляется следующим образом. Собирают устройство и размещают его в литейной форме 1, фиксируя его положение на определенном расстоянии от дна рабочей полости литейной формы. Далее начинают заливку. При подъеме уровня расплава в форме происходит погружение вставки из огнеупорного материала в слой теплоизолирующей засыпки, а затем и в расплав под действием собственной массы и массы металлического корпуса, при этом, металлический корпус на протяжении процесса заполнения формы не погружается в жидкий металл, а находится выше уровня поверхности теплоизолирующей засыпки. В конце заполнения литейной формы расплавом в прибыльной зоне устройство останавливается и металлический корпус погружается в расплав, после этого прекращают заливку и в этом положении выдерживают в течение времени, необходимого для осуществления герметизации системы отливки - элементы подачи газа. После этого к газоподающему патрубку 5 с помощью муфты 10 присоединяют газопровод 4 и подают сжатый газ. На жидкий и кристаллизующийся металл оказывается газодинамическое воздействие по выбранному режиму вплоть до полного затвердевания отливки. После затвердения отливки подачу сжатого газа прекращают и систему соединяют с атмосферой, чем выравнивают давление в литейной форме с атмосферным.

На рисунке 2 представлена схема варианта конструкции устройства для осуществления комбинированной технологии газодинамического воздействия и электрошлакового обогрева (КТГВЭШО) прибыльной части отливки или слитка.

Устройство для реализации способа состоит из металлического корпуса 1, электродов 2 (графитовых), оборудованных контактными элементами 3, которые вместе с электродами свободно двигаются вдоль металлических токопроводящих стержней 4, на которых закреплены шайбы 5. Токопроводящие стержни герметично крепятся к металлическому корпусу с помощью электронепроводных прокладок 6, шайб 7 и гаек 8. Электроды оборудованы насадками 9 из электронепроводного огнеупорного материала. Во вставке 10 из электро-

проводного огнеупорного материала расположен вкладыш 11 из твердого флюса и закреплен металлическими фиксаторами 12. Металлический корпус оборудован осевым газоподающим патрубком 13, который с помощью муфты 14 соединяется с газопроводом 15 системы внешнего обеспечения газом высокого давления (на схеме не показана). Газоподающий патрубок перекрыт газопроницаемой пробкой 16.

Работа устройства осуществляется следующим образом. После сборки устройства с помощью подъемно-транспортного оборудования его размещают в литейной форме.

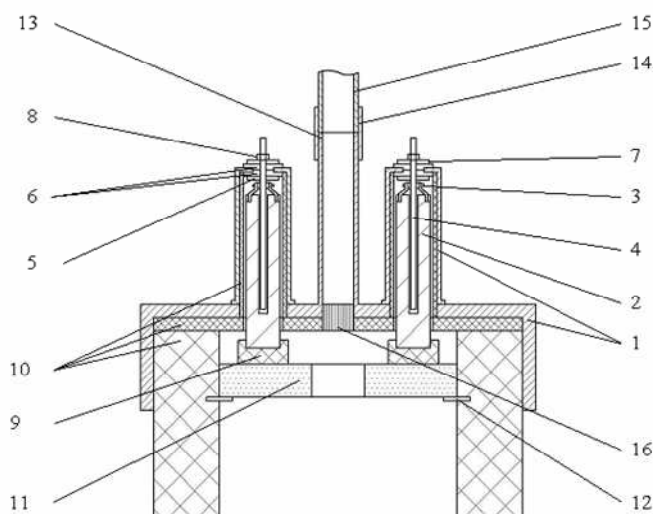


Рисунок 2 - Схема устройства для осуществления КТГВЭШО
(пояснения в тексте)

Далее начинают заполнение литейной формы расплавом. При подъеме уровня расплава в форме происходит погружение вставки из огнеупорного материала в слой теплоизолирующей засыпки, а затем и в расплав, при этом, металлический корпус вместе с вкладышем из флюса на протяжении процесса заполнения формы не погружается в жидкий металл, а находится выше уровня поверхности теплоизолирующей засыпки. В прибыльной зоне устройство останавливается и металлический корпус погружается в расплав. В это время происходит расплавление вкладыша 11 и погружение электродов 2 с насадками 9 в расплав флюса. Далее, к токопроводящим стержням 4 присоединяют токопроводящие кабели (на схеме не указано), к газоподающему патрубку 13 с помощью муфты 14 присоединяют газопровод 15. После этого подают напряжение, в слое жидкого флюса выделяется тепло и, соответственно, осуществляется обогрев металла при-

большой части отливки на протяжении необходимого промежутка времени. Температуру нагрева расплава регулируют силой тока (I , А) и напряжением (U , В) сварочного трансформатора (на схеме не указано). В процессе электрообогрева подают сжатый газ через газопроницаемую пробку 16. Таким образом, на жидкий и кристаллизующийся металл оказывается дополнительное газодинамическое воздействие.

Для КТГВЭШО может использоваться сварочный флюс АН-1 [9].

При осуществлении КТГВЭШО удельные затраты энергии значительно ниже, чем при плавке металла в традиционном плавильном агрегате (рис. 3) [9].

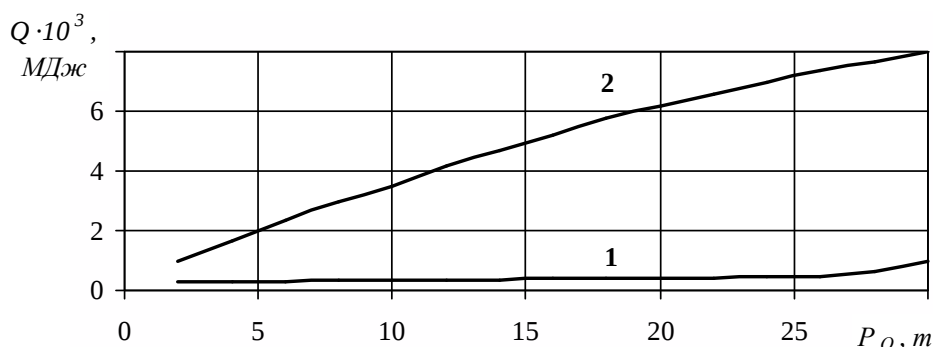


Рисунок 3 - Расчетные затраты энергии (Q) при электрошлаковом обогреве прибыли (1) и расплавлении массы металла (P) в индукционной печи (2)

Выводы

1. Одним из преимуществ разработанной технологии газодинамического воздействия на затвердевающий металл является отсутствие необходимости использования специального оборудования, усложнения конструкции литниковой системы и ограничений по массе и габаритам литой заготовки.

2. С учетом обеспечения утепления металла в прибыльной части крупных отливок и слитков для эффективного питания усадки в процессе газодинамического воздействия, разработаны оригинальные конструкции холодильников в виде металлического корпуса со вставкой из огнеупорного материала, а также вставкой из электроизоляционного огнеупорного материала и оборудованного электродами и вкладышем из флюса для осуществления электрошлакового обогрева металла в прибыли, работающих по технологии плавающей прибыльной вставки. Это дает возможность максимально полно использовать резерв перегрева расплава в прибыльной зоне и эффективно осуществлять процесс газодинамического воздействия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Селиверстов В.Ю. Технология газодинамического воздействия на расплав в литейной форме – один из перспективных способов повышения качества металла отливок [Текст] / В.Ю. Селиверстов // Сучасні проблеми металургії. Наукові праці. Днепропетровск: Системные технологии. - 2007. – Том 10. – С. 25 – 35.
2. Селиверстов В. Ю. Перспективы применения комбинированных способов управления структурообразованием литого металла [Текст] / В.Ю. Селиверстов, Ю.В. Доценко // Вісник ДДМА. - 2009. - № 1 (15). – С.267-273.
3. Пат. 28858 Україна, МПК (2006) B22D 18/00. Спосіб отримання виливків / Селівьорстов В.Ю., Хричиков В.Є., Доценко Ю.В. – № 200708968; заявл.03.08.2007; опубл. 25.12.2007, Бюл.№21.
4. Пат. 28859 Україна, МПК (2006) B22D 18/00. Пристрій для отримання виливків / Селівьорстов В.Ю., Хричиков В.Є., Доценко Ю.В. – № 200708969; заявл.03.08.2007; опубл. 25.12.2007, Бюл.№21.
5. Пат. 37838 Україна, МПК (2006) B22D 18/00. Спосіб отримання виливків / Селівьорстов В.Ю., Хричиков В.Є., Доценко Ю.В. – № 200808859; заявл.07.07.2008; опубл. 10.12.2008, Бюл.№23.
6. Пат. 37837 Україна, МПК (2006) B22D 18/00. Пристрій для отримання виливків / Селівьорстов В.Ю., Хричиков В.Є., Доценко Ю.В. – № 200808858; заявл. 07.07.2008; опубл. 10.12.2008, Бюл.№23.
7. Пат. 46128 Україна, МПК (2009) B22D 18/00. Спосіб отримання виливків / Селівьорстов В.Ю., Хричиков В.Є., Куцова В.З., Меняйло О.В., Савега Д.О. – № и 200906107; заявл.15.06.2009; опубл. 10.12.2009, Бюл. №23.
8. Пат. 55301 Україна, МПК (2009) B22D 18/00. Спосіб отримання виливків /Селівьорстов В.Ю., Хричиков В.Є., Доценко Ю.В., Куц П.Д., Савега Д.О. – № и 201006702; заявл. 31.05.2010; опубл. 10.12.2010, Бюл. № 23.
9. Хрычиков В.Е. Направленное затвердевание чугуновых прокатных валков: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.04. – Киев, 1993. – 454 с.

А.И. Михалев, В.Н. Журавлев, Р.А. Сухомлин
**КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД АНАЛИЗА СИГНАЛОВ
НА ОСНОВЕ ГИЛЬБЕРТА-ХУАНГА И ВЕЙВЛЕТ-
ПРЕОБРАЗОВАНИЙ В ЗАДАЧЕ ДИАГНОСТИКИ
ДЕФЕКТОВ ПОДШИПНИКОВ**

Статья посвящена исследованию эффективности комбинации методов диагностирования поврежденных подшипников и сравнению их между собой. Рассмотрено комбинирование двух методов анализа сигналов, основанных на последовательном применении Гильберта-Хуанга и вейвлет-преобразований.

Ключевые слова: эмпирическая модовая декомпозиция, модовая функция, кратномасштабный анализ.

Задача исследования эффективности методов контроля состояния объектов роторного типа в предаварийные периоды их работы, решение которой позволяет прогнозировать сроки планово-предупредительных ремонтов деталей и узлов, по-прежнему является актуальной. Особую важность данная задача имеет в приложении к изделиям авиационной техники. Процессы, происходящие в предаварийные периоды работы объектов, часто имеют хаотический характер и анализируются с использованием критериев оценивания хаотичности: показателя Ляпунова, нормированной энтропии и т.д. [1]. Однако, на некоторых эксплуатационных режимах работы авиационных двигателей (рулёжка в режиме малого газа, крейсерский полёт) эти процессы не всегда имеют хаотичный характер или он слабо выражен и, соответственно, им можно пренебречь. В этой связи активно развиваются методы анализа поведения нелинейных нестационарных систем: вейвлет-анализ [2,5,6], распределение Wagner-Ville и др. С другой стороны в последние годы для анализа подобных сложных систем все чаще применяются методы, основанные на преобразовании Гильберта-Хуанга [3,4,9].

В данной работе рассмотрена задача диагностики характера повреждения подшипников качения с использованием параметрической комбинации методов основанных на преобразовании Гильберта-

Хуанга и вейвлет-анализе. Анализ проводился с вибросигналами, зарегистрированными с помощью акселерометра, установленного со стороны привода в зоне радиальной нагрузки подшипника. В качестве исходных данных были взяты тестовые вибрационные сигналы *Case Western Reserve University Bearing Data Center: Seeded Fault Test Data* [7], снятые с подшипников без повреждений и с повреждениями, которые были нанесены электроэрозионным методом.

Целью исследования является оценка суммарной эффективности комбинации методов диагностирования поврежденных подшипников и сравнение данных методов между собой.

Рассмотрим теоретические основы применяемых методов анализа данных.

Преобразования Гильберта-Хуанга. Преобразование Гильберта-Хуанга (англ. ННТ) заключается в применении к исследуемому процессу эмпирической модовой декомпозиции, а затем Гильбертова спектрального анализа [3]. ННТ дает возможность проведения частотно-временного анализа данных.

