

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
ПОВОЛЖСКИЙ РЕГИОН

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

№ 4 (28)

2013

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ
ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

<i>Энгельгардт В. В.</i> Генетический алгоритм структурно-параметрической идентификации линейных динамических систем с помехами на входе и выходе.....	5
<i>Моисеев А. В., Поправко Е. А., Федотов Н. Г.</i> Сравнительный анализ моделей распознавания риска.....	19
<i>Федотов Н. Г., Голдуева Д. А.</i> Формирование триплетных признаков цветных текстур.....	32
<i>Бойков И. В., Бойкова А. И., Кривулин Н. П., Гринченков Г. И.</i> Оптимальные методы табулирования физических полей.....	43
<i>Савельев Б. А., Кручинина М. В.</i> Система передачи на основе канального кода.....	62
<i>Огнев И. В., Огнев А. И., Горьков А. Г.</i> Метод фрагментарного сжатия битовых плоскостей, преобразованных в коды Грея.....	74
<i>Волчихин В. И., Иванов А. И., Фунтиков В. А., Малыгина Е. А.</i> Перспективы использования искусственных нейронных сетей с многоуровневыми квантователями в технологии биометрико-нейросетевой аутентификации.....	86

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И РАДИОТЕХНИКА

<i>Григорьев А. В., Юрков Н. К., Затылкин А. В., Данилова Е. А., Држевецкий А. Л.</i> Структурное обнаружение и различение вырывов проводящего рисунка печатных плат.....	97
<i>Увайсов С. У., Сулейманов С. П., Юрков Н. К.</i> Метод теплового диагностирования латентных технологических дефектов радиоэлектронной аппаратуры и ее тепловая диагностическая модель.....	109
<i>Абросимова О. В., Тычков А. Ю., Чураков П. П.</i> Разработка информационно-измерительного устройства регистрации артериального давления с использованием манжеты с автоматическим запястным контуром.....	119

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

- Кордон М. Я., Ананьев В. М., Вершинин Н. Н., Заонегин А. А.** Метод комплексной оптимизации процесса прямого окисления углеводов кислородом воздуха 128
- Зиновьев Р. С., Савицкий В. Я., Мережко Ю. А., Ивановский В. С.** Исследование характеристик армированных реактопластов при изготовлении подшипников скольжения методом послышной намотки 140
- Соболев А. Н., Косов М. Г.** Моделирование теплообмена в червячных передачах 156
- Родионов Д. П., Хлебникова Ю. В., Козлов Г. В., Гервасьева И. В., Суаридзе Т. Р.** Исследование текстуры железоникелевых сплавов $Fe_{64}Ni_{36}$ и $Fe_{50}Ni_{50}$ методом дифракции обратно отраженных электронов 165
- Щербakov В. С., Корытов М. С., Шабалин А. Н.** Совершенствование методов управления машинными комплексами, обеспечивающих оптимизацию рабочего процесса трубоукладочной колонны 180
- Тюрбева Т. Б., Волкова Г. Д., Григорьев О. Г.** Моделирование процессов создания, функционирования и развития прикладных автоматизированных систем на базе методологии автоматизации интеллектуального труда 189
- Артемов И. И., Зверовицков А. Е., Мартынов А. Н.** Формирование качества поверхностных слоев деталей при изменении характеристик рабочих тел для центробежно-планетарной объемной обработки 199
- Авдеева О. В., Артамонов Д. В., Никиткин А. С., Семенов А. Д.** Автоматизация процесса электроэрозивной обработки с использованием метода экстремального комбинированного управления ... 212
- Киреев С. Ю., Перелыгин Ю. П., Киреева С. Н., Власов Д. Ю.** Электрохимическое осаждение цинка в потенциостатическом режиме импульсного электролиза из малотоксичного лактатного электролита 225

**UNIVERSITY PROCEEDINGS
VOLGA REGION
ENGINEERING SCIENCES**

№ 4 (28)

2013

CONTENT

**COMPUTER SCIENCE, COMPUTER
ENGINEERING AND CONTROL**

<i>Engel'gardt V. V.</i> Genetic algorithm for structural-parametric identification of linear dynamic systems with noise on the input and output	5
<i>Moiseev A. V., Popravko E. A., Fedotov N. G.</i> Comparative analysis of risk identification models.....	19
<i>Fedotov N. G., Goldueva D. A.</i> Formation of triple features of coloured textures.....	32
<i>Boykov I. V., Boykova A. I., Krivulin N. P., Grinchenkov G. I.</i> Optimal methods of physical field tabulation	43
<i>Savel'ev B. A., Kruchinina M. V.</i> Transfer system on the basis of channel code	62
<i>Ognev I. V., Ognev A. I., Gor'kov A. G.</i> Method of fragmentary compression of bit planes, transformed into Gray codes	74
<i>Volchikhin V. I., Ivanov A. I., Funtikov V. A., Malygina E. A.</i> Perspectives of using artificial neural networks with multilayer quantizer in technology of biometric-neural-network authentication	86

**ELECTRONICS, MEASURING EQUIPMENT
AND RADIO ENGINEERING**

<i>Grigor'ev A. V., Yurkov N. K., Zatytkin A. V., Danilova E. A., Drzhevetskiy A. L.</i> Structural detection and distinction of tear-outs of conductive patterns of circuit boards.....	97
<i>Uvaisov S. U., Suleymanov S. P., Yurkov N. K.</i> Method of thermal diagnosing of latent technological defects of radio-electronic equipment and thermal diagnostic model thereof.....	109
<i>Abrosimova O. V., Tychkov A. Yu., Churakov P. P.</i> Development of an information-measuring device of blood pressure registration using cuffs with automatic carpal circuit	119

MACHINE SCIENCE AND BUILDING

<i>Kordon M. Ya., Anan'ev V. M., Vershinin N. N., Zaonegin A. A.</i> Method of complex optimization of the process of direct oxidation of hydrocarbons by atmospheric oxygen.....	128
<i>Zinov'ev R. S., Savitskiy V. Ya., Merezhko Yu. A., Ivanovskiy V. S.</i> Research of armored thermosetting material characteristics in manufacturing friction bearing by the method of fiber reeling.....	140
<i>Sobolev A. N., Kosov M. G.</i> Modeling of heat transfer in worm gears.....	156
<i>Rodionov D. P., Khlebnikova Yu. V., Kozlov G. V., Gervas'eva I. V., Suaridze T. R.</i> Study of textures of Fe-Ni alloys Fe ₆₄ Ni ₃₆ and Fe ₅₀ Ni ₅₀ with back-scattered electron diffraction	165
<i>Shcherbakov V. S., Korytov M. S., Shabalin A. N.</i> Improvement of methods of machine complexes control providing optimization of the working process of the pipelaying column.....	180
<i>Tyurbeeva T. B., Volkova G. D., Grigor'ev O. G.</i> Modeling of the processes of creation, functioning and development of applied automated systems based on the methodology of automation of intellectual labor.....	189
<i>Artemov I. I., Zverovshchikov A. E., Martynov A. N.</i> Forming the quality of surface coatings of workpieces in the course of changing characteristics of working media for three-axis centrifugal treatment	199
<i>Avdeeva O. V., Artamonov D. V., Nikitkin A. S., Semenov A. D.</i> Automation of electric erosion machining using the method of extreme combined control	212
<i>Kireev S. Yu., Perelygin Yu. P., Kireeva S. N., Vlasov D. Yu.</i> Electrodeposition of zinc coatings in the controlled potential mode of impulse electrolysis from low-toxic lactic electrolyte.....	225

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 519.254

В. В. Энгельгардт

ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ СТРУКТУРНО- ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ПОМЕХАМИ НА ВХОДЕ И ВЫХОДЕ

Аннотация. *Актуальность и цели.* Методы идентификации сегодня являются важной составной частью процесса решения задач управления. В случае, если априорная информация об объекте исследования отсутствует, существуют методы определения порядка математических моделей динамических систем при наличии помех во входном и выходном сигналах. Но данные методы не способны ответить на все вопросы об особенностях системы и обозначают лишь некоторые ориентиры в выборе возможной модели. Целью данной работы является исследование алгоритма структурно-параметрической идентификации линейных динамических систем при наличии помех наблюдения во входных и выходных сигналах в условиях априорной неопределенности (неизвестен закон распределения помех). *Материалы и методы.* Предлагается метод структурно-параметрической идентификации, который позволяет оценить порядок линейно-разностного уравнения без использования передаточной функции, импульсной характеристики системы и при наличии помех наблюдения во входных и выходных сигналах. Задача структурной идентификации формализована таким образом, что ее решение закодировано в виде вектора фиксированной длины, где каждый элемент соответствует сдвигу входного и выходного сигналов. Таким образом, задача сводится к решению задачи целочисленного программирования, которая относится к классу NP-hard. Для задачи численной реализации выбора структуры модели предлагается подход, в основу которого положен генетический алгоритм. *Результаты.* В качестве системы для тестирования была выбрана модель с числом входных переменных $x = 4$, где запаздывание для каждого x : $r_1 = 3$, $r_2 = 1$, $r_3 = 1$, $r_4 = 2$, запаздывание по выходу $r = 2$. Коэффициенты по выходу $b = [0,8; -0,5; 0,2]$ и входу $a = [0,4; -0,5; -1; 0,3; -0,2; 0,6; 0,4; -0,5; -1; 0,3; -0,2]$, соответствующие сдвигу r_j для каждого x . Сложность данной системы $p = 9$, и для всех тестов общий объем выборки $N = 10000$. При различных отношениях сигнал/шум на входе и выходе сравниваются следующие методы в качестве функции потерь для параметрической идентификации: метод наименьших квадратов, рекуррентный метод инструментальных переменных, разработанный критерий. *Выводы.* На основе тестовых результатов можно сделать вывод: при увеличении пространства поиска p больше эталонной модели и увеличении количества параметров ошибка уменьшается незначительно. То есть если при изменении p значения критерия изменяются незначительно и не приводят к ощутимому уменьшению ошибки,

то дальнейшие шаги для идентификации производить не имеет смысла. А также заметно преимущество разработанного критерия, который позволяет более точно проводить параметрическую идентификацию с помехами на входе и выходе. Разработанный подход позволяет осуществлять структурно-параметрическую идентификацию линейных динамических систем произвольной размерности по входу и выходу модели и за конечное время составлять тезаурус моделей заданной точности, где каждая модель соответствует критерию устойчивости.

Ключевые слова: структурно-параметрическая идентификация, линейные динамические системы, эволюционные вычисления, генетический алгоритм, целочисленное программирование.