Преобразование Гильберта действительной функции $x(t)$, $-\infty < t < \infty$ есть действительная функция определенная как

$$\tilde{x}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{1 - \tau} d\tau .$$

Функции $x(t)$ и $\tilde{x}(t)$ называют сопряженными по Гильберту. Данное преобразование изменяет фазу всех частотных составляющих сигнала $x(t)$ на $\pi / 2$. Это делает сигнал $x(t)$ ортогональным $\tilde{x}(t)$. Данный факт позволит сформировать из этих сигналов комплексный аналитический сигнал $z(t)$

$$z(t) = x(t) + j\tilde{x}(t) .$$

Такое представление позволяет определять текущие временные параметры сигнала $z(t)$, а именно: мгновенные амплитуды и фазы. Однако такой подход применим только для стационарных моногармонических сигналов и для сигналов с непрерывным гладким изменением частоты. Мгновенная амплитуда сигнала с несколькими составляющими будет отображать не сумму этих гармоник в текущий момент времени, а огибающую интерференции.

Мгновенное значение частоты для сигнала с несколькими гармониками с равной амплитудой, во всех его точках соответствует

среднему значению частот гармоник. Если амплитуды не равны, функция мгновенной частоты сдвигается в сторону частоты гармоник с большей амплитудой и приобретает пульсирующий характер.

Таким образом, для анализа сложных сигналов их необходимо разложить на несколько моногармонических составляющих, удовлетворяющих условию симметричности. Эта задача может быть решена методом Н. Хуанга, который еще называется методом «эмпирической модовой декомпозиции сигналов» [4], и представляет собой адаптивную итерационную вычислительную процедуру разложения исходного сигнала на эмпирические моды. В основании метода лежит предположение о том, что первоначальный сложный сигнал состоит из суммы модовых функций (англ. IMF), наложенных на произвольный тип тренда.

Алгоритм эмпирической модовой декомпозиции сигналов состоит из следующих этапов.

Этап 1. В исходном сигнале определяются координаты точек экстремумов и группируются в два массива (максимумы и минимумы) $k_{i,ext}$ и таким же образом обрабатываются соответствующие им амплитуды $y(k_{i,ext})$.

Замечание: Количество точек максимумов и минимумов должны отличаться не более чем на 1, это связано со свойствами модовых функций.

Этап 2. Кубическим сплайном (или с использованием других аппроксимирующих кривых) строим верхнюю $u_t(k)$ и нижнюю $u_b(k)$ огибающую точек экстремумов, и определяем функцию средних значений между ними:

$$m_1(k) = \frac{(u_t(k) + u_b(k))}{2} .$$

Первая компонента сигнала отсеивания ($h_1(k)$) получается разностью между сигналом $y(k)$ и $m_1(k)$. Функция $h_1(k)$ является первым приближением к первой IMF:

$$h_1(k) = y(k) - m_1(k) .$$

Этап 3. Повторяем предыдущие этапы, только вместо $y(k)$ используем $h_1(k)$, и находим второе приближение к первой IMF.

$$h_2(k) = h_1(k) - m_2(k) .$$

Последующие итерации выполняются таким же образом. В процессе увеличения количества итераций функция $m_i(k)$ стремится к нулевому значению, а функция $h_i(k)$ - к неизменяемой форме. В связи с этим, критерием остановки итераций является нормализованная квадратичная разность между двумя последовательными итерациями приближения:

$$\delta = \sum_k [|h_{i-1}(k) - h_i(k)|^2 / h_{i-1}^2(k)] .$$

Для получения качественной IMF обычно достаточно 8 итераций. Слишком много итераций приведут к отсеиванию компоненты несущей в себе полезную информацию о сигнале. С другой стороны, плохо отсеянные компоненты могут не удовлетворять свойствам модовых функций и метод Гильберта не будет адекватно работать для данных IMF.

После отсеивания качественной IMF, записываем ее в отдельный массив $c_1(1) = h_i(k)$, который затем вычитаем из исходного сигнала:

$$r_1(k) = y(k) - c_1(k) .$$

Массив $r_1(k)$ обрабатывается таким же образом для нахождения второй функции - $c_2(k)$, после чего процесс продолжается:

$$r_2(k) = r_1(k) - c_2(k) .$$

Остановка процесса декомпозиции сигнала на составляющие IMF должна происходить при превращении остатка $r_n(k)$ в тренд сигнала с числом экстремумов не более трех.

Таким образом, метод ННТ позволяет оценить начало процесса девиации параметров мгновенных амплитуд и фаз нескольких, эмпирически выделенных, частотных составляющих на их интервале стационарности, равном τ . Несущие частоты составляющих определяют преобразованием Фурье, выполняющим функцию фазовращателя преобразования Гильберта.

Кратномасштабный анализ сигналов. В общем случае, произвольный сигнал состоит из множества разнотипных составляющих: от информационной до всякого рода возмущений и помех. Для декомпо-

зиции сигнала на составляющие и отделения информационной части с учетом разрешения по времени и по частоте, используют вейвлетный кратномасштабный анализ (КМА). Анализ позволяет получить хорошее разрешение по времени (плохое по частоте) на высоких частотах и хорошее разрешение по частоте (плохое по времени) на низких частотах. Этот подход становится особенно эффективным, когда сигнал имеет высокочастотные компоненты короткой длительности и протяженные низкочастотные компоненты. Именно такие сигналы и встречаются чаще всего на практике.

Идея КМА заключается в том, что разложение сигнала производится по ортогональному базису, образованному сдвигами и кратномасштабными копиями вейвлетной функции. Свертка сигнала с вейвлетом позволяет выделить характерные особенности сигнала в области локализации этих вейвлетов, причем, чем больший масштаб имеет вейвлет, тем более широкая область сигнала будет оказывать влияние на результат свертки [5]. КМА основан на разложении исходного сигнала при помощи вейвлета и его скейлинг функции. Для вейвлета Хаара эти функции выглядят следующим образом[6]:

$$\varphi_{m,k}(x) = 2^{2m/2} \varphi(2^m x - k) ,$$

$$\psi_{m,k}(x) = 2^{2m/2} \psi(2^m x - k) .$$

где φ - скейлинг функция (аппроксимирующая), ψ - вейлет функция (детализирующая).

Ортогональный кратномасштабный анализ можно представить следующим образом. Пространство сигналов $s(t)$ обозначим как $L^2(R)$, которое содержит систему вложенных подпространств $V_m \subset L^2(R)$ ортогональных друг другу. Данная система должна удовлетворять следующим условиям:

Условие вложенности:

$$V_m \subset V_{m+1} .$$

Объединение подпространств V_m совпадает с $L^2(R)$:

$$\bigcup_{m \in I} V_m = L^2(R) .$$

Условие ортогональности подпространств:

$$\bigcap_{m \in I} V_m = \{0\} .$$

$$v(t) \in V_m \Leftrightarrow v(2t) \in V_{m+1}, \quad v(t) \in V_m \Leftrightarrow v(t/2) \in V_{m-1}.$$

Для пространства V_0 существует функция $\varphi(t) \in V_0$, целочисленные сдвиги которой по аргументу образуют ортонормированный базис пространства V_0 :

$$\varphi_{0,k} = \varphi(t - k), \quad k \in I \quad (k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots).$$

Из этих условий следует, что если подпространство V_0 имеет ортонормированный базис $\varphi_{0,k}$, то и все остальные подпространства также имеют ортонормированные базисы, которые образуются масштабным преобразованием базиса $\varphi_{0,k}$:

$$\varphi_{m,k}(t) = a^{m/2} \varphi(a^m t - k), \quad m, k \in I.$$

Обычно в КМА $a=2$. При этом из совокупности условий и уравнения приведенного выше следует, что перевод сигналов из пространства V_{m+1} в V_m соответствует децимации сигнала – двукратное прореживание, с соответствующим уменьшением в 2 раза числа отсчетов сигнала. Это эквивалентно низкочастотной фильтрации сигналов $v_{m+1}(t) \in V_{m+1}$, т.е. аппроксимация сигналов. Для исключения потери информации при восстановлении из спектра выделяется высокочастотная составляющая W_m . Пространство W_m еще называют детализирующим, поскольку оно содержит высокочастотную информацию необходимую для восстановления сигнала в более высоком разрешении.

Процесс разложения можно наглядно представить в следующем виде:

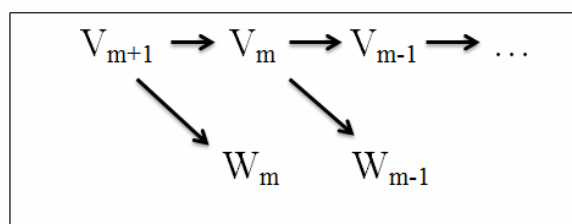


Рисунок 1 – Общий вид процесса вейвлет разложения сигнала

Физический смысл декомпозиции довольно прост. Исходное пространство (V_{m+1}) является пространством сигналов и функций с определенным частотным диапазоном. При разложении сигнала в пространство W_m отделяются высокие частоты, в V_m низкие.

На практике мы обычно имеем дело с цифровым сигналом $s(t)$ с конечным набором отсчетов. Для данных сигналов применяется быстрое вейвлет преобразование (алгоритм Малла [6]). В этом алгоритме

скейлинг функция и вейвлет функция представлены в виде фильтров высоких и низких частот соответственно. Аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты получаются при помощи свертки исходного сигнала с этими фильтрами. Набор коэффициентов для фильтров низких частот (скейлинг функции) трех членов семейства вейвлетов Добеши выглядит следующим образом:

Таблица 1

n	$\{h_k\}$
1	$\{h_k\} = \left\{ \frac{\sqrt{2}}{2}, \frac{\sqrt{2}}{2} \right\}$
2	$\{h_k\} = \left\{ \frac{1-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \frac{3-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \frac{3+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, \frac{1+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}} \right\}$
3	$\{h_k\} = \{0.332671, 0.806892, 0.459878, -0.135011, -0.085441, 0.035226\}$

При этом характерной чертой данного семейства является то, что коэффициенты фильтра высоких частот могут быть вычислены по следующей формуле:

$$g_k = (-1)^k h_{1-k}.$$

Процесс фильтрации можно представить следующим образом.

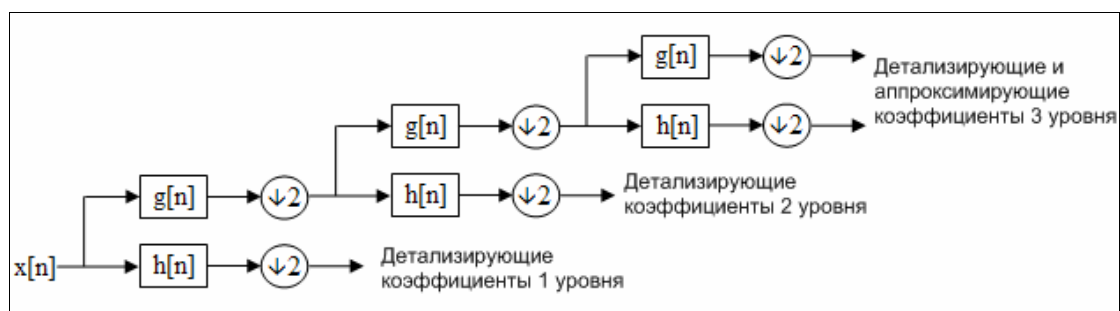


Рисунок 2 – Вейвлет разложения сигнала по алгоритму Малла

Таким образом, метод вейвлет-анализа, дополняя метод ННТ, позволяет детализировать и параметрически оценить значения девиации параметров внутри интервала стационарности τ .

Практическая часть ННТ. Как показали предыдущие исследования, для диагностики дефектов подшипников достаточно проанализировать только первую IMF, поскольку если их будет больше, повреждение распределится по остальным модовым функциям и без априорной информации о сигнале выявить их трудно [8]. Для примера

приведены графики сигнала подшипника с дефектом 0,021 дюймов и его первая IMF.