V. V. Engel'gardt

GENETIC ALGORITHM FOR STRUCTURAL-PARAMETRIC IDENTIFICATION OF LINEAR DYNAMIC SYSTEMS WITH NOISE ON THE INPUT AND OUTPUT

Abstract. *Background.* Identification methods, as the methods of mathematical modeling of real dynamic systems subject to uncontrolled random noise are an important part of the process of solving control tasks nowadays. If the a priori information about the object is missing (or it needs to be confirmed), there are methods for determining the order of mathematical models of dynamic systems with noise in the input and output signal. But these methods are not able to answer all the questions about the peculiarities of the system and represent only some guidance in choosing a possible model. The aim of this work is to examine the algorithm of structural-parametric identification of LDS (linear dynamical systems) in the presence of observation noise in the input and output signals in the conditions of a priori uncertainty (unknown distribution law of interference). *Materials and methods.* We propose a method of structural-parametric identification, which allows to estimate the order LDS without the use of a transfer function and impulse response of the system in the presence of interference monitoring of input and output signals. Structural identification problem formalized in the way that its decision coded in fixed length vector where each element corresponds to a shift signal input and output. Thus, the problem is reduced to solving the problem of integer programming which belongs to the class of NP-hard (nondeterministic polynomial time). For the problem of the choice of the structure of the numerical model there is an approach which is based on a genetic algorithm. *Results.* As for the testing system we selected a model with the number of input variables $x = 4$, where the delay of the output for each x : $r_1 = 3$, $r_2 = 1$, $r_3 = 1$, $r_4 = 2$. The coefficients on the output $b = [0,8; -0,5; 0,2]$ and the input of $a = [0,4; -0,5; -1; 0,3; -0,2; 0,6; 0, 4, -0,5, -1, 0,3, 0,2]$, the corresponding to r_j shift for every x . The complexity of the system $p = 9$, and for all tests the total sample size $N = 10000$. In various signal-to-noise ratio on input and output, these methods are compared as a function of loss for parametric identification: the method of least squares, recursive method of instrumental variables and our developed criteria. *Conclusions.* Based on the test results, we can conclude that: increase in the search space p more than the standard model and the increase of number of parameters, the error is reduced slightly. That is, if the changes are minor and the criteria values p do not lead to a noticeable reduction in error, then further steps to identify make no sense. And there is an advantage of the developed criterion that allows more precise parametric identification with noise at the input and the output. The developed ap-

proach allows to conduct structural and parametric identification of LDS arbitrary dimension of input and output models and for a finite time to specify accuracy the-saurus models, where each model meets the criterion of sustainability.

Key words: structural-parametric identification, linear dynamic system, evolutionary algorithm, genetic algorithm, integer programming.

Введение

Методы идентификации как методы построения математических моделей реальных динамических систем, подверженных неконтролируемым случайным воздействиям, сегодня являются важной составной частью процесса решения задач управления. Одной из наиболее применяемых динамических моделей является модель в форме линейного разностного уравнения (1).

Достаточно сложной задачей в этом случае является определение параметров и структуры модели (порядки по входу и выходу) этого уравнения.

Задача параметрической идентификации динамических систем при наличии помех во входных и выходных сигналах является более сложной, чем задача регрессионного анализа. В работе [1] предложен метод для решения таких задач, а рекуррентные модификации разрабатывались и исследовались в [2, 3].

В случае, если априорная информация об объекте исследования отсутствует (или она нуждается в подтверждении), существуют методы определения порядка математических моделей динамических систем при наличии помех в выходном сигнале. Например, использование в качестве критерия квадратичной функции потерь [4–7], информационного критерия Акаике (*AIC*) [8], критерия наименьшего размера модели Риссанена (*MDL*) [8], использование матрицы моментов [4–7]. Можно также использовать информацию о передаточных функциях [6], импульсной характеристике (*ИХ*) [9, с. 62]. Но данные методы не способны ответить на все вопросы об особенностях системы и обозначают лишь некоторые ориентиры в выборе возможной модели.

Данная статья ставит перед собой цель провести исследование алгоритма структурно-параметрической идентификации линейных динамических систем (ЛДС) при наличии помех наблюдения во входных и выходных сигналах в условиях априорной неопределенности (неизвестен закон распределения помех).

Предлагается метод структурно-параметрической идентификации, который позволяет оценить порядок линейно-разностного уравнения (ЛРУ) (1) без использования передаточной функции, импульсной характеристики системы и при наличии помех наблюдения во входных и выходных сигналах.

1. Постановка задачи

Рассмотрим многомерное линейное разностное уравнение с помехами на входе и выходе с бесконечным в обе стороны дискретным временем $i = \dots, -1, 0, 1, \dots$:

$$z_i - \sum_{m=1}^r b_0^{(m)} z_{i-m} = \sum_{j=1}^d \sum_{m=0}^{r_j} a_0^{(mj)} x_{i-m}^{(j)}, \quad (1)$$

входная и выходная переменные наблюдаются с аддитивными помехами в виде

$$y_i = z_i + \xi_1(i), w_i^{(j)} = x_i^{(j)} + \xi^{(j)}(i).$$

Требуется определить по $y_i, w_i^{(j)}$ вектора параметров a, b и порядки r, r_j .

В качестве функции потерь для оценки параметров ЛРУ в условиях помех использовался следующий критерий [10, с. 44]:

$$\min_{\left(\frac{b}{a}\right)} \omega^{-1}(b, a^{(1)} \dots a^{(d)}) U_N(b, a^{(1)} \dots a^{(d)}), \quad (2)$$

где

$$U_N(b, a^{(1)} \dots a^{(d)}) = \left(Y - A_{Y,W} \left(\frac{b}{a} \right) \cdot Y - A_{Y,W} \left(\frac{b}{a} \right) \right),$$

(\cdot, \cdot) - скалярное произведение;

$$\omega(b, a^{(1)} \dots a^{(d)}) = \bar{\sigma}_1^{-2} \left[1 + b^T b + \gamma^{(1)} (a^{(1)})^T a^{(1)} \dots \gamma^{(d)} (a^{(d)})^T a^{(d)} \right],$$

$\bar{\sigma}_1^{-2}$ - средняя дисперсия помехи наблюдения $\xi_1(i)$; $(\bar{\sigma}^{(j)})^2$ - средняя дис-

персия помехи наблюдения $\xi_2^{(j)}(i), \gamma^{(j)} = \frac{(\bar{\sigma}^{(j)})^2}{\bar{\sigma}_1^{-2}}$;

$$a = (a^1 \dots a^d)^T, a^{(j)} = (a^{0,j} \dots a^{r_j,j})^T, b = (b^1 \dots b^r)^T, Y = (y_1 \dots y_N)^T,$$

$$A_{y,w} = \begin{vmatrix} y_0 \dots y_{1-r} & w_1^{(1)} \dots w_{1-r_1}^{(1)} & \dots & w_1^{(d)} \dots w_{1-r_d}^{(d)} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ y_{N-1} \dots y_{N-r} & w_N^{(1)} \dots w_{N-r_1}^{(1)} & \dots & w_N^{(d)} \dots w_{N-r_d}^{(d)} \end{vmatrix}.$$

Приведенный критерий позволяет получить сильно состоятельные оценки [10, с. 43] при выполнении следующих условий:

1. Множество \tilde{B} , которому априорно принадлежат истинные значения параметров устойчивой линейной системы, является компактом.

2. Помехи $\xi(i), \xi^{(j)}(i), j = \overline{1, d}$, статистически независимы и удовлетворяют следующим условиям:

$$E(\xi_1(i+1) / \xi_1(i_0), \dots, \xi_1(i)) = 0 \text{ п.н.,}$$

где E - оператор математического ожидания;

$$E\left(\xi_1^2(i+1)/\xi_1(i_0), \dots, \xi_1(i)\right) \leq h,$$

здесь h – случайная величина;

$$E(h) \leq \pi < \infty; E\left((\xi_1)^4(i)\right) \leq \pi_1 \text{ п.н.};$$

$$E\left(\xi^{(j)}(i+1)/\xi^{(j)}(i_0) \dots \xi^{(j)}(i)\right) = 0 \text{ п.н.};$$

$$E\left(\left(\xi^{(j)}\right)^2(i+1)/\xi^{(j)}(i_0), \dots, \xi^{(j)}(i)\right) \leq h^{(j)},$$

$h^{(j)}$ – случайная величина;

$$E\left(h^{(j)}\right) \leq \pi^{(j)} < \infty; E\left(\xi^{(j)}(i)\right) < \pi_1^{(j)} < \infty.$$

3. $\{x_i^{(1)}, \dots, x_i^{(d)}\}$ статистически не зависят от $\{\xi(i)\}, \{\xi^{(j)}(i)\}, j = \overline{1, d}$.

4. Вектор входных переменных и истинные значения параметров удовлетворяют условиям:

$$N^{-1} \sum_{i=i_0}^N \left(z_r^T(i) : \left(x_{r_1}^{(1)}(i) \right)^T : \dots : \left(x_{r_d}^{(d)}(i) \right)^T \right)^T \times \left(z_r^T(i) : \dots : \left(x_{r_d}^{(d)} \right)^T \right) \xrightarrow[N \rightarrow \infty]{\text{п.н.}} H,$$

где

$$x_{r_j}^{(j)} = \left(x_i^{(j)} \dots x_{i-r_j}^{(j)} \right)^T, \quad z_r(i) = \left(z_{i-1} \dots z_{i-r} \right)^T.$$

2. Алгоритм для структурно-параметрической идентификации

Для задачи численной реализации выбора структуры модели предлагается подход, в основу которого положен генетический алгоритм [11, с. 432]. Он представляет собой эвристический алгоритм поиска, используемый для решения задач оптимизации и моделирования путем случайного подбора, комбинирования и вариации искомых параметров с использованием механизмов, напоминающих биологическую эволюцию. Отличительной особенностью генетического алгоритма является акцент на использование оператора «скрещивания», который производит операцию рекомбинации решений-кандидатов, роль которой аналогична роли скрещивания в живой природе.

Задача структурной идентификации формализована таким образом, что ее решение закодировано в виде вектора фиксированной длины, где каждый элемент соответствует сдвигу по r, r_j . Таким образом, задача сводится к решению задачи целочисленного программирования (*Integer programming*) которая относится к классу *NP-hard (nondeterministic polynomial time)* [12].

Случайным образом создается множество генотипов начальной популяции, причем, даже если она окажется совершенно неконкурентоспособной, генетический алгоритм все равно достаточно быстро переведет ее в жизнеспособную популяцию.

Каждый генотип оценивается с использованием «функции приспособленности», в нашем случае данной функцией является критерий, в результате чего с каждым генотипом ассоциируется определенное значение («приспособленность»), которое определяет, насколько хорошо фенотип (структура) описываемый им, решает поставленную задачу (значение приспособленности, т.е. значение критерия).

Из полученного множества решений («поколения») с учетом значения «приспособленности» выбираются решения, к которым применяются «скрещивание» и «мутация».

Задача «скрещивания» заключается в том, чтобы потомок или потомки имели возможность унаследовать черты обоих родителей, «смешав» их. Так как кодирование генотипов у нас задается вектором, то для осуществления операции скрещивания автор использует следующий метод: выбирается случайный ген в генотипе, данными участками обмениваются оба родителя. На этапе «мутации» каждый ген генома с вероятностью p изменяется произвольным образом.

Конечным результатом «скрещивания» и «мутации» является получение новых решений. Для них также вычисляется значение приспособленности, и затем производится отбор («селекция») лучших решений в следующее поколение.

На этапе отбора нужно из всей популяции выбрать определенную ее долю, которая останется «в живых» на этом этапе эволюции. Вероятность выживания особи зависит от значения функции приспособленности.

Этот набор действий повторяется итеративно, так моделируется «эволюционный процесс», продолжающийся несколько поколений, пока не будет выполнен критерий остановки алгоритма, а именно в течение нескольких поколений значение функции приспособленности для каждой особи в популяции меняется «незначительно».

Таким образом, можно выделить следующие этапы генетического алгоритма: задать целевую функцию (приспособленности) для особей популяции, сгенерировать случайным образом начальную популяцию. Затем циклично проводить следующие операции над популяцией: размножение (скрещивание), мутирование, вычисление значения критерия для данной структуры, проверку на устойчивость и соответствие размерности, формирование нового поколения (селекция) на основе выбора лучших в текущем. При выполнении условий остановки закончить выполнение цикла, в противном случае повторить операции.

В общем виде алгоритм структурно-параметрической идентификации имеет следующий вид:

1. Создаем базы данных для структур моделей: *store* – для всех параметрически идентифицированных структур, *stab_store* – только для устойчивых систем, *store_p* является результирующим тезаурусом для моделей с минимальным значением критерия для каждой границы сложности,

$$p = r + \sum_{j=1}^d r_j .$$

2. Задаем ограничения для алгоритма: степень адекватности Δ , максимально допустимая сложность p .

3. Задаем начальную границу сложности $p = 1$.

4. Запускаем генетический алгоритм (ГА) для текущего ограничения по p .

5. Для каждой структуры, на каждой итерации ГА при вычислении «функции приспособленности» производим следующие действия:

– проверяем, была ли такая структура уже вычислена в *store*, если была, извлекаем значения критерия и передаем в ГА;

– производим параметрическую идентификацию для текущей структуры-особи r, r_j , на основе критерия (2) и ограничения на параметры в виде алгебраического критерия устойчивости Рауса – Гурвица;

– добавляем модель в *store*;

– проверяем полученные параметры модели на устойчивость с помощью характеристического уравнения и в случае устойчивости модели добавляем ее в *stab_store*;

6. Сортируем *stab_store* по значению критерия от меньшего к большему и добавляем модель с меньшим критерием в выходной тезаурус *store_p*.

7. Увеличиваем границу поиска для ГА $p = p + 1$.

8. Если при расширении пространства поиска p изменение критерия для оптимальной модели текущей p произойдет меньше, чем на Δ , по сравнению с предыдущим оптимальным значением, т.е. $p-1$, то в этом случае останавливаем алгоритм.

9. Если пространство поиска p достигло максимально допустимой сложности, останавливаем алгоритм.

10. Переходим к п. 4.

После остановки алгоритма выводим график зависимости критерия от p , а также получившийся тезаурус *store_p*, в котором модели уже отсортированы по сложности (размерности p) и указаны значения критерия (ошибки) для каждой модели.

На основе данного метода был разработан программный продукт «Структурно-параметрическая идентификация линейных динамических систем с помехами на входе и выходе», который позволяет фактически в автоматическом режиме производить структурно-параметрическую идентификацию ЛДС. В качестве среды для реализации данного продукта был выбран *Matlab* компании *The MathWorks*, одним из решающих преимуществ которого является богатое «математическое окружение» готовых функций и компонентов систем, которые необходимы для реализации данного метода.

Программный продукт состоит из множества модулей (упрощенное представление приведено на рис. 1), каждый из которых отвечает за определенную часть алгоритма.

Для решения задачи структурной идентификации в качестве основы был взят *Genetic Algorithm Solver*, который реализовывает метод ГА и является частью пакета *Matlab*.

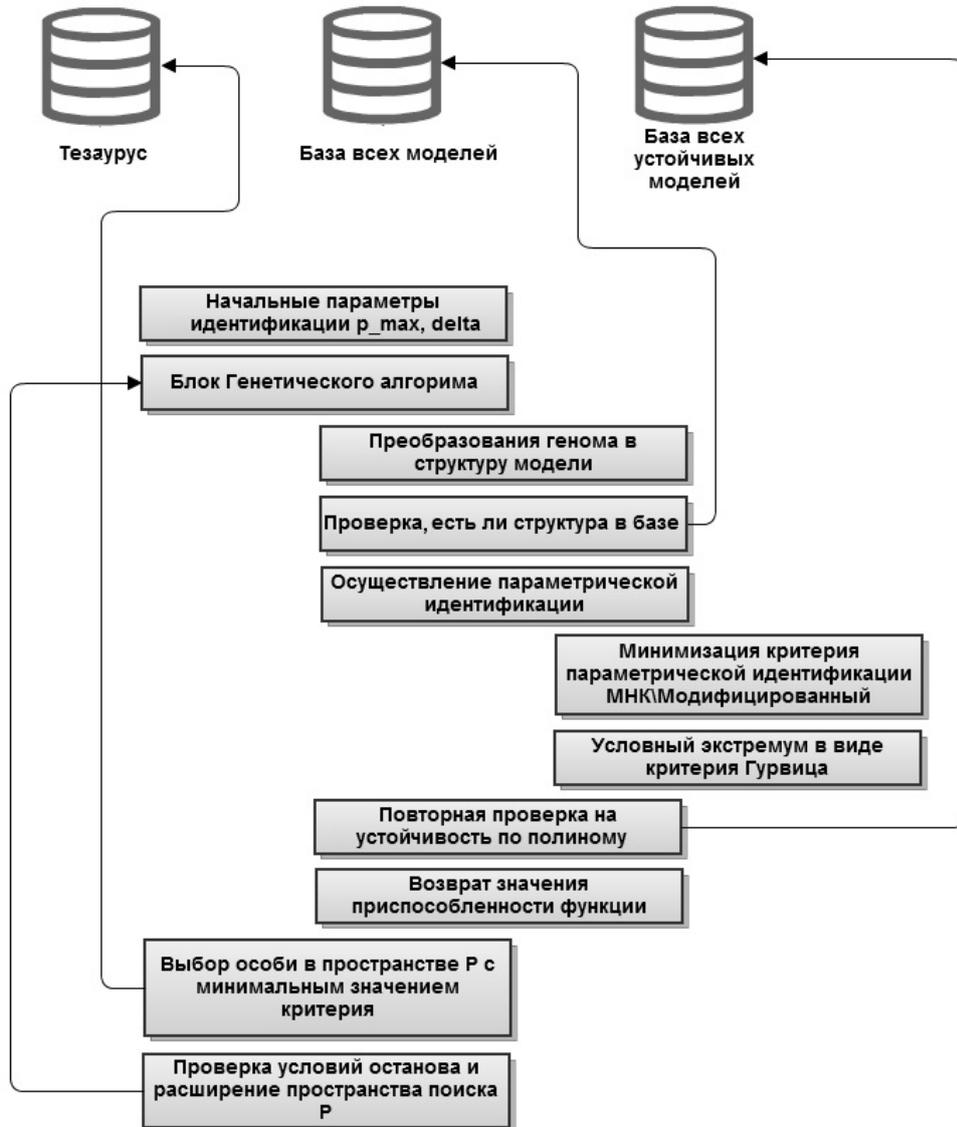


Рис. 1. Упрощенная структура программы

В предоставленном виде данный пакет не адаптирован под решение задач целочисленного программирования (*Integer programming*). Для адаптации данного инструмента используется следующий метод [13]:

- Задаются верхняя и нижняя целочисленные границы области, в которой будет происходить поиск.
- Создается производная функция генерации начальной популяции, в которой гарантированно получаем целочисленное значение для каждой особи. Пример функции:

```
function Population = int_pop(GenomeLength,FitnessFcn,options)
totalpopulation = sum(options.PopulationSize); range = options.PopInitRange;
lower = range(1,:); span = range(2,:) - lower; Population = repmat(lower,totalpopulation,1) + round(repmat(span,totalpopulation,1).*rand(totalpopulation,GenomeLength));
```

• Создаем производную функцию мутации при мутировании, получается строго целочисленное значение особи. Пример функции:

```
function mutationChildren = int_mutation(parents,options, GenomeLength,
FitnessFcn,state,thisScore,thisPopulation)
shrink = .01; scale = 1; scale = scale - shrink * scale * state.Generation/options.Generations;
range = options.PopInitRange; lower = range(1,:); upper = range(2,:);
scale = scale * (upper - lower); mutationPop = length(parents);
mutationChildren = repmat(lower,mutationPop,1) + round(repmat(scale,mutationPop,1) .* rand(mutationPop,GenomeLength));
```

При данном подходе ГА, реализованный в *Matlab*, будет производить пространственный поиск строго в рамках заданных границ (*lower*, *upper*), поиск будет проходить строго в целочисленной области.

3. Результаты моделирования

В качестве системы для теста была выбрана следующая модель.

Число входных переменных $x = 4$, где запаздывание для каждого x будет: $r_1 = 3$, $r_2 = 1$, $r_3 = 1$, $r_4 = 2$, запаздывание по выходу $r = 2$. Для нашего метода данная модель будет выглядеть в виде вектора $r = [3; 1; 1; 2; 2]$, где каждое значение r соответствует порядку r_j для каждого x , кроме последнего значения – оно обозначает порядок r по выходу. Коэффициенты по выходу $b = [0,8; -0,5; 0,2]$ перенесены в правую часть модели (1), это необходимо для удобства реализации вычислений. Коэффициенты по входу $a = [0,4; -0,5; -1; 0,3; -0,2; 0,6; 0,4; -0,5; -1; 0,3; -0,2]$ соответствуют сдвигу r_j для каждого x . Сложность данной системы $p = 9$, для всех тестов общий объем выборки $N = 10000$.

Сравниваются следующие методы в качестве функции потерь для параметрической идентификации:

- метод наименьших квадратов (МНК);
- рекуррентный метод инструментальных переменных [14], со следующим выбором вектора инструментальных переменных:

$$\Psi_i = \left| y_{i-r-1} \dots y_{i-2r} \mid w_{i-r_1}^{(1)} \dots w_{i-2r_1}^{(1)} \mid \dots \mid w_{i-r_d}^{(d)} \dots w_{i-2r_d}^{(d)} \right|^T ;$$

- разработанный критерий.

Результаты работы алгоритмов сравнивались по относительной погрешности моделирования:

$$\delta z_N = \sqrt{\|\hat{z} - z\|^2 / \|z\|^2} \cdot 100\% ,$$

где $z = |z_i, \dots, z_N|^T$ – вектор выходной ненаблюдаемой переменной, $\hat{z}_N = |\hat{z}_i, \dots, \hat{z}_N|^T$ – оценка вектора выходной ненаблюдаемой переменной, полученная с помощью модели.

Так как результатом работы нашего метода является тезаурус моделей, возникает проблема сравнения моделей различных структур, поэтому для результирующей оценки будут браться модели одинаковой сложности p в каждом тезаурусе и модели, при которых сработал критерий останова, т.е. $\Delta \leq 1$ [15, с. 356]. В качестве подтверждения данного высказывания был проведен тест на системе со следующими параметрами:

$$\sigma_2 / \sigma_x = 0,2;$$

$$\sigma_1 / \sigma_z = 0,2;$$

$$\sigma_x^2 = [0,0396; 0,0403; 0,0415; 0,0396; 0,0397];$$

$$\sigma_y^2 = 0,3497; \gamma = [0,1132; 0,1152; 0,1186; 0,1134; 0,1136].$$

На рис. 2, 3 представлены графики сходимости всех трех методов для заданных условий, на их основе можно сделать вывод: при увеличении пространства поиска p больше эталонной модели и увеличении количества параметров ошибка Δ уменьшается незначительно. То есть если изменения Δ значения критерия незначительны и не приводят к ощутимому уменьшению ошибки, то дальнейшие шаги для идентификации производить не имеет смысла. В табл. 1, 2 представлены результаты тестирования.