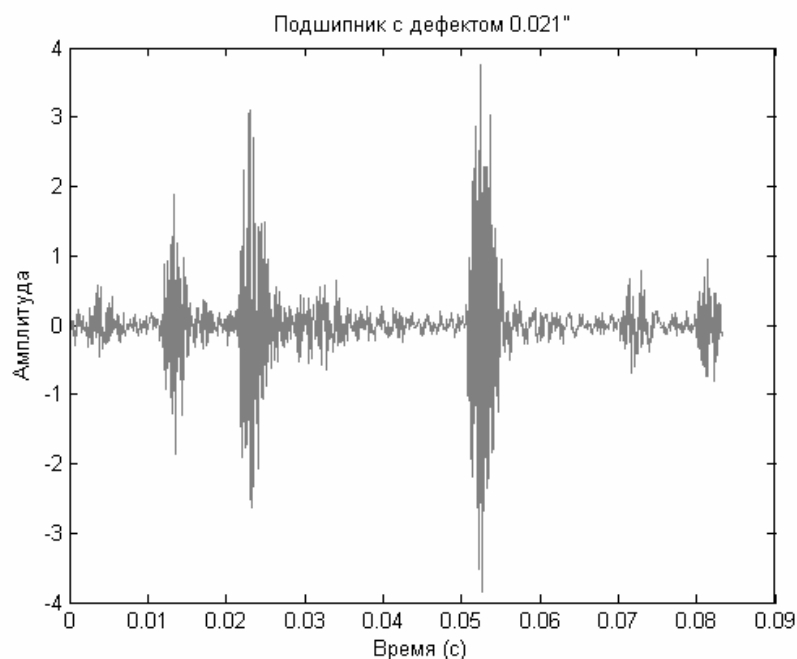


Рисунок 3 – Сигнал подшипника с размером дефекта 0.021”

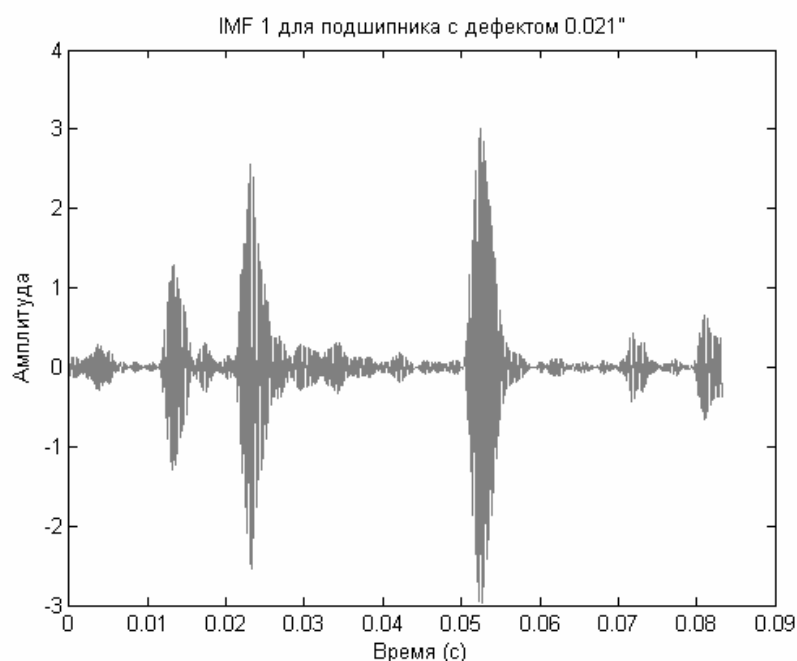


Рисунок 4 – IMF 1 подшипника с размером дефекта 0.021”

Анализ IMF был проведен несколькими методами. Один из них это вычисление огибающей амплитуды $|a(n)|$ из IMF[7]. Для извлечения $|a(n)|$ можно использовать метод демодуляции амплитуды основанный на дискретном преобразовании Гильберта:

$$H[y(n)] = F^{-1}\{F\{y(n)\} * u(n)\} ,$$

где $F\{\}$ и $F^{-1}\{\}$ - прямое и обратное быстрое преобразование Фурье, $u(n)$ заданное как:

$$u(n) = \begin{cases} 1, & n = 0, \frac{N}{2} \\ 2, & n = 1, 2, \dots, \frac{N}{2} - 1 \\ 0, & n = \frac{N}{2} - 1, \dots, N - 1 \end{cases},$$

а $|a(n)|$ вычисляется следующим образом:

$$|a(n)| = \sqrt{y^2(n) + (H[y(n)])^2}.$$

Графически амплитуда огибающей $|a(n)|$ выглядит как это приведено на рисунке 5.

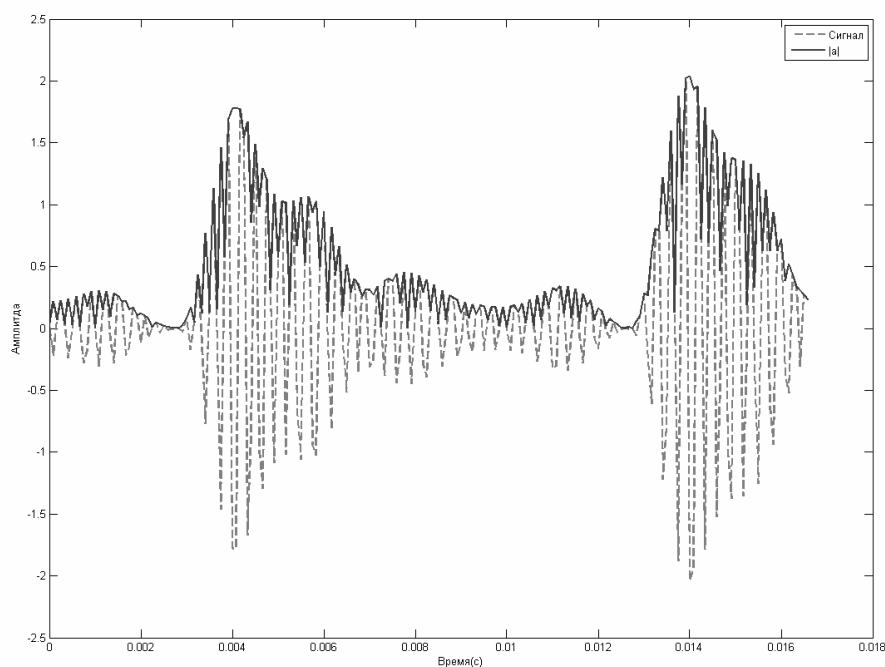


Рисунок 5 – Огибающая амплитуды сигнала

Второй метод заключается в вычислении плотности мощности спектра Гильберта.

$$E = \sqrt{\sum_{i=0}^N |x(i)|^2}.$$

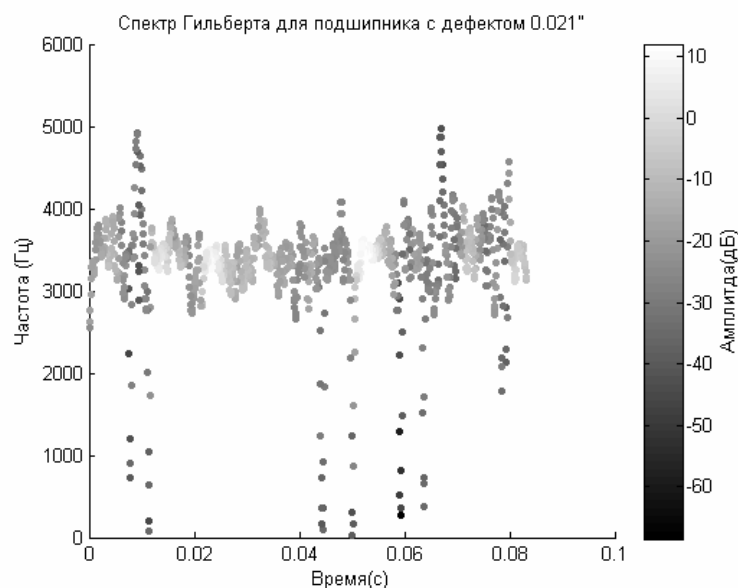


Рисунок 6 – Спектр Гильберта подшипника с размером дефекта 0.021"

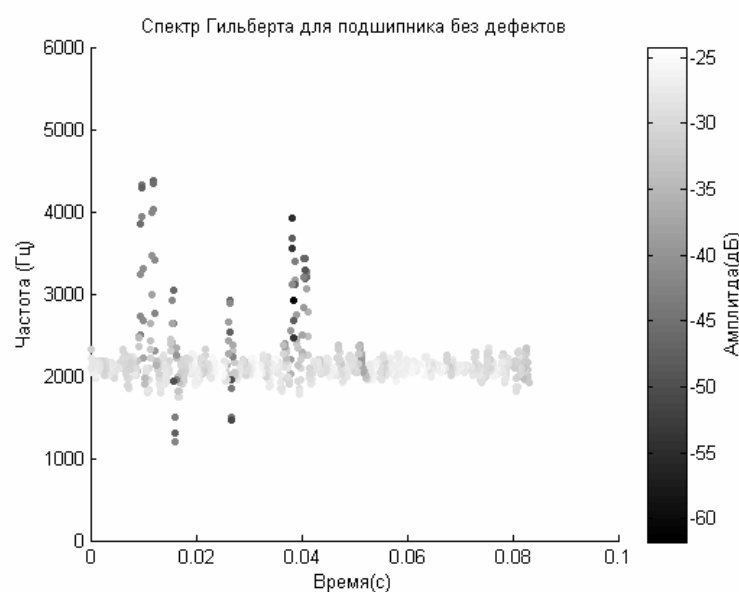


Рисунок 7 – Спектр Гильберта подшипника без дефектов

Последний метод основан на вычислении стандартного отклонения мгновенной амплитуды полученной в результате преобразования Гильберта. В работе все эти методы применялись для определения дефектного состояния подшипников. На подшипники были нанесены точечные дефекты размером 0.007, 0.014, 0.021 дюймов в диаметре электроэрозионным способом. Ниже приведена таблица с перечисленными выше показателями, которые были рассчитаны для вибросигналов нормальных и дефектных подшипников.

Таблица 2

	ННТ		
	Амплитуда огибающей по методу демодуляции сигнала	Плотность мощности спектра Гильберта	Стандартное отклонение амплитуды
	$ a $	E	$s(x)$
Подшипник без повреждений (normal_de)	0,01	1,44	0,01
Подшипник с повреждением 0,007'' (sig_007)	0,41	559,96	0,57
Подшипник с повреждением 0,021'' (sig_021)	0,47	576,49	0,60
sig_021/sig_007	1,15	1,03	1,05
sig_007/normal_de	29,13	388,45	47,97
sig_021/normal_de	33,60	399,91	50,58

В последних трех строках таблицы приведены отношения характеризующие степень изменения анализирующих показателей в зависимости от размера дефекта. Например, строка «sig_021 / normal_de» для столбца E показывает то, что метод расчета плотности мощности спектра более точно определяет дефектный подшипник по отношению к нормальному подшипнику. Хотя различия размеров дефекта лучше видно по методу вычисления амплитуды огибающей. Эффективность метода вычисления плотности мощности спектра обусловлена тем, что данные значения не зависят от фазовых характеристик сигнала. Из-за случайности и независимости фаз сигнала методы анализа вариабельности будут не так результативны как оценка плотности мощности.

Исследование результатов применения КМА. Так же как и в предыдущем случае использования ННТ здесь приводится сравнительная таблица детализирующих вейвлет-коэффициентов для различных дефектов подшипников (таблица 3). Детализирующие коэффициенты обладают свойством определять флуктуации сигналов ме-

жду различными уровнями частотной декомпозиции (на базе вейвлет-преобразований). Вейвлет-разложение проводилось с использованием четвертого вейвлета Добеши по алгоритму Малла до третьего уровня.

Таблица 3

	Вейвлет коэффициенты		
	cD1	cD2	cD3
Подшипник без повреждений (normal_de)	0,01	0,06	0,10
Подшипник с повреждением 0,007'' (sig_007)	0,69	0,68	0,15
Подшипник с повреждением 0,021'' (sig_021)	0,65	0,61	0,20
sig_021/sig_007	0,94	0,90	1,33
sig_007/normal_de	50,34	11,03	1,55
sig_021/normal_de	47,12	9,94	2,06

В трех последних строках показано, что детализирующий коэффициент первого уровня (cD1) более точно определяет дефектный подшипник по отношению к нормальному. А коэффициент третьего уровня (cD3) лучше отражает различие в размерах дефектов. Это связано с тем, что при дефекте подшипника аномалия в спектре возникает на высоких частотах, в то время как в спектре для нормального подшипника отсутствуют данные частоты. С другой стороны, различие между размерами дефектов проявляется на низких частотах, поскольку их лучше видно по cD3 ($\text{sig_021/sig_007} = 1.33$). Как известно первый уровень декомпозиции сигнала (cD1) обладает самой высокой степенью детализации—детализирующий коэффициент характеризует область высоких частот. Тогда как последний уровень декомпозиции (в данном случае третий) характеризует самую грубую аппроксимацию сигнала, т.е. соответствующий детализирующий коэффициент отражает более низкие частоты сигнала.