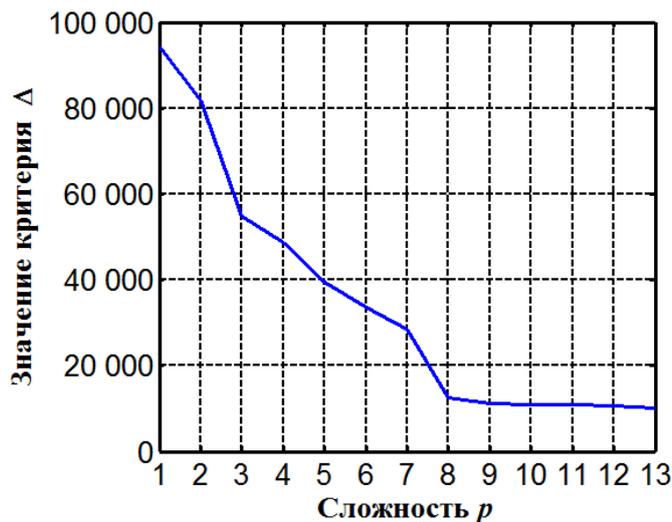
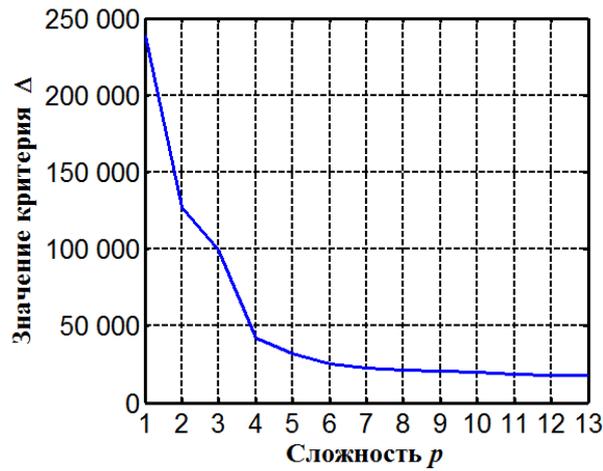


Рис. 2. График сходимости разработанного критерия

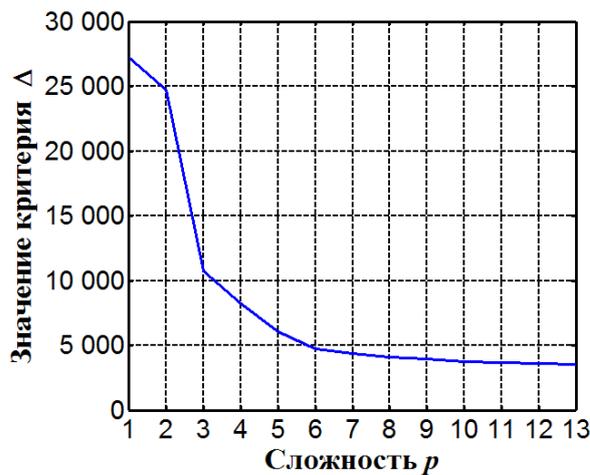
Заключение

Таким образом, разработанный подход позволяет осуществлять структурно-параметрическую идентификацию ЛДС произвольной размерности по входу и выходу модели и за конечное время составлять тезаурус моделей заданной точности, представленных в порядке наименьшей сложности, где каждая модель соответствует критерию устойчивости.

Также разработан критерий, который позволяет более точно проводить параметрическую идентификацию с помехами на входе и выходе.



а)



б)

Рис. 2. График сходимости: *а* – инструментальные переменные; *б* – метод наименьших квадратов

Таблица 1

Сравнение критериев при $p = 9$ (заданная сложность модели)

σ_2 / σ_x	σ_1 / σ_z	Погрешность $\delta\theta$, %		
		МНК	Метод инструментальных переменных	Разработанный критерий
0,2	0,2	8,61	8,39	7,32
0,2	0,5	12,8	13,44	7,37
0,2	0,7	15,3	16,1	7,56
0,5	0,2	18,7	18,69	10,72
0,7	0,2	28,87	29,19	7,63
0,5	0,5	23,13	24,09	10,21
0,5	0,7	25,11	22,89	10,35
0,7	0,5	33,15	33,26	12,42
0,7	0,7	31,31	31,65	10,76

Сравнение критериев при $\Delta \leq 1$

σ_2 / σ_x	σ_1 / σ_z	Погрешность $\delta\theta$, %		
		МНК	Метод инструментальных переменных	Разработанный критерий
0,2	0,2	3,83	3,98	1,17
0,2	0,5	4,40	4,62	2,73
0,2	0,7	5,06	7,23	3,84
0,5	0,2	17,5	17,45	2,82
0,7	0,2	28,24	28,07	3,67
0,5	0,5	18,51	18,31	3,13
0,5	0,7	18,97	18,37	7,51
0,7	0,5	29,58	29,88	4,38
0,7	0,7	31,57	32,53	5,93

Список литературы

1. **Кацюба, О. А.** Особенности применения МНК для оценивания линейных разностных операторов в задачах идентификации объектов управления / О. А. Кацюба, А. И. Жданов // Автоматика и телемеханика. – 1979. – № 8. – С. 86–96.
2. **Иванов, Д. В.** Рекуррентная параметрическая идентификация многомерных линейных динамических систем с автокоррелированными помехами во входных и выходных сигналах / Д. В. Иванов, О. А. Кацюба // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Физико-математические науки. – 2011. – № 4 (25). – С. 102–109.
3. **Иванов, Д. В.** Рекуррентное оценивание билинейных динамических систем с помехами во входном и выходном сигналах / Д. В. Иванов, О. А. Усков // Известия Южного федерального университета. Сер. Технические науки. – 2012. – № 6 (131). – С. 187–192.
4. **Толчеек, В. О.** Методы идентификации линейных одномерных динамических систем / В. О. Толчеек, Т. В. Яготкина. – М. : Московский энергетический институт, 1997. – 108 с.
5. **Фатуев, В. А.** Пакет программ структурной и параметрической идентификации линейных одномерных динамических систем / В. А. Фатуев, А. В. Каргин, В. М. Понятский // Проектирование инженерных научных приложений в среде Matlab : тр. II Всерос. науч. конф. – М. : ИПУ РАН, 2004. – С. 715–762.
6. **Фатуев, В. А.** Структурно-параметрическая идентификация динамических систем : учеб. пособ. / В. А. Фатуев, А. В. Каргин, В. М. Понятский. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2003. – 156 с.
7. **Фатуев, В. А.** Структурно-параметрическая идентификация многомерных нестационарных динамических систем / В. А. Фатуев, А. В. Юдаев, В. М. Понятский, А. В. Каргин, М. С. Оберман // Идентификация систем и задач управления (SICPRO'2004) : тр. III Междунар. конф. – М. : ИПУ РАН, 2004. – С. 159–186.
8. **Ljung, L.** System Identification – Theory for the User / L. Ljung. – 2nd edition. – Prentice Hall, Upper Saddle River N. J., 1999.
9. **Анисимов, А. С.** Идентификация порядка линейного разностного уравнения / А. С. Анисимов, В. Т. Кононов // Идентификация систем и задачи управления SICPRO'2000 : тр. Междунар. конф. (Москва, 26–28 сентября 2000 г., Институт

- проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН). – М. : Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2000. – 2534 с.
10. **Кацюба, О. А.** Теория идентификации стохастических динамических систем в условиях неопределенности : моногр. / О. А. Кацюба. – Самара : Изд-во СамГУПС, 2008. – 119 с.
 11. **Емельянов, В. В.** Теория и практика эволюционного моделирования / В. В. Емельянов, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик. – М. : Физматлит, 2003. – 432 с.
 12. **Matousek, J.** A subexponential bound for linear programming / Matousek Jiri, Sharir Micha, Welzl Emo // *Algorithmica*. – 1996. – № 16. – P. 498–516.
 13. **Deep Kusum.** A real coded genetic algorithm for solving integer and mixed integer optimization problems / Deep Kusum, Krishna Pratap Singh, M. L. Kansal, and C. Mohan // *Applied Mathematics and Computation*. – 2009. – № 212 (2). – P. 505–518.
 14. **Thil, S.** Contributions à l'identification de modèles avec des erreurs en les variables. Thesis of Doctorat / S. Thil. – University of Henri Poincaré, Nancy 1, 2007.
 15. **Льютг, Л.** Идентификация систем. Теория для пользователя / Л. Лютг. – М. : Наука, 1991. – 432 с.

References

1. Katsyuba O. A., Zhdanov A. I. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and remote control]. 1979, no. 8, pp. 86–96.
2. Ivanov D. V., Katsyuba O. A. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Fiziko-matematicheskie nauki* [Bulletin of Samara State Technical University. Series: Physical and mathematical sciences]. 2011, no. 4 (25), pp. 102–109.
3. Ivanov D. V., Uskov O. A. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Ser. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of South Federal University. Series: Engineering sciences]. 2012, no. 6 (131), pp. 187–192.
4. Tolcheek V. O., Yagotkina T. V. *Metody identifikatsii lineynykh odnomernykh dinamicheskikh sistem* [Methods of linear one-dimensional dynamic system identification]. Moscow: Moskovskiy energeticheskiy institut, 1997, 108 p.
5. Fatuev V. A., Kargin A. V., Ponyatskiy V. M. *Proektirovanie inzhenernykh nauchnykh prilozheniy v srede Matlab: tr. II Vseros. nauch. konf.* [Design of engineering scientific applications in Matlab environment: II All-Russian scientific conference]. Moscow: IPU RAN, 2004, pp. 715–762.
6. Fatuev V. A., Kargin A. V., Ponyatskiy V. M. *Strukturno-parametricheskaya identifikatsiya dinamicheskikh sistem: ucheb. posob.* [Structural-parametric identification of dynamic systems: tutorial]. Tula: Izd-vo TulGU, 2003, 156 p.
7. Fatuev V. A., Yudaev A. V., Ponyatskiy V. M., Kargin A. V., Oberman M. S. *Identifikatsiya sistem i zadach upravleniya (SICPRO'2004): tr. III Mezhdunar. konf.* [Identification of control systems and tasks (SICPRO'2004): proceedings of III International conference]. Moscow: IPU RAN, 2004, pp. 159–186.
8. Ljung L. *System Identification – Theory for the User*. 2nd edition. Prentice Hall, Upper Saddle River N. J., 1999.
9. Anisimov A. S., Kononov V. T. *Identifikatsiya sistem i zadachi upravleniya SICPRO'2000: tr. Mezhdunar. konf. (Moskva, 26–28 sentyabrya 2000 g. Institut problem upravleniya im. V. A. Trapeznikova RAN)* [Identification of control systems and tasks SICPRO'2000: Proceedings of the International conference (Moscow, 26–28 September 2000, Institute of Control Problems named after V. A. Trapeznikov of the Russian Academy of Sciences)]. Moscow: Institut problem upravleniya im. V. A. Trapeznikova RAN, 2000, 2534 p.

10. Katsyuba O. A. *Teoriya identifikatsii stokhasticheskikh dinamicheskikh sistem v usloviyakh neopredelennosti: monogr.* [Theory of identification of stochastic dynamic systems in conditions of uncertainty: monograph]. Samara: Izd-vo SamGUPS, 2008, 119 p.
11. Emel'yanov V. V., Kureychik V. V., Kureychik V. M. *Teoriya i praktika evolyutsionnogo modelirovaniya* [Theory and practice of evolutionary modeling]. Moscow: Fizmatlit, 2003, 432 p.
12. Matousek J., Sharir Micha, Welzl Emo. *Algorithmica*. 1996, no. 16, pp. 498–516.
13. Deep Kusum., Krishna Pratap Singh, Kansal M. L., and Mohan C. *Applied Mathematics and Computation*. 2009, no. 212 (2), pp. 505–518.
14. Thil S. *Contributions à l'identification de modèles avec des erreurs en les variables. Thesis of Doctorat* [Contributions to identification of models with errors in variables. Thesis of Doctorate]. University of Henri Poincaré, Nancy 1, 2007.
15. L'yung L. *Identifikatsiya sistem. Teoriya dlya pol'zovatelya* [System identification. Theory for a user]. Moscow: Nauka, 1991, 432 p.

Энгельгардт Владислав Викторович
преподаватель, кафедра мехатроники
в автоматизированных производствах,
Самарский государственный университет
путей сообщения (Россия, г. Самара,
Первый Безымянный переулок, 18)

E-mail: hexware@gmail.com

Engel'gardt Vladislav Viktorovich
Lecturer, sub-department of mechatronics
in automated production, Samara State
University of Communication Lines
(18 First Bezymyanny lane, Samara, Russia)

УДК 519.254

Энгельгардт, В. В.

Генетический алгоритм структурно-параметрической идентификации линейных динамических систем с помехами на входе и выходе / В. В. Энгельгардт // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 4 (28). – С. 5–18.

А. В. Моисеев, Е. А. Поправко, Н. Г. Федотов

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ РАСПОЗНАВАНИЯ РИСКА

Аннотация. *Актуальность и цели.* Интерес к моделям распознавания риска связан с желанием автоматизировать принятие управленческих решений в условиях риска, в которых учета только осредненного конечного результата не достаточно. На настоящий момент имеется несколько подходов к оценке риска. В каждом конкретном случае требуется сравнение моделей по качеству распознавания. Целью данной работы является рассмотрение процедуры сравнения моделей. В работе процедура сравнения различных моделей распознавания проводится для конкретных результатов, полученных на основе реальной статистики банка с использованием алгоритма, построенного авторами. *Материалы и методы.* Построение моделей проведено с применением статистических пакетов прикладных программ SPSS и Statistica. Рассматривается модель дискриминантного анализа, логит-модель и пробит-модель. Для характеристики качества распознавания определяются оценки вероятности ошибок второго и первого рода. Для сравнения моделей привлекается ROC-кривая. Для окончательного вывода о качестве построенных моделей используется экзаменующая выборка. *Результаты.* Совокупный анализ построенных моделей и на обучающей, и на экзаменующей выборке показал высокую степень эффективности модели дискриминантного анализа в целях отнесения потенциальных заемщиков к одной из двух групп. Данная модель характеризуется высокой степенью прогнозирования кредитоспособных клиентов, а также высоким качеством распознавания дефолта заемщика. Применение результатов дискриминантного анализа в алгоритме изучения дает возможность прогнозировать некредитоспособность заемщика и может служить критерием для формирования групп высокого риска по определенным клиентам банка. *Выводы.* Рассмотренная процедура сравнения качества моделей распознавания позволяет повысить качество информационного обеспечения принятия решений в условиях риска.

Ключевые слова: система распознавания риска, кредитный риск, дискриминантный анализ, логит-модель, пробит-модель.

А. В. Моисеев, Е. А. Поправко, Н. Г. Федотов

COMPARATIVE ANALYSIS OF RISK IDENTIFICATION MODELS

Abstract. *Background.* The interest to models of risk identification relates to the desire to automate management decision making in conditions of risks when the account of the averaged end result is insufficient. At the present time there are several approaches to risk assessment. In every particular case it requires comparison of models by quality of identification. The study is aimed at consideration of model comparison procedure. In the work the comparison of various models is carried out for concrete results obtained on the basis of real statistics of a bank using the algorithm suggested by the authors. *Materials and methods.* Model building was carried out using SPSS and Statistica applied programs. The article considers models of discriminant analysis, logit model and probit model. To characterize the quality of identification the authors determine the values of first and second type errors proba-

bility. To compare the models the ROC-curve is involved. To form the final conclusion about the built model quality the researchers apply examining sample. *Results.* Combined analysis of the built models on training and examining samples showed high efficiency of the model of discriminant analysis for placing potential borrowers into either of two groups. The given model is characterized by high level of client's creditworthiness forecasting, as well as by high quality of borrower's default identification. The application of results of the discriminant analysis in the study algorithm allows forecasting insolvency of borrowers and may serve as a criterion for high risk group formation of bank's certain clients. *Conclusions.* The considered procedure of identification model quality comparison enables to increase quality of information support for decision making in conditions of risks.

Key words: Recognition System Risk, Credit risk, discriminant analysis, logit model, probit model.

Введение

Для построения эффективной системы управления кредитными рисками следует автоматизировать систему распознавания риска. На данный момент существует множество подходов для получения прогноза вероятности возврата кредита [1–3]. В статье предлагается алгоритм построения модели (рис. 1) распознавания риска с учетом многообразия выбора базовых моделей.

Для окончательного выбора конкретной модели требуется сравнение качества распознавания риска. Данный этап в литературе мало освещен. Целью работы является восполнение этого пробела. В статье на основе разработанной системы проводится сравнение различных моделей распознавания риска.

В последнее время для оценки кредитных рисков и дефолта заемщиков получила распространение логистическая регрессия. С помощью метода бинарной логистической регрессии исследуют зависимость дихотомических переменных от независимых переменных, имеющих любой вид шкалы. Как правило, в случае с дихотомическими переменными речь идет о некотором событии, которое может произойти или не произойти.

В моделях логистической регрессии, а также в пробит-моделях зависимая переменная Y принимает фиксированные значения из некоторого заранее предопределенного набора, т.е. моделируемому объекту приписывается выбор между двумя и более возможными альтернативами. В частности, модель с бинарной переменной включает отклик, принимающий два значения (0 и 1), а также регрессоры X , которые содержат факторы, определяющие альтернативный выбор.

Бинарная регрессия рассчитывает вероятность наступления события в зависимости от значений независимых переменных, например, вероятность дефолта того или иного заемщика. Рассматриваемые логит- и пробит-модели [1] имеют логистическое и нормально распределенное отклонение.

По построенной выборке заемщиков в качестве отклика Y примем альтернативу 0 («кредит не вернули») и 1 («кредит вернули»). Обучающая выборка, используемая для построения модели, состоит из 55 наблюдений, из них 32 заемщика имеют положительную кредитную историю (вернули кредит – 1), а 23 – отрицательную (кредит не вернули – 0). Оценивание коэффициентов происходит путем их «подбора» с минимизацией дисперсии остатков.

Любые отклонения наблюдаемых величин от предсказанных означают некоторые потери в точности предсказаний, например из-за случайного шума.

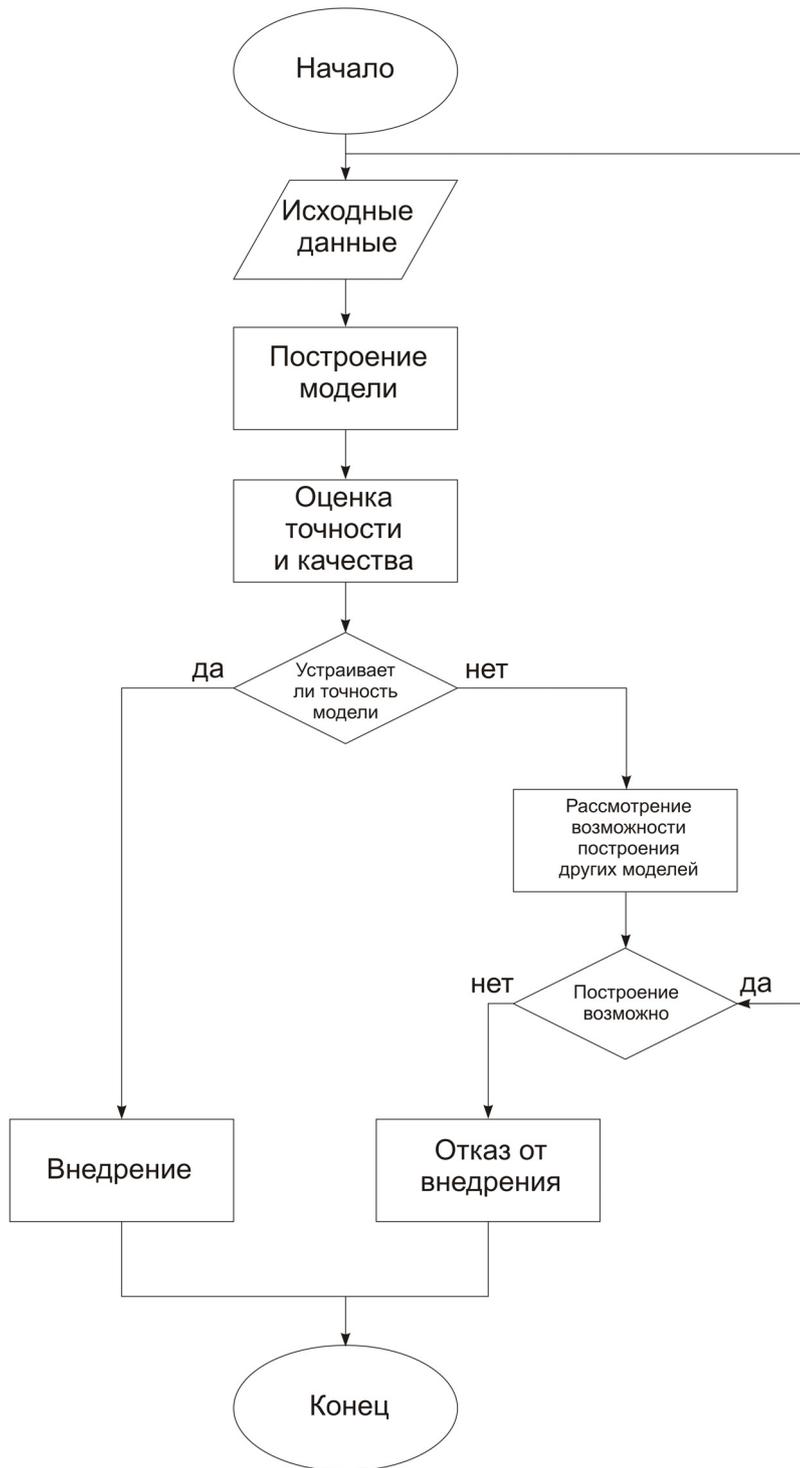


Рис. 1. Блок-схема алгоритма построения модели распознавания

Дискриминантный анализ при оценке кредитных рисков и определении дефолта заемщика используется в целях принятия решения о том, какие переменные различают (дискриминируют) совокупности (группы). То есть целью такого анализа в области кредитного скоринга является отнесение того или иного потенциального клиента банка к одной из двух категорий (кредитоспособный (группа 1) или некредитоспособный заемщик (группа 0)) и определение того, какие переменные дают наилучшее предсказание его дефолта.

Ядром дискриминантного анализа является построение так называемой дискриминантной функции, по значениям коэффициентов которой можно с максимальной четкостью провести разделение по группам. Процедура дискриминантного анализа разбивается на две группы: первая группа позволяет интерпретировать различия между имеющимися группами, вторая – проводить классификацию новых объектов в тех случаях, когда неизвестно заранее, к какому из существующих классов они принадлежат.

1. Логит-модель и пробит-модель

Реализация логистической регрессии в пакете прикладных программ (далее ППП) SPSS позволяет получить коэффициенты рассматриваемой модели:

$$Z = -3,95 + 1,44x_1 - 5,3x_2 + 16,8x_3 + 3,4x_4 - 1,43x_5 - 1,48x_6 + 1,76x_7 - 4,3x_8 + 0,23x_9 + 0,82x_{10} + 3,16x_{11} - 1,9x_{12} - 3,35x_{13}, \quad (1)$$

x_1, \dots, x_n – множество независимых переменных (также называемых признаками, предикторами или регрессорами), на основе значений которых требуется вычислить вероятность принятия того или иного значения зависимой переменной.

Регрессор Z является логитом, используемым в дальнейшем для вычисления вероятности дефолта заемщика.

Существенной стороной анализа является проверка пригодности модели в целом. В табл. 1 представлена информация, касающаяся построенной модели и результатов оценивания ее параметров.