Выводы. Как видно из таблицы 2 методы ННТ показывают высокую степень изменения состояния подшипника при возникновении дефектов. Исследования показали, что наиболее эффективным методом первичного анализа (основанным на ННТ) является оценка плот-

ности мощности спектра Гильберта, поскольку энергия потерь в дефектном подшипнике гораздо больше энергии подшипника без повреждений.

Вейвлет анализ лучше выявляет разницу между размерами дефекта подшипника, поскольку они локализованы на низких частотах спектра.

Последовательная композиция рассмотренных методов позволит выполнить задачи раннего обнаружения зарождающегося дефекта подшипника качения (расчёт предельного ресурса), его подетальной дефектации и дальнейшего прогнозирования сроков и объемов планово-предупредительного ремонта двигателя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михалёв А.И., Сухомлин Р.А. Оценивание хаотических ритм-сигналов в задачах диагностики динамических систем //Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 3 (74). - Днепропетровск, 2011. - С.145 - 151.
2. Михалёв А.И., Прядко Н.С., Сухомлин Р.А. Вейвлет-анализ акустических сигналов процесса струйного измельчения //Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 3 (80). - Днепропетровск, 2012. – С. 122-127.
3. The Hilbert-Huang transform and its applications /Editors: Norden E. Huang, Samuel S.P. Shen. - World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 5, Toh Tuck. - Link, Singapore.
4. Huang N. E. Shen Z., Long S. R., Wu M. C., Shih H. H., Zheng Q., Yen N.-C., Tung C. C., and Liu H. H. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. Proceedings of R. Soc. London, Ser. A, 454, 1998.-P. 903-995.
5. Дремин И.Л. и др. Вейвлеты и их использование. / Успехи физических наук, 2001, т.171, № 5, С. 465-501.
6. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов: Пер. с англ. – М.: Мир, 2005. – 671 с., ил.
7. Case Western Reserve University Bearing Data Center. Seeded Fault Test Data [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.eecs.case.edu/laboratory/bearing/welcome_overview.htm
8. Amirat Y., Choqueuse, V., Benbouzid, M.E.H., Charpentier, J.F. Bearing fault detection in DFIG-based wind turbines using the first Intrinsic Mode Function. 2010 XIX International Conference on Electrical Machines (ICEM).
9. T. Kijewski-Correa, A.M.ASCE, A. Kareem, M.ASCE. Efficacy of Hilbert and Wavelet Transforms for Time-Frequency Analysis. Journal of Engineering Mechanics, Vol. 132, No. 10, October 2006.-P. 1037-1049.

Е.Ю. Мелкумян, С.А. Стенин

ПОСТРОЕНИЕ ОБУЧАЮЩЕЙ ПРОЦЕДУРЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ОБУЧЕННОСТИ ЭКСПЕРТА АНАЛИТИЧЕСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ

Аннотация: в настоящей статье сформулированы этапы процедуры обучения и получены условия обученности эксперта аналитической лаборатории в смысле определения степени его подготовки и времени остановки процесса обучения.

Ключевые слова: автоматизированная обучающая система, целевая функция обученности, среднеквадратическая мера разброса целевой функции.

Введение. Аналитические лаборатории, входящие в состав практически всех государственных структур, решают весьма большой спектр задач, причем часть из них имеют важное народнохозяйственное значение. В частности, аналитические лаборатории государственной таможенной службы Украины не только обеспечивают ввоз на Украину качественных товаров, но и предотвращают попадание на территорию опасных для здоровья людей различного рода средств и веществ, включая наркотические вещества и медикаменты. Аналитические лаборатории постоянно совершенствуются и развиваются как в смысле технических средств и информационных технологий, так и в смысле подготовки для работы в них высококвалифицированных экспертов-аналитиков.

Постановка задачи. Как известно [1], наиболее эффективным средством повышения уровня подготовки специалистов, в том числе экспертов-аналитиков, являются автоматизированные обучающие системы (АОС). Они позволяют значительно снизить затраты на подготовку специалистов различного профиля и, главное, сделать процесс обучения управляемым.

Одной из главных задач при создании АОС является задача определения уровня обученности и времени подготовки специалиста.

Такая задача остается актуальной и при традиционных формах обучения.

Решение задачи. Для решения поставленной задачи необходимо в первую очередь определить эффективную стратегию подготовки, построенную на принципах эффективных автоматизированных процедур обучения, предложенных в работе [2].

Для оценки уровня подготовки специалиста в процессе обучения необходимо корректно сформировать целевую функцию обучения. Она должна отражать качественную сторону обучения и иметь адекватную ей количественную оценку, позволяющую использовать для обработки известные математические методы [3]. Примером количественного аналога целевой функции может служить широко распространенная бальная шкала оценок, отражающая качественную сторону целевой функции обучения.

Независимо от принятой стратегии обучения процесс обучения или переобучения (повышения квалификации) всегда сводится к последовательному предъявлению обучаемому эксперту задач, многократное решение которых приводит к появлению у него соответствующих навыков по дозированным воздействиям на объекты анализа и контрольную аппаратуру. По мере приобретения навыка действия обучаемого эксперта характеризуются некоторой степенью статистической устойчивости. Известно [4], что любой процесс обучения можно представить в виде графиков целевой функции обучения и ее среднееквadrатического отклонения, показанными на рис. 1.

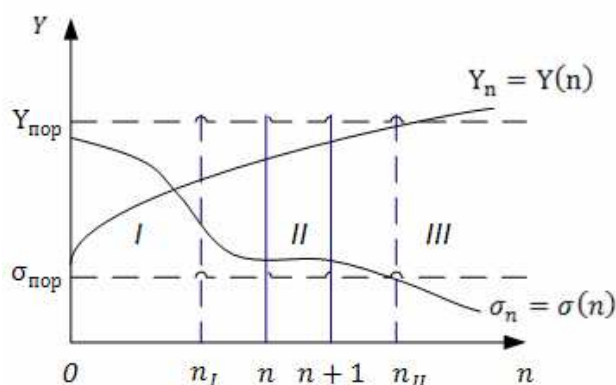


Рисунок 1 - Графики целевой функции обучения и ее среднееквadrатического отклонения

На данном рисунке через n обозначено число циклов предъявления обучаемому эксперту набора тестов, подлежащих анализу, через $Y(n)$ — целевая функция обучения или кривая изменения локаль-

ной меры обученности оператора, и через $\sigma(n)$ – кривая изменения среднего квадратического отклонения целевой функции обучения в процессе формирования навыка, характеризующая уменьшение погрешностей, допускаемых обучаемым экспертом при анализе данных тестов, по мере увеличения числа циклов обучения.

В соответствии с рис. 1 для подготовки эксперта аналитической лаборатории можно выделить следующие этапы процедуры обучения эксперта аналитической лаборатории:

I – этап первоначальной «приработки» обучаемого эксперта к режиму работы в составе данной лаборатории, на оборудовании которой формируется структура деятельности.

II – этап отработки параметров оборудования, на котором обучаемый эксперт знает, что и в какой последовательности следует выполнять для анализа стандартных тестов данной лаборатории, но действия его недостаточно точны и своевременны.

III – этап статистически стабильного уровня сформированных в процессе обучения навыков.

Чтобы сформировался устойчивый навык анализа типовых для данной лаборатории тестов, на этапе III следует предусматривать некоторый запас дополнительных циклов обучения.

Состояние обученности эксперта аналитической лаборатории предлагается фиксировать при выполнении следующих условий и правил.

1. Условие достижения состояния обученности

Вводится при условии «входа» целевой функции в зону, соответствующую этапу III, и записывается в виде неравенств

$$Y(n) \geq Y_{\text{пор}}; Y(n+1) - Y(n) \leq \sigma_n, \quad (1)$$

где $Y(n)$ – целевая функция как мера успешности анализа предъявленных типовых тестов на n -м цикле обучения; $Y(n+1)$ – мера успешности анализа предъявленных типовых тестов на $(n+1)$ -м цикле обучения; $Y_{\text{пор}}$ – пороговое, сформированное экспертным путем значение меры успешности обучения эксперта на тестовых анализах; σ_n – допустимая погрешность оценки степени обученности эксперта.

2. Условие получения устойчивых результатов обученности по среднему времени обучения

Определяется зависимостью

$$\bar{t}_{об} \leq \bar{t}_{об}^э, \quad \bar{t}_{об} = (\bar{t}_n + \bar{t}_{пр})n_{II} - t_{пр}; \quad (2)$$

где $\bar{t}_{об}$ - среднее время обучения, необходимое для получения устойчивых результатов при анализе данных тестов; $\bar{t}_n$ - средний период n -го цикла обучения; $\bar{t}_{пр}$ - среднее время перерыва между соседними циклами обучения; n_{II} - номер цикла при «входе» в зону, соответствующую этапу III; $\bar{t}_{об}^э$ - среднее эталонное время для обучения средне-статистического эксперта.

3. Правило остановки процесса обучения по среднему отклонению значений целевой функции обученности

Состоит в выполнении неравенства

$$|\Delta Y_k - \Delta Y_n| \leq \vartheta_Y, \quad (3)$$

где

$$\Delta Y_k = Y[(n+1) + k] - Y(n+k);$$

$$\Delta Y_n = Y(n+1) - Y(n).$$

Здесь ϑ_Y - допустимая погрешность оценки меры успеха; k - число циклов анализа типовых тестов, необходимое для достижения требуемой устойчивости навыка и определяемое для каждого набора тестов на основании опытных данных; ΔY_n , ΔY_k - приращение меры успеха за один цикл анализа данного набора тестов при условии, что до этого было выполнено соответственно n и $n+k$ циклов его анализа.

4. Правило остановки процесса обучения по разбросу целевой функции обученности

Процесс обучения останавливается при выполнении неравенств (4), где $\sigma_{пор}$ - пороговое значение среднего квадратичного отклонения локальной меры; $\Delta \sigma_k = \sigma[(n+1) + k] - \sigma(n+k)$, $\Delta \sigma_n = \sigma(n+1) - \sigma(n)$; ϑ_σ - допустимая погрешность оценки среднего квадратичного отклонения целевой функции обученности $Y(n)$.

Состояние обученности считается удовлетворительным, если выполняется (3) и (4) и мы находимся в зоне III, что соответствует выполнению условия (1).

5. Условие возобновления процесса обучения

Определяется неравенством

$$Y_{k+1} - Y_k > \vartheta_k, \quad (4)$$

где l – период между сеансами обучения, исчисляемый в циклах, θ_k – допустимая погрешность оценки необходимости возобновления процесса обучения.

6. Оценка обучаемого эксперта по скорости обучения

Состоит в установлении меры подтвержденности обучаемого эксперта влиянию затрудняющих работу неблагоприятных факторов и определяется по формуле:

$$\Delta = \frac{(\bar{t}_{об}^* - \bar{t}_{об})}{\bar{t}_{об}}, \quad (5)$$

где $\bar{t}_{об}$ – среднее время обучения и достижения устойчивых навыков работы в номинальных или штатных условиях; $\bar{t}_{об}^*$ – среднее время обучения в условиях воздействия конкретного неблагоприятного для работы фактора.

Заключение. Разработанные и предложенные в статье условия определения уровня обученности и времени обучения эксперта аналитической лаборатории прежде всего ориентированы на автоматизированные процедуры обучения, т.е. на АОС. Однако, они применимы и для традиционных форм обучения. Кроме того, они имеют универсальный характер и могут применяться при подготовке специалистов широкого профиля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Автоматизированные обучающие системы профессиональной подготовки операторов ЛА/ под ред. Шукшунова В.Е. М.: Машиностроение, - 1986, 240 с.
2. Иванова Е.В., Ткач Г.М., Стенин А.А. Принципы построения эффективных обучающих процедур в АОС. – сб.: Вестник Житомирского технологического института, №13, 2000. – с. 203 – 206.
3. Бешелев С.Л., Гурвич Ф.Г. Математические методы экспертных оценок. – М.: Статистика, 1980. – 263с.
4. Таран В.А. Эргатические системы управления. – М.: Машиностроение, 1976 – 188 с.

В.Л. Зубов

ВЫПЛАВКА КРЕМНИСТЫХ ФЕРРОСПЛАВОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ КВАРЦИТА ВАСИЛЬКОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Анотація. Було викладено результати промислових випробувань при виплавці феросиліцію марки ФС65 та феросилікомарганцю марки МнС25 та МнС17 на ПАТ «ЗФЗ» та ПАТ «НФЗ» із використанням кварциту Васильківського родовища порівняно із кварцитом Овручського родовища.

Ключові слова: феросиліцій, феросилікомарганець, кварцит, промислові випробування, порівняльний аналіз, техніко-економічні показники.