Таблица 1
Статистическая информация логит-модели

Характеристики		Значение статистики χ^2	Число степеней свободы, Df	Значимость коэффициента, Sig
Шаг 1	Шаг	46,129	13	0,000
	Блок	46,129	13	0,000
	Модель	46,129	13	0,000

Для проверки значимости построенной модели используют представленные значения статистики хи-квадрат и p -уровень значимости. Исходя из представленных в табл. 1 данных, можно утверждать, что все параметры модели статистически значимы, поскольку значение статистики хи-квадрат для разницы между текущей моделью и моделью, где параметры равны нулю, высоко значимо ($p < 5\%$).

Качество приближения регрессионной модели оценивается при помощи функции подобия. Мерой правдоподобия служит отрицательное удвоенное значение логарифма этой функции. В качестве начального значения для $-2LL$ применяется значение, получаемое для регрессионной модели, содержащей только константы. После добавления переменных значение $-2LL$ составило 28,6; это значение на 46,13 меньше, чем начальное. Подобное снижение величины означает улучшение; разность обозначается как величина хи-квадрат и является очень значимой.

Два других полученных показателя (R^2 (модель Кокса – Шелла) = 0,568 и R^2 (модель Наделькеркеса) = 0,764) являются мерами определенности, указывающими на ту часть дисперсии, которую можно объяснить с помощью логистической регрессии. Мера определенности по Коксу и Шеллу имеет свой недостаток (значение, равное 1, является теоретически недостижимым), однако он устраняется благодаря модификации данной меры по методу Наделькеркеса. Часть дисперсии, объяснимой с помощью логистической регрессии, в данном примере составляет 76,4 %.

При построении бинарных моделей имеет значение проведение анализа качества прогнозирования модели (табл. 2), в которой наблюдаемые показатели принадлежности к группе противопоставляются предсказанным на основе рассчитанной модели.

Таблица 2

Качество классификации логит-модели

Наблюдаемые значения	Предсказанные значения		
	Y		Процент правильных
	0	1	
0	19	4	82,6
1	2	30	93,9
Общий процент			89,1

Построенная модель имеет высокое качество распознавания кредитоспособных и некредитоспособных заемщиков – 93,8 и 82,6 % соответственно. Однако вероятность ошибок 2-го рода (0,6) значительно больше вероятности ошибок 1-го рода (0,4). Естественно, что с точки зрения кредитного риска ошибки 2-го рода являются наиболее фатальными по сравнению с ошибками 1-го рода, характеризующими лишь упущенные возможности банка, в то время как ошибки 2-го рода приводят к убыткам кредитной организации.

Модель логистической регрессии с исключением малоинформативных факторов отличается гораздо меньшим качеством прогнозирования. В результате пошагового анализа в модель были включены только три фактора (семейное положение, возраст заемщика и кредитная история в банке), описывающие состояние потенциального клиента.

Модель логистической регрессии с отобранными переменными имеет следующий вид:

$$Z = 10,85 - 2,18x_5 - 2,53x_8 - 1,09x_{13}. \quad (2)$$

Качество построенной модели представлено в табл. 3. Очевидно, что включение столь малого числа факторов не может обеспечить высокую точность прогнозирования, тем более что проведение многомерного шкалирования показало выделение наиболее информативных четырех факторов, а не трех. Качество прогноза модели, построенной в результате пошагового анализа, по сравнению с моделью с включением всех факторов, ниже на 12,7 % (табл. 3).

Таблица 3

Качество классификации логит-модели с исключением незначимых факторов

Наблюдаемые значения	Предсказанные значения		
	Y		Процент правильных
	0	1	
Шаг 1 Y 0	16	7	69,6
1	3	29	90,6
Общий процент			81,8
Шаг 2 Y 0	17	6	73,9
1	6	26	81,3
Общий процент			78,2
Шаг 3 Y 0	14	9	60,9
1	4	28	87,5
Общий процент			76,4

Реализация пробит-модели в ППП Statistica осуществляется аналогичным образом, при этом построенная модель имеет следующий вид:

$$Z = -2,43 - 0,79x_1 + 2,9x_2 - 4,85x_3 - 1,83x_4 + 0,85x_5 + 0,8x_6 - 1,07x_7 + 2,52x_8 - 0,14x_9 - 0,46x_{10} - 1,82x_{11} + 1,07x_{12} + 1,93x_{13}. \quad (3)$$

Информация, касающаяся построенной модели и результатов оценивания ее параметров, представлена на рис. 2.

Model is: Регрессия пробит	No. of 0's: 32,00000 (58,18182%)
	No. of 1's: 23,00000 (41,81818%)
Подчиненная Переменная Y	Несвязанные переменные: 13
Loss function is: Максимальная вероя	Final value: 14,212044410
-2*log(Likelihood): for this model = 28,42409	intercept only: 74,76682
Chi-square = 46,34273 , df = 13 , p = ,0000126	

Рис. 2. Статистическая информация пробит-модели

По характеристикам модели можно судить о высокой значимости всех параметров модели. Однако качество прогноза пробит-модели (табл. 4) ниже результатов построенной логит-модели. Процент распознавания кредитоспособных заемщиков оказался меньше на 3 %, составив 90,6 % по сравнению с 93,8 % логит-модели.

Таблица 4

Качество классификации пробит-модели

Группа заемщиков	Предсказанное 1	Предсказанное 0	Процент правильных
1	29	3	90,62500
0	4	19	82,60870

Вероятность ошибки 2-го рода совпадает с предыдущей моделью, что с точки зрения риска говорит о приемлемости построенной пробит-модели, но отличие в 3 % приведет к упущенной прибыли банка.

2. Дискриминантный анализ для оценки кредитных рисков банка

Для представленной выборки из 55 заемщиков дискриминантный анализ проведен в ППП SPSS. Модель содержит 13 факторов, влияющих на бинарную переменную Y , образующую две группы.

Дискриминантный анализ позволяет определить, насколько значимо различаются между собой переменные в обеих группах, т.е. какие из переменных вносят свой вклад в дискриминацию между совокупностями. Для этого наряду с тестовой величиной, в качестве которой служит Лямбда Уилкса, применяется также и простой дисперсионный анализ (табл. 5).

Таблица 5

Статистическая информация дискриминантной функции

	Лямбда Уилкса, λ	Значение статистики, F	Число степеней свободы, df_1	Число степеней свободы, df_2	Значимость коэффициента, Sig
X1	0,997	0,165	1	53	0,687
X2	1,000	0,004	1	53	0,947
X3	0,973	1,478	1	53	0,230
X4	0,943	3,228	1	53	0,078
X5	0,712	21,489	1	53	0,000
X6	0,887	6,728	1	53	0,012
X7	0,952	2,654	1	53	0,109
X8	0,931	3,929	1	53	0,053
X9	0,972	1,552	1	53	0,218
X10	0,902	5,789	1	53	0,020
X11	0,864	8,343	1	53	0,006
X12	0,971	1,611	1	53	0,210
X13	0,858	8,804	1	53	0,005

Очевидно, что некоторые переменные в модели не отвечают необходимому уровню значимости, и в дальнейшем, применяя пошаговый дискриминантный анализ, предикторы, вносящие наименьший вклад, должны быть исключены.

Значения дискриминантной функции должны как можно отчетливее разделять обе группы. Мерой удачности этого разделения служит корреляци-

онный коэффициент между рассчитанными значениями дискриминантной функции и показателем принадлежности к группе.

Прежде чем интерпретировать и применять результаты дискриминантного анализа, следует убедиться в статистической значимости функции. Для этого проверяют нулевую гипотезу о равенстве средних во всех группах. Эта гипотеза проверяется с помощью коэффициента Лямбда Уилкса, собственных значений (eigenvalues) дискриминантной функции (отношение суммы квадратов между группами к сумме квадратов внутри групп) и канонической корреляции, квадрат которой показывает, какая доля вариации зависимой переменной объясняется моделью.

Судя по значению коэффициента, равному 0,75, корреляция удовлетворительная, большое собственное значение указывает на высокое качество построенной модели. Уровень значимости $p < 0,001$ говорит о том, что в обеих группах значимо отличаются друг от друга средние значения дискриминантной функции.

Для оценки относительной важности переменных в установлении различий между группами также используются стандартизированные (нормированные) коэффициенты дискриминантной функции. Одной из предпосылок данного анализа является отсутствие связи (слабая корреляция) между переменными x_1, x_2, \dots, x_n , т.е. отсутствие мультиколлинеарности. При наличии мультиколлинеарности между предсказываемыми переменными не существует однозначной меры относительной важности переменных.

В результате проведения дискриминантного анализа получены параметры функции:

$$y = -5,3 - 2,64x_1 + 1,28x_2 - 0,87x_3 - 0,65x_4 + 0,84x_5 + 0,43x_6 + \\ + 0,15x_7 + 1,04x_8 + 0,12x_9 + 0,1x_{10} - 0,88x_{11} + 0,46x_{12} + 0,8x_{13}. \quad (4)$$

На основании полученных коэффициентов канонической функции дискриминации вычисляется интегральный показатель (сумма произведений значений признаков на соответствующие коэффициенты этих признаков). Введение константы $-5,301$ позволило использовать знак интегрального показателя как указатель группы, к которой относится индивидуум. Знаки групп определяются знаком соответствующих центроидов, которые представляют собой средние значения дискриминантной функции в обеих группах.

3. Сравнительный анализ моделей распознавания кредитного риска

Построение различных моделей прогнозирования кредитоспособности заемщиков с помощью дискриминантной функции и логит-, пробит-моделей показало, что при данной выборке из 55 наблюдений целесообразнее включать в модель все независимые переменные (факторы), поскольку исключение некоторых предикторов ведет к ухудшению качества моделей.

Модель логистической регрессии показала лучшие результаты по сравнению с результатами пробит-модели. Качество прогноза логит-модели составляет 89,1 %, при этом величина кредитоспособных заемщиков, квалифицированных правильно, достигает 93,8 % (30 заемщиков из 32), а некредитоспособных – 82,6 % (19 заемщиков из 23). Эффективность построенной моде-

ли может быть оценена с позиции вероятности ошибок 1-го и 2-го рода. Вероятность отнесения моделью кредитоспособного заемщика в группу некредитоспособных клиентов (ошибка 1-го рода) составляет 0,33, а вероятность отнесения некредитоспособного клиента к классу кредитоспособных равна 0,67 (ошибка 2-го рода). Очевидно, что ошибка 2-го рода является более фатальной для банка и желательнее достижение ее минимума.

Зависимость количества верно классифицированных положительных примеров от количества неверно классифицированных отрицательных примеров для бинарной модели можно представить с помощью ROC-кривой.

В данном случае доля истинно положительных примеров принимает значение 0,88, представляющее собой чувствительность модели, а истинно отрицательных – 0,9, характеризующее ее специфичность. Модель с высокой чувствительностью часто дает истинный результат при наличии положительного исхода (обнаруживает положительные примеры). Наоборот, модель с высокой специфичностью чаще дает истинный результат при наличии отрицательного исхода (обнаруживает отрицательные примеры).

Для идеального классификатора график ROC-кривой проходит через верхний левый угол, где доля истинно положительных случаев составляет 100 %, или 1,0 (идеальная чувствительность), а доля ложно положительных примеров равна нулю. Поэтому чем ближе кривая к верхнему левому углу, тем выше предсказательная способность модели. Наоборот, чем меньше изгиб кривой и чем ближе она расположена к диагональной прямой, тем менее эффективна модель. Диагональная линия соответствует «бесполезному» классификатору, т.е. полной неразличимости двух классов. Модель логистической регрессии обладает в данном случае достаточно высокой чувствительностью и эффективностью (рис. 3).

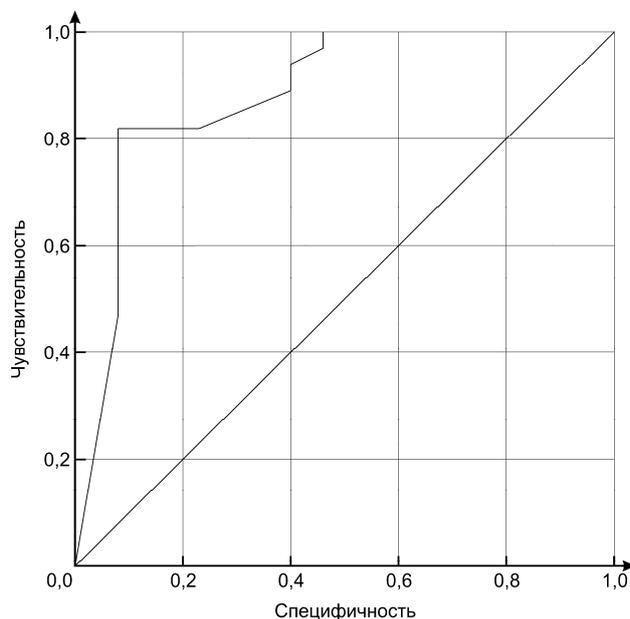


Рис. 3. ROC-кривая логит-модели
(здесь и далее значение 1.0 – «идеальная» модель, или 100 %)

Модель оценки кредитных рисков для банка, построенная с помощью дискриминантного анализа, дает самые наилучшие результаты из всего набора представленных моделей. Доля кредитоспособных заемщиков, квалифицированных правильно, и для дискриминантной функции, и для логит-модели одинакова – 93,8 %, а доля некредитоспособных клиентов, выявленных правильно, для дискриминантной модели выше на 4,4 % и составляет 87 %. Так как для банка большое значение имеет уменьшение ошибок 2-го рода в модели, то именно модель дискриминантного анализа является более приемлемой, поскольку ошибка 2-го рода в данном случае равна 0,6, что ниже ошибки логит-модели на 0,07. При этом чувствительность модели равна 0,94 %, а специфичность – 91 %. Анализ ROC-кривой показывает высокое качество и эффективность модели дискриминантного анализа (рис. 4).

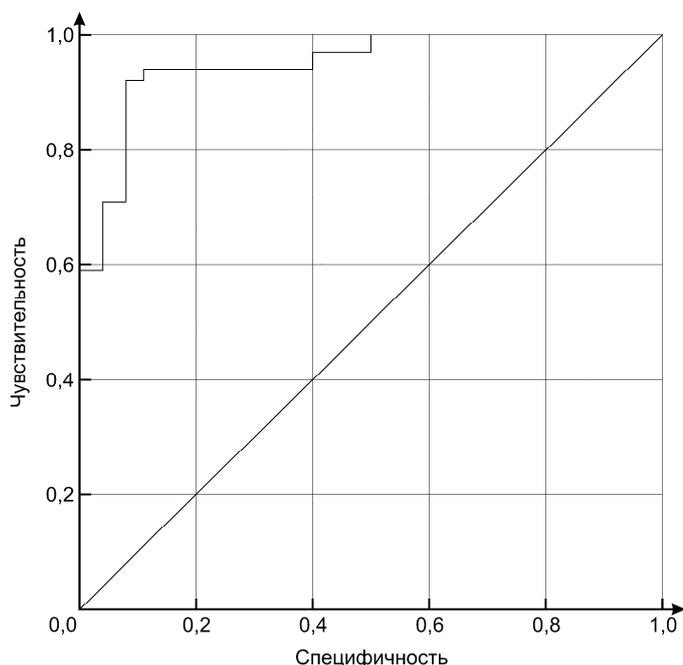


Рис. 4. ROC – кривая дискриминантной функции

Визуальное сравнение кривых ROC позволяет выявить наиболее эффективную модель (рис. 5).

Таким образом, судя по графику, наибольшей чувствительностью и эффективностью обладает модель дискриминантного анализа. Своеобразным методом сравнения ROC-кривых также является оценка площади под кривыми. Теоретически она изменяется от 0 до 1.0, но поскольку модель всегда характеризуется кривой, расположенной выше положительной диагонали, то обычно говорят об изменениях от 0.5 («беспольный» классификатор) до 1.0 («идеальная» модель).

Оценка площади кривой модели дискриминантного анализа (94 %) выше аналогичной оценки кривой логит-модели.

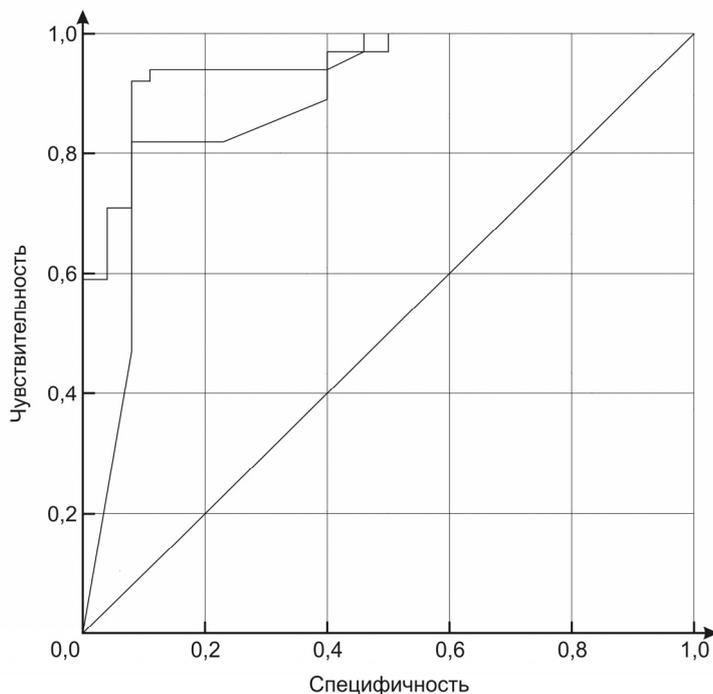


Рис. 5. Совмещение ROC-кривых для логит-модели и модели дискриминантного анализа

Заключение

Полученные модели прогнозирования и оценки кредитоспособности заемщиков для успешного применения их на практике следует проверить на качество с помощью экзаменующей выборки, состоящей из 20 заемщиков, с известными значениями их принадлежности к той или иной группе, из них 11 являются кредитоспособными клиентами, а 9 – некредитоспособными.

Проверка качества построенной логит-модели происходит на основании вычисления вероятности кредитоспособности заемщика. Подставляя значения логита в модель, получаем следующие показатели: из 11 кредитоспособных заемщиков моделью правильно были идентифицированы 6, а из 9 некредитоспособных – 8. Таким образом, логит-модель на экзаменующей выборке показала высокое качество распознавания некредитоспособных заемщиков, составив 88 % точности, однако качество распознавания кредитоспособных клиентов заметно ниже – 54 %. При этом вероятность ошибки 2-го рода составила 0,25, а 1-го рода – 0,75.

Проверка качества дискриминантной функции осуществляется путем подстановки новых параметров экзаменующей выборки в модель дискриминантного анализа с включением всех факторов, и на основании значений линейного прогностического правила тот или иной заемщик относится к одной из двух групп, характеризующей его кредитоспособность. Тестирование модели показало 100 % качество распознавания некредитоспособных заемщиков, при этом соответственно ошибка 2-го рода равна нулю, а качество прогноза кредитоспособных заемщиков составило 64 %.

Совокупный анализ построенных моделей и на обучающей, и на экзаменующей выборке показал высокую степень эффективности модели дискриминантного анализа в целях отнесения потенциальных заемщиков к одной из двух групп. Данная модель характеризуется высокой степенью прогнозирования кредитоспособных клиентов, а также высоким качеством распознавания дефолта заемщика. Применение результатов дискриминантного анализа в алгоритме изучения дает возможность прогнозировать некредитоспособность заемщика и может служить критерием для формирования групп высокого риска по определенным клиентам банка.

Рассмотренная процедура сравнения качества моделей распознавания позволяет повысить качество информационного обеспечения принятия решений в условиях риска

Список литературы

1. **Айвазян, С. А.** Прикладная статистика. Основы эконометрики : учебник для вузов : в 2 т. / С. А. Айвазян, В. С. Мхитарян. – 2-е изд., испр. – М. : ЮНИТИ, 2001. – 1008 с.
2. Банковские риски : учеб. пособие / под ред. д-ра экон. наук, проф. О. И. Лаврушина и д-ра экон. наук, проф. Н. И. Валенцевой. – М. : КНОРУС, 2007. – 232 с.
3. **Fries, C.** Mathematical finance: theory, modeling, implementation / Christian Fries. – New Jersey : Wiley, 2007. – 520 p.

References

1. Ayvazyan S. A., Mkhitaryan B. C. *Prikladnaya statistika. Osnovy ekonometriki: uchebnik dlya vuzov: v 2 t.* [Applied statistics. Basic econometrics: textbook fro universities: in 2 volumes]. Moscow: YuNITI, 2001, 1008 p.
2. *Bankovskie riski: ucheb. posobie* [Bank risks: tutorial]. Ed. O. I. Lavrushin, N. I. Valentseva. Moscow: KNORUS, 2007, 232 p.
3. Fries C. *Mathematical finance: theory, modeling, implementation.* New Jersey: Wiley, 2007, 520 p.

Моисеев Александр Владимирович
кандидат физико-математических наук,
заведующий кафедрой прикладной
математики и исследования операций
в экономике, Пензенский
государственный технологический
университет (Россия, г. Пенза,
проезд Байдукова, 1а)

E-mail: amoisev@pgta.ru

Поправко Евгений Александрович
аспирант, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: popravko@prideautomatics.com

Moiseev Aleksandr Vladimirovich
Candidate of physical and mathematical
sciences, head of sub-department of applied
mathematics and operations research
in economics, Penza State Technological
University (1a Baydukova passage,
Penza, Russia)

Popravko Evgeniy Aleksandrovich
Postgraduate student, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Федотов Николай Гаврилович

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой экономической
кибернетики, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: fedotov@pgu.ru

Fedotov Nikolay Gavrilovich

Doctor of engineering sciences, professor,
head of sub-department of economic
cybernetics, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 004.67,004.62

Моисеев, А. В.

Сравнительный анализ моделей распознавания риска / А. В. Моисеев, Е. А. Поправко, Н. Г. Федотов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 4 (28). – С. 19–31.