Производство ферросплавов в Украине имеет экспорно-ориентированный характер. Более 70% их производства экспортируется за рубеж [1]. Марочный сортамент экспортируемых кремнистых ферросплавов представлен в основном ферросилицием марки ФС65 и товарным ферросиликомарганцем марки МнС17. Данное обстоятельство делает исключительно важным для украинских ферросплавщиков вопрос поддержания на должном уровне качественного и ценового показателей конкурентно-способности экспортируемой ферросплавной продукции.

Одним из направлений снижения себестоимости и повышения качества кремнистых ферросплавов является вовлечение в производство кварцитов Васильковского (Днепропетровская обл.) месторождения. В последние годы, с учетом значительного повышения железнодорожных тарифов на перевозку сырьевых материалов, существенно возросла транспортная составляющая в себестоимости ферросплавов. Васильковское месторождение находится на 400 км ближе к ферросплавным заводам, чем другие известные месторождения кварцитов. Это обстоятельство позволяет снизить на существенную величину затраты по доставке кварцита.

Другим важным обстоятельством вовлечения в производство кремнистых ферросплавов кварцитов Васильковского месторождения является тот факт, что основное месторождение кварцитов Овручское

(Житомирская обл.) попало в полосу западного следа радиоактивного облака от аварии на Чернобыльской АЭС. Отдельные партии кварцитов этого месторождения могут содержать суммарную удельную активность радионуклидов выше допустимых норм.

Ферросплавная промышленность Украины для выплавки кремнистых ферросплавов в больше мере применяет кварцит Овручского месторождения. В последние годы на этом месторождении выделены два участка и организованы две структуры, которые поставляют кварцит по двум техническим условиям: «Кварцита Овручского месторождения» (ТУ У 00191879-01-98) и «Кварциты Толкачевского месторождения» (ТУ У 01056244-001-95). В соответствии с нормативным документом ОСТ 14-49-80 (с изменениями) для ферросплавных заводов производится кварцит марки КФ, используемого в основном для выплавки кремнистых ферросплавов (ферросилиция, силикомарганца, силикокальция, ферросиликохрома): кварцит марки КФ по химсоставу должен удовлетворять следующим требованиям:

SiO_2 , %, не менее 97

Al_2O_3 , %, не более 1,1

P_2O_5 , %, не более 0,02.

Регламентирование содержания Al_2O_3 и P_2O_5 обусловлено ограничением концентрации алюминия и фосфора в определенных марках высокопроцентного ферросилиция. Установлено, что при сравнительно повышенном содержании Al, Ca, P (а нередко и мышьяка) в высокопроцентных марках ферросилиция может происходить рассыпание сплава на воздухе и особенно во влажной (морской) атмосфере с образованием ядовитых газов – фосфина PH_3 и арсина AsH_3 [2]. Кроме того избыток Al_2O_3 в кварците при восстановительном процессе получения ферросилиция сопровождается расходом дорогой электроэнергии, так как восстановление алюминия является достаточно электроемким процессом (16000 кВт.ч на 1 т алюминия). Поскольку в ферросилиции содержится, как правило, до 1,5% Al становится ясным перерасход неоплачиваемой потребителем электроэнергии за восстановление алюминия. В каждой тонне ФС65 содержится до 15 кг алюминия и возможный перерасход электроэнергии на 1 т ФС65 составляет 120-250 кВт.ч.

С учетом отмеченных выше обстоятельств, на Запорожском и Никопольском заводах ферросплавов были поведены полномасштабные

промышленные испытания кварцита Васильковского месторождения для выплавки кремнистых ферросплавов.

На Запорожском заводе ферросплавов эти испытания проводили при выплавке ферросилиция марки ФС65 в цехе № 4 на печи № 34. Эта печь характеризовалась следующими наиболее важными параметрами: установленная мощность печного трансформатора 21 МВ·А; рабочие ступени напряжения трансформатора 193; 187 и 182 В; максимальный ток 72660 А, диаметр каждого из трех электродов 1200 мм при плотности тока 6,43 А/см, диаметр распада электродов 3000 мм. Ванна печи № 34 имеет размеры: диаметр кожуха ванны 8250 мм; диаметр ванны по футеровке 6622 мм; высота кожуха ванны 5145 мм и глубина ванны (расстояние от пода до воронки) 2920 мм [3].

В период испытаний кварцита применяли состав колоши: кварцит Васильковский 300 кг; коксик 159 кг и стружка 60 кг.

Технологические параметры плавки ферросилиция выдерживались в соответствии с инструкцией. Ход печи, выпуск металла и шлака, газовый режим процесса (давление колошникового газа под сводом) не имели существенных отклонений. По ходу выпуска ферросилиция отбирали пробы сплава и шлака для сравнительного анализа.

Сравнительные данные о химсоставе ферросилиция марки ФС65, выплавленного с использованием Овручского (базовый вариант) и Васильковского (опытный вариант) кварцитов, приведены ниже:

вариант	Si	Al	C	S	Cr	Mn	P
базовый	66,23	1,56	0,051	0,004	0,19	0,31	0,031
опытный	65,18	1,62	0,050	0,004	0,19	0,30	0,030

Химические составы шлаков сравнительных вариантов выплавки ферросилиция отличались несколько более низким содержанием Al_2O_3 и CaO:

вариант	SiO_2 (общее)	FeO	Al_2O_3	CaO	MgO	Cr	Mn	C	S
базовый	96,7	1,69	21,8	12,1	1,1	0,02	0,11	7,4	0,09
опытный	98,7	2,86	16,1	8,3	0,5	0,01 6	0,2	14, 3	0,04

При анализе химического составов шлаков ферросилиция следует учитывать несовершенство принятых в ЦЗЛ ферросплавных заводов методик определения фактического состава. Трудность анализов шлаков ферросилиция состоит в том, что они имеют гетерогенный состав из трех компонентов: минеральной (окисной) части, включений ферросилиция и карбида кремния. В некоторых случаях в шлаки запутывается также коксик. В приведенных составах шлаков общий кремнезем включает кремний минеральной части, кремний ферросилиция и кремний карбида кремния. Поэтому не удивительно, что сумма компонентов шлака по данным химических анализов по методике ЦЗЛ ферросплавных заводов всегда выше 100%.

В опытную кампанию было израсходовано 281 т кварцита, 141 т коксика (сухого), 54,3 т железной стружки, 27,5 т отходов производства и переходного металла 16,49 т.

Извлечение кремния в сплав составило 83,8%, улет 6,3%, с отходами 9,9%. В ферросилиций перешло 64,2% алюминия от поступившего с кварцитом и золой коксика. Переход фосфора составил 64,9%, в улет с колошниковым газом ушло 29,3%. Анализ технико-экономических данных позволяет заключить, что замена Овручского кварцита Васильковским обеспечила выплавку ферросилиция ФС65 с нормальными технико-экономическими данными (табл. 1).

Таблица 1

Сравнительные технико-экономические показатели
выплавки ферросилиция ФС65 с использованием
Васильковского и Овручского кварцита

Наименование показателей	Васильковский кварцит	Овручский кварцит
Время работы:		
сутки номинальные	3	3
сутки фактические	2,97	2,95
Фактическая мощность, кВт	17827	18113
Производительность:		
баз.тонны/сутки номинальные	55,1	55,12
баз.тонны/сутки фактические	55,7	56,1
баз.тонны/сутки факт./1000 кВт	3,12	3,09
Удельный расход материалов, кг/б.т.		
кварцита	1700	1684
коксика	856	877
стружки	328	337
электроэнергии, кВт.ч/б.т	7687	7859
Извлечение кремния, %	85,9	85,7

Экологическая оценка технологического процесса выплавки ферросилиция ФС65 путем замера состояния воздушной среды на рабочих местах плавильщика и горнового позволила заключить, что не установлено каких-либо отличий (превышение выделений вредностей – пыли, двуокиси азота, окиси углерода) при использовании Васильковского кварцита при замене им Овручского кварцита.

В условиях планового управления производством проектирование и эксплуатация ферросплавов цехов велись с учетом особенностей электропечного оборудования и технологии для конкретного вида ферросплавов. Рыночные отношения обусловили необходимость корректировки сортамента ферросплавов, производимых в том или другом цехе. Ферросплавный цех № 4 ПАО «ЗФЗ» запроектирован и эксплуатируется как цех ферросилиция. Однако определенные трудности с рынком ферросилиция и потребности в товарном силикомарганце вынуждают периодически несколько печей переводить на выплавку силикомарганца. В этой связи важно иметь данные оценки возможности и эффективности использования Васильковского кварцита при выплавке ферросиликомарганца.

С этой целью на ПАО «ЗФЗ» были проведены плавки передельного ферросиликомарганца марки MnC25. Выбор именно этого сплава был не случайным. Во внимание было принято, что процесс получения передельного ферросиликомарганца протекает при более высоких температурах. Поэтому при выборе объекта технологического процесса для проверки возможности использования Васильковского кварцита остановились на передельном ферросиликомарганце, полагая, что положительные результаты этого испытания могут быть распространены и на товарный ферросиликомарганец. Плавки проводились в цехе №2 на печи №13. Эта печь оборудована печным трансформатором мощностью 7500 кВ·А при активной мощности 5099 кВт. Печной трансформатор имеет три рабочих ступени напряжения: 162,5 В; 155,5 В и 149,0 В. Максимальный ток в графитированных электродах диаметром 500 мм – 26640 А. Диаметр кожуха ванны 5840 мм, диаметр ванны по футеровке (низу) 4200 мм, высота кожуха ванны 3100 мм, глубина ванны 1460 мм.

Колоша шихты состояла из малофосфористого высокомарганцевого передельного шлака 810 кг, васильковского кварцита 220 кг, коксика 320-380 кг и 20 кг отходов (АК) производства алюминиево-

кремниевых сплавов на апорожском производственном алюминиевом комбинате.

Полученный ферросиликомарганец соответствовал ДСТУ3548-97, что подтверждается сравнительными данными химических составов ферросиликомарганца, полученных по базовой и опытной технологии (в мас. %):

	Si	Mn	Fe	P	C
базовая	28,67	69,05	1,96	0,059	0,12
опытная	27,31	70,49	2,13	0,055	0,13

Извлечение элементов из шихты в передельный ферросиликомарганец составило: марганца 84,5%; кремния 51,5%; железа 85,5% и фосфора 91,7%.

Сравнительный анализ технико-экономических показателей показал, что расход шихтовых материалов и электроэнергии в базовый и опытный периоды, были практически одинаковы [3].

Промышленные испытания кварцита Васильковского месторождения были проведены и на ПАО «НЗФ» в печи типа РПЗ-48М2 (63 МВ·А) при выплавке товарного ферросиликомарганца марки МнС17Р50 [3].

Гранулометрический состав Васильковского кварцита, в основном представлен фракцией 40-80 мм, в значительном количестве (до 18%) содержал мелкой фракции 0-25 мм. Результаты промышленных испытаний представлены в табл.2.

Таблица 2

Сравнительные технико-экономические показатели
выплавки ферросиликомарганца с использованием
Овручского и Васильковского кварцитов

Показатели	Овручский кварцит	Васильковский кварцит
Используемая мощность, МВт	35,9	36,2
Производительность, баз.т./сут.	228,8	231,5
Удельный расход материалов, кг/баз.т		
агломерата АМНВ-2(48% Мн)	1743	1729
кокса	393	397
кварцита	267	275
электроэнергии, кВт.ч/баз.т	3765	3752
Извлечение марганца, %	79,2	79,7
Извлечение кремния, %	42,8	41,9

Из данных табл. 2 следует, что применение в шихте Васильковского кварцита не ухудшает технико-экономические показатели выплавки ферросиликомарганца.

Кварцит Васильковского месторождения был подвергнут радиологическому обследованию и установлено, что мощность гамма-фона равнялась 12-18 микрорентген в час, что не превышает пределов естественного радиоизлучения[4].

Промышленные испытания кварцита Васильковского месторождения были положены в основу при разработке технических условий, именуемых «Кварциты Васильковского месторождения для производства ферросплавов» ТУ У В.2.7-14355988.002-2009.

В соответствии с нормами этих технических условий в Васильковском кварците регламентировано содержание кремнезема не ниже 96,5% мас. и глинозема не более 1,7% мас. Кварцит может поставляться ферросплавным заводам трех марок (табл. 3).

Суммарная удельная активность естественных радионуклидов в кварцитах для производства ферросплавов, должна соответствовать требованиям ДБН В.1.4-1.01 для I класса (не более 370 Бк·кг⁻¹).

Таблица 3

**Нормы гранулометрического состава Васильковского
кварцита по техническим условиям**

Марка	Размер куска, мм		Содержание кусков, % по мас-се, с размером не более	
	максимальный	минимальный	выше макси-мального	ниже мини-мального
КВФ-100	100	45	10	10
КВФ-80	80	25	15	7
КВФ-30	30	20	10	5

Таким образом, сравнительный анализ результатов всех промышленных компаний с использованием кварцита Васильковского месторождения на ПАО «ЗФЗ» и ПАО «НФЗ» показал, что этот вид продукции может использоваться при выплавке кремнистых ферросплавов, что позволит украинским ферросплавщикам снизить себестоимость, улучшить качество продукции и тем самым повысить конкурентно-способность кремнистых ферросплавов на зарубежных рынках.

ЛИТЕРАТУРА

1. Овчарук А.Н., Рогачев И.П., Ивашина А.Н. Анализ состояния украинского ферросплавного рынка//В кн. « Сучасні проблеми металургії» Том 6. Прогресивні енерго- і ресурсозберігаючі технології та обладнання в електрометалургії феросплавів. Дніпропетровськ, «Системні технології». – 2003. – С.28-32.
2. Гасик М.И. Проблемы рассыпания высокопроцентного ферросилиция с образованием токсичных газов//Сталь.- 1996, №8-С.26-30.
3. Зубов В.Л., Гасик М.И. Электрометаллургия ферросилиция. – Днепропетровск. – ГНПП «Системные технологии». – 2002- 704с.
4. Исследование концентрирования естественных радионуклидов шихтовых материалов в шлаках выплавки ферросилиция/М.И.Гасик, В.Л.Зубов, А.Н.Овчарук, В.В.Билаш// Металлургическая и горно-рудная промышленность. – 2004. – С.26-29.

СОДЕРЖАНИЕ

Ковалёв Д.А., Ванюкова Н.Д., Худяков А.Ю., Бойко М.Н. Аналіз роботи обпалювальної машини із застосуванням режиму високотемпературної сушки	3
Кошулян А.В., Малайчук В.П. Моделирование автокоррелированных последовательностей измерений вдоль жордановой траектории	10
Бинкевич В.В., Усиченко И.В. О критерии согласования решений при моделировании процессов в синергетической экономике	19
Козлов В.М., Хлынцев В.П., Калениченко В.В. Классификация структурных дефектов в гальванических покрытиях	26
Демура А.Л., Рябчий В.Д. Дослідження процесу охолодження полімерних композиційних матеріалів після отвердіння під впливом поля надвисокої частоти ..	35
Ивон А.И., Истущкин В.Ф. Расчет длительности „холостых” тактов при использовании режима троттлинга для защиты процессора от перегрева	41
Литвинов А.А., Павленко М.В. Алгоритм эффективного распределения ресурсов от деления хирургического профиля	47
Матвеева Н.О., Гаркуша І.В. Алгоритми оптимізації навчання для задач класифікації дефектів..	56
Ахметшина Л.Г., Егоров Л.Г., Ямнич Т.С. Влияние методов кластеризации в задаче нечеткой интерполяции экспериментальных данных	64
Крохин В.В., Кузьменко Н.О. Автоматизация выбора оптимальной модели линейной регрессии ...	73
Пеньков А.П., Герасимов В.В. Системные аспекты разработки криптосистем	84
Сопільник О.В., Чернова С.А. Моделювання композицій законів розподілу випадкових чисел	89
Пономарев И.В., Рыбка Ю.М. Алгоритмы определения наличия параметров в системах	95
Твердоступ Н.И. Высокодобротный умножитель индуктивности	100
Пономарев И.В. Языковые конструкции для параллельных асинхронных вычислений на реконфигурируемых многопроцессорных системах	106

Хандецкий В.С., Тонкошкур Ю.А. Моделирование процесса обработки данных изотермического деполяризационного анализа с использованием функции Кольрауша- Уильямса-Ватта.....	111
Григорьев В.М. Виртуализация лабораторного практикума по компьютерным сетям	121
Алексеев М.А., Ахметшин К.А. Адаптивная фильтрация и синтез фазовых портретов нелинейных динамических систем в сингулярном базисе вложенных векторов .	127
Зубов В.Л. Термокинетический анализ плавления-затвердевания ферросилиция различных марок промышленного производства	133
Богомаз В.М., Нечай І.В. Про регуляризацію фазових обмежень в одному класі задач векторної оптимізації	145
Митиков Ю.А. Системное проектирование предпускового наддува баков с кислородом	152
Селиверстов В.Ю. Особенности реализации газодинамического воздействия на затвердевающий металл при использовании технологии плавающей прибыльной вставки	159
Михалев А.И., Журавлев В.Н., Сухомлин Р.А. Комбинированный метод анализа сигналов на основе Гильберта- Хуанга и вейвлет-преобразований в задаче диагностики дефектов подшипников	160
Мелкумян Е.Ю., Стенин С.А. Построение обучающей процедуры и определение условий обученности эксперта аналитической лаборатории	178
Зубов В.Л. Выплавка кремнистых ферросплавов с применением кварцита Васильковского месторождения	183

РЕФЕРАТЫ

УДК 622.788

Ковалев Д.А., Ванюкова Н.Д., Худяков О.Ю., Бойко М.Н. **Анализ работы обжиговой машины с применением режима высокотемпературной сушки** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 1 (78). - Днепропетровск, 2012. - с.3 - 9.

В статье представлены результаты моделирования работы зоны сушки обжиговой машины ОК-1-520 в высокотемпературном режиме, которое показало, что данный режим позволяет не только полностью провести удаление влаги из окатышей, но и достаточно интенсивно реализовать их окисление, оптимизировать распределение температур в слое, а также повысить производительность обжиговой машины.

Бібл. 6.

УДК 519.24:681

Кошулян О.В., Малайчук В.П. **Модельювання автокорельованих послідовностей вимірювань уздовж жорданової траєкторії** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 1 (78). - Днепропетровск, 2012. - с.10 - 18.

Запропоновано алгоритм формування автокорельованих послідовностей вимірювань уздовж простого замкнутого контуру на основі системи різницевих рівнянь 1-го порядку. Проведені дослідження основних властивостей таких послідовностей. Виконана перевірка основних результатів шляхом проведення обчислювальних експериментів.

Бібл. 4, іл. 2, табл.2.

УДК 330.1

Бінкевич В.В., Усиченко І.В. **Про критерій узгодження рішень при моделюванні процесів в синергетичній економіці** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 1 (78). - Днепропетровск, 2012. - с.19 - 25.

Розглянуто застосування критерія «витрати ефективності» при узгодженні рішень в складній багаторівневій системі.

Бібл. 7.

УДК 669.017

Козлов В.М., Хлинцев В.П., Каленіченко В.В. **Класифікація структурних дефектів у гальванічних покриттях** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 1 (78). - Днепропетровск, 2012. - с.26 - 34.

Досліджена структура електроосаджених металів з різним типом кристалічної решітки (нікель, мідь, залізо, цинк). На основі узагальнення отриманих експериментальних результатів дана класифікація дефектів кристалічної будови в гальванічних покриттях.

Виявлені особливості субзеренних границь в електролітичних осадах і запропонований єдиний механізм виникнення структурних дефектів, пов'язаний з некогерентним зародкоутворенням - основною стадією процесу електрокристалізації металів.

Бібл. 6.

УДК 621.365:621.315.61

Демура А.Л., Рябчий В.Д. **Исследование процесса охлаждения полимерных композиционных материалов после отверждения под влиянием поля сверхвысокой частоты** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 1 (78). - Днепропетровск, 2012. - с.35 - 40.

Представлены результаты исследования процесса охлаждения полимерных композиционных материалов после отверждения под воздействием электромагнитного поля сверхвысокой частоты.

На основе решения теплового уравнения составленная программа для вычисления температуры в процессе охлаждения. Программа позволяет рассчитывать пространственное распределение температуры в материале в определенный момент времени.

Бібл. 7.

УДК 004.318+536.37

Ивон А.И., Истушкин В.Ф. **Расчет длительности „холостых” тактов при использовании режима троттлинга для защиты процессора от перегрева** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 1 (78). - Днепропетровск, 2012. - с.41 - 46.

Предложена простая аппаратная реализация режима троттлинга процессора. Выполнен расчет длительности „холостых” тактов процессора в режиме троттлинга. При перегреве, когда процессор выполняет энергоемкие участки программы, троттлинг обеспечивает ограничение температуры на уровне 68 °С.

Бібл. 4, рис. 1.

УДК 614.2+574/578+004.38

Литвинов О.А., Павленко М.В. **Алгоритм ефективного розподілу ресурсів відділення хірургічного профілю** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 1 (78). - Днепропетровск, 2012. - с.47 - 55.

В роботі розглянуто алгоритм планування заходів лікування пацієнтів хірургічного профілю спрямований на ефективне розподілення ресурсів клініки. Розглянуті основні проблеми, які пов'язані з динамічним розподілом ресурсів, визначені вимоги та обмеження щодо хірургічного відділення. Запропонований алгоритм планування ресурсів та розглянуті результати його застосування в клініці «Гарвіс».

Бібл. 4. рис. 3., табл.1.

УДК 621.3

Матвеева Н.А. **Алгоритмы оптимизации обучения для задач классификации дефектов** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 1 (78). - Днепропетровск, 2012. - с.56 - 63.

Представлены результаты исследования качества обучения (зависимость суммы квадратов ошибки от количества эпох) для решения задачи классификации дефектов. Моделирование многослойного персептрона проводилось в среде MATLAB.

Бібл. 6, ил. 4, табл. 1.

УДК 616.12

Ахметшина Л.Г., Егоров А.О., Ямнич Т.С. **Вплив методів кластеризації в завданні нечіткої інтерполяції експериментальних даних** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 1 (78). - Днепропетровск, 2012. - с.64 - 72.

Досліджений вплив методів кластеризації та виду функції приналежності на результати нечіткої інтерполяції експериментальних просторових даних, що задані на нерівномірній сітці.

Бібл. 4, рис. 2, табл. 1.

УДК 519.21: 519.24

Крохин В.В., Кузьменко Н.О., **Автоматизация выбора оптимальной модели линейной регрессии** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 1 (78). - Днепропетровск, 2012. - с.73 - 83.

Проведен анализ эффективности выбора оптимальной модели множественной линейной регрессии (МЛР) различными методами. Исследование проводилось с помощью метода имитационного моделирования. Были проанализированы пять методов выбора оптимальной МЛР. Анализ проводился с помощью специально разработанного программного обеспечения с использованием MATLAB.

На основе данных имитационного моделирования сделан вывод, что при небольшом числе возможных независимых переменных (меньше 15), наилучшие результаты даёт метод всех возможных регрессий с использованием статистики Маллоуза в качестве критерия оптимальности. Однако при большем числе таких переменных методы всех возможных переменных становятся неприменимыми. В такой ситуации можно использовать быстрые методы: последовательного исключения и пошаговый метод, которые имеют примерно одинаковые характеристики качества и быстродействия.

Библ. 4, табл. 2, рис. 2.

УДК 621.372

Пеньков А.П., Герасимов В.В. **Системні аспекти розробки криптосистем** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 1 (78). - Днепропетровск, 2012. - с.84 - 88.

Розглянуто методологічні аспекти поведінки розробника і замовника криптосистем, які дозволяють розробнику бути впевненим, ініціативним, відслідковувати процес розробки, знаходити спільну мову із замовником.

Бібл. 7, табл.1, рис. 2.

УДК 621.3.083.92

Сопільник О.В., Чернова С.А. **Моделирование композиций законов распределения случайных чисел** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 1 (78). - Днепропетровск, 2012. - с.89 - 94.

Автономне програмне забезпечення, розроблене на основі платформи MatLab, дозволяє створити композицію обраних законів розподілу із заданими числовими харак-

теристиками, ілюстровану відповідною гістограмою. Програмний продукт має функціонально закінчений вигляд і потребує близько 200 Мб пам'яті.

Бібл.6, іл.3.

УДК 681.326.7

Пономарьов І.В., Рибка Ю.М. **Алгоритми визначення наявності параметрів у системах** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 1 (78). - Днепропетровск, 2012. - с.95 - 99.

Розглянуто алгоритми і методи ідентифікації певного параметра у системах. Розроблена нова методика ідентифікації конкретного елементу і групи елементів системи, що дозволяє мінімізувати необхідний набір тестів.

Бібл. 3.

УДК 62 – 52: 621.317

Твердоступ Н.І. **Високодобротний помножувач індуктивності** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 1 (78). - Днепропетровск, 2012. - с.100 - 105.

Проведені дослідження вхідного імпедансу лінійної комбінованої операційної схеми із індуктивністю в колі зворотного зв'язку підсилювача. Розроблена схема, в якій реалізується ефект збільшення вхідного індуктивного імпедансу із одночасним ростом його добротності за рахунок компенсації активного опору помноженої індуктивності.

Бібл. 7, іл. 3

УДК 621.3

Пономарьов І.В. **Мовні конструкції для паралельних асинхронних обчислень на реконфігурованих багатопроцесорних системах** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 1 (78). - Днепропетровск, 2012. - с.106 - 110.

Запропоновано мовні конструкції розділу управління мови програмування паралельних обчислень на реконфігурованих БОС. Налаштування параметрів конфігурації системи при описі завдання по-зволяють ефективно виконати обробку системою певної архітектури.

Бібл. 3.

УДК 680.179:681.513

Хандецкий В.С., Тонкошкур Ю.А. **Моделирование процесса обработки данных изотермического деполяризационного анализа с использованием функции Кольрауша-Уильямса-Ватта** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 1 (78). - Днепропетровск, 2012. - с.111 - 120.

Досліджені механізми апроксимації для описання змін деполяризаційного струму в неоднорідних матеріалах з використанням функції Кольрауша-Уильямса-Ватта. Показано можливість відновлення релаксаційної залежності струму в широкому часовому діапазоні на основі суперпозиції функцій розглянутого виду. UDS

Бібл.19, табл.1, іл.5.

УДК 004.7:004.45

Григор'єв В.М. **Віртуалізація лабораторного практикуму з комп'ютерних мереж** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 1 (78). - Днепропетровск, 2012. - с.121 - 128.

У роботі представлені принципи використання віртуальних машин для організації вивчення мережевих технологій. Вирішується задача вибору віртуальної машини і операційної системи мережевого пристрою для організації одночасної роботи великої кількості студентів у разі обмеженості ресурсів хост-комп'ютера. В ході досліджень вибір припав на віртуальну машину Qemu в рамках оболонки GNS3 під управлінням Ubuntu і операційну систему RouterOS мережевих пристроїв фірми Mikrotik.

Рис.1.

УДК 616.12

Алексєєв М.О., Ахметшин К.О. **Адаптивна фільтрація і синтез фазових портретів нелінійних динамічних систем у базисах сингулярного розкладання вкладених векторів** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 1 (78). - Днепропетровск, 2012. - с.129 - 132.

Розглянуто інформаційні можливості нового методу аналізу нелінійних динамічних систем. Представлені результати експериментальної перевірки методу.

Бібл. 7, рис. 6.

УДК 669.15'782 – 198.1

Зубов В.Л. **Термокинетический анализ плавления-затвердевания ферросилиция различных марок промышленного производства** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 1 (78). - Днепропетровск, 2012. - с.133 - 144.

Изложены результаты термокинетического анализа плавления – затвердевания образцов ферросилиция различных марок ФС45, ФС65, ФС70 промышленного производства методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и термогравиметрии. Количественно оценены возникающие при нагреве и охлаждении термические эффекты, обусловленные фазовыми превращениями. Определена теплоемкость ферросилиция в температурном интервале 20-1350оС, проведен сравнительный анализ температур превращения в ферросилиции различных марок. Экспериментальные кривые ДСК обработаны методом нелинейной регрессии с анализом возможных типов превращений. Получена наибольшая корреляция экспериментальных данных с уравнением Аврами – Ерофеева. Результаты проведенных исследований имеют важное значение при выборе температурных параметров машинной разливки ферросилиция, а также для теплофизических расчетов печных и внепечных процессов раскисления и легирования стали ферросилицием.

Библ. 4.

УДК 519.8

Богомаз В.М., Нечай І.В. **Про регуляризацію фазових обмежень в одному класі задач векторної оптимізації** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 1 (78). - Днепропетровск, 2012. - с.145 - 151.

В роботі досліджується проблема регуляризації обмежень в задачах векторної оптимізації з цільовими відображеннями, які мають ослаблену властивість напівнеперервності знизу та нетілесними впорядковувачими конусами. Введено ослаблене поняття регуляризаторів таких задач, для побудови яких залучаються ідеї векторної оптимізації. Отримано достатні умови існування ефективних регуляризаторів та наведено алгоритм їх побудови.

Бібл. 5.

УДК 629.7.036.5

Митиков Ю.А. **Системное проектирование предпускового наддува баков с кислородом** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 1 (78). - Днепропетровск, 2012. - с.152 - 158.

Проведено системное расчетно-экспериментальное исследование системы предпускового наддува цилиндрического бака с жидким кислородом I ступени носителя на трех установках. Получены результаты по прогреву верхнего слоя кислорода, степени восстановления паров, скорости ввода газа в бак. Сформулированы предложения по совершенствованию системы.

Бібл. 7.

УДК 621.744.3

Селівьорстов В.Ю. **Особенности реализации газодинамического влияния на металл, что твердје, при використанні технології надливної вставки, що плаває** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 1 (78). - Днепропетровск, 2012. - с.159 - 164.

Представлений опис і проведений аналіз особенностей застосування спеціалізованих пристроїв для здійснення газодинамического влияния на металл, что твердје в ливарній формі.

Бібл. 9.

УДК 004.67:004.9

Михальов А.І., Журавлев В.М., Сухомлин Р.О. **Комбінований метод аналізу сигналів на основі Гільберта-Хуанга та вейвлет-перетворень в задачі діагностики дефектів підшипників** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 1 (78). - Днепропетровск, 2012. - с.165 - 177.

Проведено аналіз вібросигналів підшипників за допомогою методу Гільберта-Хуанга та вейвлет-аналізу. Аналізувалися сигнали підшипників без пошкоджень і з ушкодженнями. Запропоновано рекомендації щодо використання композиції розглянутих методів для раннього виявлення дефекту підшипника кочення який тільки починає зароджуватися. Проведено параметричне порівняння даних методів між собою.

Бібл. 9, іл. 7.

УДК 621-501

Мелкумян Є.Ю., Стенін С.О. **Побудова навчаючої процедури і визначення умов навченості експерта аналітичної лабораторії** // Системные технологии. Региональный

межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 1 (78). - Днепропетровск, 2012. - с.178 - 182.

В даній статті сформульовані навчаючої процедури і отримані умови навченості експерта аналітичної лабораторії в сенсі визначення ступені його навченості і часу зупинки процесу навчання.

Ключові слова: автоматизована система, цільова функція навченості, середньоквадратична міра розкидання цільової функції.

Рис.1, бібл. 4.

УДК 669.15 782-198

Зубов В.Л. **Выплавка кремнистых ферросплавов с применением кварцита Васильковского месторождения** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 1 (78). - Днепропетровск, 2012. - с.183 -190.

Було викладено результати промислових випробувань при виплавці феросиліцію марки ФС65 та феросилікомарганцю марки МнС25 та МнС17 на ПАТ «ЗФЗ» та ПАТ «НФЗ» із використанням кварциту Васильківського родовища порівняно із кварцитом Овручського родовища.

Табл. 3, бібл. 4 .

UDK 622.788

Kovalyov D.A., Vanyukova N.D., Khudyakov O.Yu., Boyko M.M. **Analysis of work of conveyer machine with the use of the mode of the high temperature drying** // System technologies. N 1(78) - Dnipropetrovsk, 2012.- P.3 - 9.

In this paper are presented the results of design of work of drying area of conveyer machine OK-1-520 in the high temperature mode. It is set that this mode allowed not only fully deleting of moisture from pellets, but also intensively realize their oxidization, optimize distributing of temperatures in a layer, and also to promote the productivity of conveyer machine.

Bibl. 6.

UDC 519.24:681

Koshulyan A., Malajchuk V. **The modelling of autocorrelated measurement series along Jordan curve** // System technologies. N 1(78) - Dnipropetrovsk, 2012.- P.10 - 18.

The algorithm of the modelling of random closed series was derived on the base of autoregressive model of order 1. It has been found out that such series present a strictly stationary random process which has properties different from the unclosed form. The main results were checked by running some computing experiments.

Bibl. 4, ill. 2, table 2.

UDC 681.323

Binkevich V.V., Usichenko I.V. **About decisions concordance criterion at synergistic economy's processes modelling** // System technologies. N 1(78) - Dnipropetrovsk, 2012.- P.19 - 25.

Application of criterion "costs-effectiveness" in complex multi-level system decision concordance is studied in article.

Bibl. 7.

UDC 669.017

Kozlov V.M., Khlyncev V.P., Kalenichenko V.V. **Classification of structural defects of the galvanic coatings** // System technologies. N 1(78) - Dnipropetrovsk, 2012.- P.26 - 34.

The structure of the electrodeposited metals with different types of crystal lattice (nickel, copper, iron, zinc) has been studied. The classification of defects of the crystal structure of galvanic coatings has been given on the basis of generalization of experimental results.

The distinctive features of subgrain boundaries in electrolytic deposits have been revealed and a unified mechanism of the occurrence of structural defects associated with the incoherent nucleation, the main stage of the process of electrocrystallization of metals, has been proposed.

Bibl. 6.

UDC 621.365:621.315.61

Demura A.L., Ryabchy V.D. **Research of cooling process of the polymeric composite materials later on the hardening under the effect of field of microwave frequency** // System technologies. N 1(78) - Dnipropetrovsk, 2012.- P.35 - 40.

Presented the results of researching cooling process of the polymeric composite materials later on the hardening under the effect of field of microwave frequency/

On the basis of decision of thermal equalization the made program for the calculation of temperature in the process of cooling. The program allows to expect spatial distributing of temperature in material in certain moment of time.

Bibl. 7.

UDC 004.318+536.37

Ivon A.I., Istushkin V.F. **Calculation of the duration of "idle" cycles at use of throttling mode for processor protection against overheating** // System technologies. N 1(78) - Dnipropetrovsk, 2012.- P.41 - 46.

The simple hardware implementation of a throttling mode for processor is offered. The duration of "idle" cycles of processor in a throttling mode is calculated. At overheating when processor executes power-hungry parts of program the throttling provides limitation of temperature at a level 68 °C.

Bibl. 4, ill. 1

UDC 614.2+574/578+004.38

Litvinov A.A., Pavlenko M.V. **An algorithm of effective activities planning for surgical clinic** // System technologies. N 1(78) - Dnipropetrovsk, 2012.- P.47 - 55.

The given work is devoted to an activities' planning algorithm aimed to achieve effective surgery clinic resources consumption. First, main problems connected with dynamic scheduling were stated, requirements, concepts and constraints were defined. Then, a formalized model of planning resources algorithm was suggested and the results of its application for Garvis private clinic needs were discussed.

Bibl. 4, ill. 3., tabl.1.

UDC 621.3

Matveyeva N.A. **Algorithms of the optimization educating for the tasks of classification defects** // System technologies. N 1(78) - Dnipropetrovsk, 2012.- P.56 - 63.

The results of research the quality educating (dependence of the sum squares error on the amount of epochs) for the decision of the task classification defects are presented. Modeling of multi-layer perceptron is implemented in MATLAB.

Bibl. 6, il. 4, tabl 1.

UDC 616.12

Akhmetshina L.G., Yegorov A.A., Iamnych T.S. **Clustering methods influence in the fuzzy interpolation of spatial data task** // System technologies. N 1(78) - Dnipropetrovsk, 2012.- P.64 - 72.

Clustering methods and membership function type influence in the fuzzy interpolation of spatial data task defined on nonuniform grid is investigated.

Bibl.4, il. 2, tabl. 1.

UDC 519.21: 519.24

Krokhin V.V., Kuzmenko N.O. **Automating the selection of the optimal linear regression model** // System technologies. N 1(78) - Dnipropetrovsk, 2012.- P.73 - 83.

The analysis of the effectiveness of the choice of an optimal model of multiple linear regression (MLR) by different methods. The study was conducted using the method of simulation. Were analyzed five methods for selecting the optimum MLR. The analysis was performed using a specially developed software using MATLAB

The analysis is carried out by simulation using the original program developed in MATLAB environment. It is concluded, when a number of possible explanatory variables is small (less than 15), best results are obtained by the method of all possible regressions using Mallows' statistics as optimality criterion. However, when a number of possible explanatory variables is more than 15, methods of all possible variables are inapplicable. In such a situation, you can use the quick method: backward elimination and stepwise method, which have roughly the same quality specifications and performance.

Bibl. 4, tabl. 2, ill. 2.

UDS 621.372

Penkov A.P., Gerasimov V.V. **System aspects of cryptosystem developing** // System technologies. N 1(78) - Dnipropetrovsk, 2012.- P.84 - 88.

Methodological aspects of behaviour of the developer and the customer of cryptosystems which allow the developer to be assured, initiative are considered, to trace working out process, to find common language with the customer.

Bibl. 7, tabl. 1, ill. 2.

UDC 621.3.083.92

Sopilnik A.V., Chernova S.A. **Composition's modeling for distribution laws of random data** // System technologies. N 1(78) - Dnipropetrovsk, 2012.- P.89 - 94.

Autonomy software for modelings of distribution laws compositions with fixed data parameters, based on the MatLab platform, are created. Histograms are illustrates this processes. The program product is functionally closed and needs near 200 Mb memory for realization.

Bibl.6, ill.3.

UDC 681.326.7

Ponomarev I.V., Rybka Yu.M. **Algorithms for determining the presence of parameters in systems** // System technologies. N 1(78) - Dnipropetrovsk, 2012.- P.95 - 99.

Algorithms and methods of identification of certain parameter in the system are considered. The new method of identification of concrete element and group of elements of the system, allowing to minimize the necessary set of tests is developed.

Bibl. 3.

UDK 62 – 52: 621.317

Tverdostup N.I. **High-Q inductor multiplier** // System technologies. N 1(78) - Dnipropetrovsk, 2012.- P.100 - 105.

The research input impedance of a linear combination of the operating circuit with an inductance in the feedback amplifier. A scheme that implements the effect of increasing the input impedance is inductive with a simultaneous increase in its Q-factor due to the resistance multiplied compensation inductance.

Bibl. 7, ill. 3.

UDC 621.3

Ponomarev I.V. **Language constructions for parallel asynchronous calculations on the reconfigurable multiprocessor systems** // System technologies. N 1(78) - Dnipropetrovsk, 2012.- P.106 - 110.

Proposed language constructs of the management section the programming language of parallel calculations on reconfigurable MCS. Tuning of parameters of system configuration at job definition allow to execute processing by system of certain architecture effectively.

Bibl. 3.

UDC 680.179:681.513

Khandetskyi V.S., Tonkoshkyr Y.A. **Modeling of isothermal polarization analysis data processing using Kolraysh-Williams-Vatt function** // System technologies. N 1(78) - Dnipropetrovsk, 2012.- P.111 - 120.

The mechanisms of approximation for description a variations of polarization current in heterogeneous materials used Kolraysh-Williams-Vatt function are investigated. The possibility to restore a relaxation current dependence in wide time range has been proved on the base of superposition these functions.

Bibl.19, tabl.1, ill.5.

UDC 004.7:004.45

Grigor'yev V.M. **Virtualization laboratory works on computer networks** // System technologies. N 1(78) - Dnipropetrovsk, 2012.- P.121 - 128.

The present paper describes the principles of virtual machines usage for the purpose of network technologies studying. But there is a task for right selection of operating system of network device and virtual machine to provide the comfortable simultaneous work to the students in case of host computer resources limitation. During researches realization we came to decision and selected operating system RouterOS of Mikrotik and virtual machine Qemu within GNS3 framework under control of Ubuntu as more applicable for solution of our tasks.

Ill.1.

UDC 616.12

Alekseev M.A., Akhmetshin K.A. **Adaptive filtering and phase portraits synthesis of nonlinear systems at singular value decomposition basis of embedded vectors** // System technologies. N 1(78) - Dnipropetrovsk, 2012.- P.129 - 132.

Information possibilities a new method of nonlinear dynamical systems analysis are considered. Results experimental testing of the method are presented.

Bibl. 7, il. 6

UDC 669.15'782 – 198.1

Zubov V.L. **Thermokinetic analysis of melting-ferrosilicon solidification industrial production of various grades** // System technologies. N 1(78) - Dnipropetrovsk, 2012. - P.133 - 144.

The results of thermokinetic analysis of smelting and solidification of industrially produced ferrosilicon samples (grades FS45, FS65, FS70) using the method of differential scanning calorimetry (DSC) and thermogravimetry were presented. Quantitative estimation of

thermal effects induced by phase transformations during heating and cooling was given. Heat capacity of ferrosilicon within 20-1,350 °C was defined, the comparative analysis of transformation temperatures in ferrosilicon of different grades was made. Experimental curves of DSC were processed using the method of nonlinear regression with all types of possible transformations analyzed. The biggest correlation of experimental data with Avrami-Yerofeev equation was received. The results of this research are important at choosing temperature parameters of ferrosilicon machine-casting as well as for thermophysical calculations of furnace and out-of-furnace dioxidation processes and steel alloying with ferrosilicon.

Bibl.4.

UDC 519.8

Bogomaz V.M., Nechay I.V. **On regularization of the phase constraints in a class of vector optimization problems** // System technologies. N 1(78) - Dnipropetrovsk, 2012. - P.145 - 151.

The problem of regularization of boundary is in-process investigated in problem of vector optimization with having a special purpose reflections that have by weak property of semicontinuity from below and by uncorporal putting in order cones. The weak concept of regularization of such tasks is entered, for the construction of that the ideas of vector optimization are attracted. The sufficient terms of existence of effective regularizaters are got and an algorithm over of their construction is brought.

Bibl.5.

UDC 629.7.036.5

Mitikov Y. **Systems engineering preheating tank pressurization with oxygen** // System technologies. N 1(78) - Dnipropetrovsk, 2012. - P.152 - 158.

Conducted systematic computational and experimental study of predpus-kovogo boost cylindrical tank with liquid oxygen carrier I. stage at three plants. Results are obtained by heating of the upper layer of the oxygen level the updating vapor recovery, gas injection rate into the tank. The proposals on the improvement of the system-existence.

Bibl. 7.

UDC 621.744.3

Seliverstov V.Yu. **Features of the gas-dynamic influence realization the solidifiable metal at the use of floating feeding technology head insertion** // System technologies. N 1(78) - Dnipropetrovsk, 2012. - P.159 - 164.

Description is presented and the analysis of the specialized devices application features is conducted for realization of the gas-dynamic affecting solidifiable in a casting form metal.

Bibl.9.

UDK 004.67:004.9

Mikhalyov A., Zhuravlyov V., Suhomlin R. **Combined method of signal analysis based on Hilbert-Huang and wavelet transforms in problem diagnosis bearing defects** // System technologies. N 1(78) - Dnipropetrovsk, 2012. - P.165 - 177.

The analysis of bearing vibration signals using the method of Huang-Hilbert and wavelet-analysis. Analyze signals without bearing damage and injuries. Recommendations on

use of a composition of the methods considered for the early detection of incipient defects roller bearing. Conducted a parametric comparison of these techniques together.

Bibl. 9, ill. 7.

UDC 621-501

Melkumyan K., Stenin S. **Constraction of educational procedure and determine of trained conditions analytic laboratories expert** // System technologies. N 1(78) - Dnipropetrovsk, 2012. - P.178 - 182.

In article are set out the training procedure and obtained conditions the learning expert analytical laboratories in terms of determining the extent of the learning and time to stop the learning process.

Keywords: automated learning system, target function of training standard, mean squared measure of dispersion of target function.

Il. 1, bibl. 4.

UDC 669.15 782-198

Zubov V.L. **Ferroalloy smelting siliceous quartzite using Basilkovskogo field** // System technologies. N 1(78) - Dnipropetrovsk, 2012. - P.183 - 190.

Results of FS65 ferrosilicon and MnS25 and MnS17 ferrosilicomanganese test production at ZFZ OJSC and NFZ OJSC using quartzite from Vasilkovsky deposit comparing to quartzite from Ovruchsky deposit were presented.

Bibl. 4.

АВТОРЫ ВЫПУСКА

Ковалев Дмитрий Арсениевич - д.т.н., профессор кафедры металлургии чугуна Национальной металлургической академии Украины.

Ванюкова Наталья Дмитриевна - д.т.н., профессор кафедры металлургии чугуна Национальной металлургической академии Украины.

Худяков Александр Юрьевич - аспирант кафедры металлургии чугуна Национальной металлургической академии Украины.

Бойко Максим Николаевич - к.т.н., доцент кафедры металлургии чугуна Национальной металлургической академии Украины.

Кошуляк А.В. – преподаватель кафедры РЭА ФТФ ДНУ.

Малайчук В.П. – профессор д.т.н., кафедры РЭА ФТФ ДНУ.

Бинкевич Владимир Васильевич – к.т.н., доцент кафедры экономической информатики, Национальная металлургическая академия Украины.

Усиченко Ирина Владимировна – к.физ.-мат.н., доцент кафедры менеджмента, Национальная металлургическая академия Украины.

Козлов Валентин Михайлович – д.х.н., профессор Национальной металлургической академии Украины, заведующий кафедрой физики.

Хлынцев Виктор Прохорович – к.физ.-мат.н., доцент, Национальная металлургическая академия Украины.

Калениченко Виктория Викторовна – старший преподаватель кафедры физики, Национальная металлургическая академия Украины.

Демура Антон Львович - к.т.н., заступник начальника – начальник управління науки, вищої та професійно-технічної освіти головного управління освіти і науки Дніпропетровської облдержадміністрації.

Рябчий Володимир Денисович - к.т.н., доцент кафедри прикладної і комп'ютерної радіофізики Дніпропетровського національного університету ім. О.Гончара.

Ивон Александр Иванович – д.физ.-мат.н., профессор кафедры электронных вычислительных машин Днепропетровского национального университета.

Иштушкин Валерий Федорович – к.т.н., доцент кафедры электронных вычислительных машин Днепропетровского национального университета.

Литвинов Олександр Анатолійович – к.т.н., доцент кафедри електронних обчислювальних машин Дніпропетровського національного університету ім. О. Гончара.

Павленко Максим Витальевич - врач, директор клиники общей и пластической хирургии «Гарвис».

Матвеева Наталия Александровна - к.т.н., доцент каф. ЭВМ, Днепропетровский национальный университет им. Олеса Гончара.

Гаркуша Игорь Викторович - студент ФФЕКС, Днепропетровский национальный университет им. Олеса Гончара.

Ахметшина Людмила Георгіївна - д.т.н., професор кафедри ЕОМ Дніпропетровського національного університету ім. О. Гончара.

Сгоров Артем Олександрович - ст. викладач кафедри АСОІ Дніпропетровського національного університету ім. О.Гончара.

Ямнич Тетяна Сергіївна - асистент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет».

Крохин В.В. - Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара.

Кузьменко Н.О. - Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара.

Пеньков Анатолий Павлович – доц.кафедры электронных вычислительных машин Днепропетровского национального университета им Олеся Гончара.

Герасимов Владимир Владимирович – ст. преподаватель кафедры электронных вычислительных машин Днепропетровского национального университета им Олеся Гончара.

Сопільник Олександр Володимирович – к.т.н., доц. кафедри електронних обчислювальних машин Дніпропетровського національного університету ім. О.Гончара.

Чернова Світлана Анатоліївна – студентка Дніпропетровського національного університету ім. О. Гончара.

Пономарев И.В. - Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара.

Рыбка Ю.М. - Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара.

Твердоступ Н.И. - Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара.

Хандецкий В.С. - Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара.

Тонкошкур Ю.А - Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара.

Григор'єв В.М. - Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара.

Алексіїв Михайл Олександрович - д.т.н., проф., зав. кафедри «Програмного забезпечення комп'ютерних систем» Національного гірничого університету.

Ахметшин Костянтин Олександрович - аспірант Національного гірничого університету.

Богомаз Володимир Миколайович - аспірант кафедри диференціальних рівнянь, Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара.

Нечай Ігор Вікторович - к.ф.-м.н., доцент, кафедра прикладної математики, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна.

Митиков Ю.А.

Селиверстов Вадим Юрьевич - профессор кафедры литейного производства Национальной металлургической академии Украины, доцент, доктор технических наук.

Михалев Александр Ильич – заведующий кафедры Информационных технологий и систем Национальной металлургической академии Украины, профессор, доктор технических наук.

Журавлев Владимир Николаевич – доцент Запорожского национального технического университета, к.т.н.

Сухомлин Роман Александрович – аспирант, ассистент кафедры Информационных технологий и систем НМетАУ.

Мелкумян Єкатерина Юрійвна – ассистент кафедры технічної кібернетики НТУУ “КПІ”.

Стенін Сергій Олександрович - начальник сектору Центрального Митного управління лабораторних досліджень та експертної роботи.

Зубов В.Л. - Национальная металлургическая академия Украины.