ФОРМИРОВАНИЕ ТРИПЛЕТНЫХ ПРИЗНАКОВ ЦВЕТНЫХ ТЕКСТУР¹

Аннотация. *Актуальность и цели.* Во многих отраслях знаний существенная часть информации заключается в сложноструктурированных изображениях, многие из которых содержат текстуры. Наряду с общетеоретическим значением задача распознавания подобных изображений исключительно актуальна и с прикладной точки зрения. От ее успешного решения зависит эффективность обработки информации в области аэрокосмических исследований, анализа Земли из космоса, медицинской и технической диагностики. Целью настоящей работы является разработка теории анализа и распознавания изображений на основе стохастической геометрии и функционального анализа, позволяющей анализировать и распознавать цветные текстуры. *Материалы и методы.* В ходе выполнения работы был применен оригинальный подход к анализу и распознаванию цветных текстур с позиций стохастической геометрии и функционального анализа. Для формирования триплетных признаков цветных текстур применялся разработанный научной школой Н. Г. Федотова метод, позволяющий описывать исследуемое изображение как со стороны его геометрических характеристик, так и со стороны особенностей цвета. *Результаты.* Предложен новый подход к формированию признаков цветных текстур, основанный на аппарате стохастической геометрии и функционального анализа. Расширение теории триплетных признаков позволило осуществить анализ цветных текстур непосредственно без их предварительной бинаризации. Проведена экспериментальная проверка инвариантности построенной группы признаков к линейным деформациям анализируемых цветных текстур. *Выводы.* Построенная группа триплетных признаков позволит более полно описать цветные текстуры. Благодаря трехкомпонентной структуре триплетных признаков возможна генерация большого их количества, что позволяет увеличить гибкость, универсальность и надежность распознавания. Причем, как показывают проведенные эксперименты, при определенном выборе функционалов, входящих в структуру триплетного признака, формируемые характеристики приобретают свойства инвариантности к группе движений и линейным деформациям.

Ключевые слова: цветные текстуры, стохастическая геометрия, триплетные признаки.

N. G. Fedotov, D. A. Goldueva

FORMATION OF TRIPLE FEATURES OF COLOURED TEXTURES

Abstract. *Background.* In many branches of human knowledge an essential part of information lies in images of compound structures, a lot of them contain textures. Along with its general-purpose significance, the task of classifying such images has also proved its applied relevance. Successful solution of the task would account for the efficiency of information processing in such fields as aerospace research, earth observation data analysis, as well as medical and technical diagnostics. The purpose of the present study is to elaborate a theory of image analysis and recognition, based

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 12-07-00501.

on stochastic geometry and functional analysis, to analyze and classify coloured textures. *Materials and methods.* In the course of the work the authors applied an innovative approach to coloured textures' analysis and recognition from the standpoint of stochastic geometry and functional analysis. To form triple features of coloured textures the approach, developed by Professor N. G. Fedotov's scientific school, was taken to help describe an image under investigation from the viewpoint of its geometrical characteristics, as well as from the aspect of its colour specific features. *Results.* A new approach based on stochastic geometry and functional analysis has been offered to form features of coloured textures. Triple features theory extension helped analyze coloured textures directly, using no prior binarization. The features' invariance towards linear deformations of the coloured textures under investigation has been checked experimentally. *Conclusions.* The built group of triple features provides for a more complete description of coloured textures. The trinary structure serves to generate a great number of triple features, which helps enhance recognition flexibility, versatility, and robustness. Moreover, the conducted experiments have shown that a specific choice of functionals within the structure of a triple feature form characteristics invariant to a group of motions and linear deformations.

Key words: colored textures, stochastic geometry, triple feature

Введение

Существующие в настоящий момент методы анализа цветных текстур имеют два существенных недостатка. Во-первых, большинство из них предварительно упрощают анализируемые цветные текстуры, приводя их к полутоновому или даже к бинарному виду, теряя при этом существенную часть информации, которую несет в себе цвет. Во-вторых, существующие в настоящий момент методы анализа цветных текстур оперируют небольшим количеством признаков, каждый из которых имеет конкретную интерпретацию в терминах рассматриваемой проблемы. В этом случае представляется весьма вероятным столкновение со значительными трудностями при формировании информативных признаков более сложных цветных текстур подобными методами. В настоящей статье предлагается новый подход к формированию признаков цветных текстур, основанный на аппарате стохастической геометрии и функционального анализа [1–3]. Его преимущество, по сравнению с существующими на данный момент методами анализа цветных текстур, заключается в следующем. Во-первых, предлагаемый метод позволяет в режиме автоматической генерации формировать десятки тысяч признаков исследуемых изображений (триплетных признаков) без участия эксперта-аналитика. Опора на большое количество признаков является решающей предпосылкой высокой надежности распознавания. Во-вторых, предлагаемый метод не предполагает предварительного упрощения анализируемых цветных текстур. Формируемая группа триплетных признаков характеризует как геометрические параметры, так и особенности цвета анализируемых цветных текстур, что позволяет более полно описать объекты исследования.

В основе разработанного подхода лежит математический аппарат стохастической геометрии и функционального анализа. Ключевым элементом метода является новое геометрическое трейс-преобразование, связанное со сканированием анализируемого объекта по сложным траекториям, введенное в [1] и исследованное в [4–7] и последующих работах. Исследование движения с помощью трейс-преобразования рассмотрено в [4, 6]. В работе [8] было

введено в рассмотрение двойственное трейс-преобразование, которое позволяет совместно с трейс-преобразованием и триплетными признаками произвести нелинейную фильтрацию изображений с целью их предварительной обработки, предшествующей формированию признаков, а именно: полигональную аппроксимацию, выделение выпуклой оболочки, уменьшение зашумленности и т.д. [8, 9]. Применение трейс-преобразования и теории триплетных признаков для распознавания дефектов сварных соединений рассмотрено в [10]. Применение указанного аппарата для решения задач распознавания человеческих лиц и биометрического поиска рассмотрено в [11–13]. Анализ и распознавание объектов нанотехнологий из области биологии рассмотрены в [2]. В этой же книге дается анализ точности формирования триплетных признаков. В работе [14] анализируется анализ изображений ультразвуковых исследований из области медицины. Таким образом, предлагаемый подход имеет обширное применение

1. Триплетные признаки

Признаки изображения в рассматриваемом подходе имеют структуру в виде композиции трех функционалов [1]:

$$\Pi(F) = \Theta \circ P \circ T(F \cap l(\theta, \rho)),$$

где θ, ρ – полярные координаты сканирующей прямой $l(\theta, \rho)$, с которыми связаны функционалы Θ и P соответственно; функционал T связан с параметром t , задающим точку на сканирующей прямой $l(\theta, \rho)$; $F(x, y)$ – функция изображения на плоскости (x, y) . Подробное описание триплетного признака можно найти в работах [1, 2].

1.1. Трейс-функционал

Первым этапом формирования триплетного признака является геометрическое трейс-преобразование, связанное со сканированием изображения по сложным траекториям. Рассмотрим данное преобразование более подробно.

Прямая l на плоскости может определяться перпендикуляром ρ ($\rho \geq 0$), проведенным из начала координат к этой линии, и углом θ ($0 \leq \theta \leq 2\pi$) между перпендикуляром и положительным направлением оси Ox :

$$l(\theta, \rho) = \{(x, y) | x \cos \theta + y \sin \theta = \rho\},$$

где x, y – декартовы координаты на плоскости.

Наибольшее применение в прикладных исследованиях нашел вариант сканирования изображения совокупностью дискретных решеток. Изображение $F(x, y)$ на входной сетчатке распознающей системы сканируется решеткой параллельных прямых, отстоящих друг от друга на некоторое расстояние $\Delta\rho$. Далее сканирование производится для нового значения угла, получившего дискретное приращение $\Delta\theta$, решеткой линий с тем же расстоянием $\Delta\rho$ между линиями.

Рассмотрим функцию трех независимых переменных:

$$l(\theta, \rho, t) = (\rho \cos \theta - t \sin \theta, \rho \sin \theta + t \cos \theta).$$

Это естественное параметрическое представление сканирующей прямой. Параметр t связан с естественной одномерной системой координат на прямой.

Каждой точке t сканирующей прямой $l(\theta, \rho, t)$ ставится в соответствие число из множества $\{0, 1\}$ согласно следующему правилу (для бинарных изображений) [2]:

$$f(\theta, \rho, t) = \begin{cases} 1; & t \in F \cap l, \\ 0; & t \notin F \cap l, \end{cases}$$

где переходы с точек $t \in F \cap l$ к точкам $t \notin F \cap l$, т.е. граничные точки однородных по яркости отрезков очевидны.

Далее посредством первого из тройки, образующей триплетный признак, функционала T получаем некоторую характеристику g взаимного расположения сканирующей прямой $l(\theta, \rho)$ и изображения F , т.е.

$$g(\theta, \rho) = T(F \cap l(\theta, \rho)) = Tf(\theta, \rho, t).$$

В качестве указанной характеристики могут выступать: число пересечений прямой с изображением, свойства окрестности такого пересечения и т.п. Функционал T назван трейс-функционалом. Для большинства задач анализа цветных текстур необходимо, чтобы признаки распознавания не зависели от движения изображения, поэтому единственное требование, которое в этом случае накладывается на T : $T(l, F) = T(l', F')$, где τ – преобразование сдвига и поворота, $\tau(F) = F'$, $\tau(l) = l'$. Это равенство должно быть верным для всех прямых и всех допустимых изображений.

Аналогично, как и в стохастической геометрии, определена случайная величина $g(\theta, \rho) = T(F \cap l(\theta, \rho))$, распределение которой не зависит от сдвигов и поворотов изображения. Поэтому числовые характеристики этой случайной величины опять могут служить признаками изображений.

Совокупность характеристик $g(\theta_j, \rho_i)$ взаимного расположения всех возможных сканирующих прямых $l(\theta_j, \rho_i)$ и изображения $F(x, y)$ образует трейс-матрицу, элемент $T(\theta_j, \rho_i, t)$ которой есть значение функционала T , характеризующее взаимное расположение исследуемого изображения $F(x, y)$ и сканирующей линии l с i -м значением параметра ρ и j -м значением параметра θ . Таким образом, первоначальному изображению $F(x, y)$ можно поставить в соответствие новое изображение $\Phi(\theta, \rho)$, цвет (или яркость) в каждой точке (θ_j, ρ_i) которого определяется числом $T(\theta_j, \rho_i, t)$. Полученный образ есть трейс-трансформанта.

Преобразование, переводящее исходное изображение в трейс-трансформанту, есть трейс-преобразование.

1.2. Диаметральный функционал

Дальнейшее вычисление признака заключается в последовательной свертке столбцов трейс-матрицы с помощью диаметрального функционала P .

Последовательно к каждому столбцу трейс-матрицы применим P функционал, зависящий от параметра ρ . Под его действием столбцы трейс-матрицы преобразуются в действительное число. Таким образом, результат применения диаметрального функционала к трейс-матрице в дискретном варианте есть вектор, i -й элемент которого есть значение P функционала для элементов i -го столбца трейс-матрицы. Результат применения диаметрального функционала к трейс-трансформанте есть 2π -периодическая кривая, зависящая от параметра θ : $h(\theta) = P(g(\theta, \rho))$.

Пример диаметрального функционала:

$$P = \sqrt{\sum_{i=1}^m g^2(\theta_j, \rho_i)},$$

где $g(\theta_j, \rho_i) = T(F \cap I(\theta_j, \rho_i))$.

1.3. Круговой функционал

Последний этап формирования признака связан с Θ функционалом, зависящим от параметра θ . Функционал Θ множеству элементов вектора (или множеству точек кривой $h(\theta)$), полученного на предыдущем этапе, ставит в соответствие некоторое действительное число, которое равно значению признака.

Функционал Θ будем называть круговым, так как область определения кривой $h(\theta)$ 2π ($0 \leq \theta \leq 2\pi$). Таким образом, $\Pi(F) = \Theta(h(\theta))$.

Пример кругового функционала:

$$\Theta = \frac{\max_j h(\theta_j)}{\min_j h(\theta_j)}.$$

2. Формирование триплетных признаков цветных текстур

Цветные текстуры, в отличие от бинарных, имеют две группы значимых характеристик: относящихся к геометрическим особенностям и относящихся к особенностям цвета. Поэтому для классификации цветных текстур целесообразно построить распознающую систему, учитывающую как геометрические особенности, так и особенности цвета анализируемых изображений.

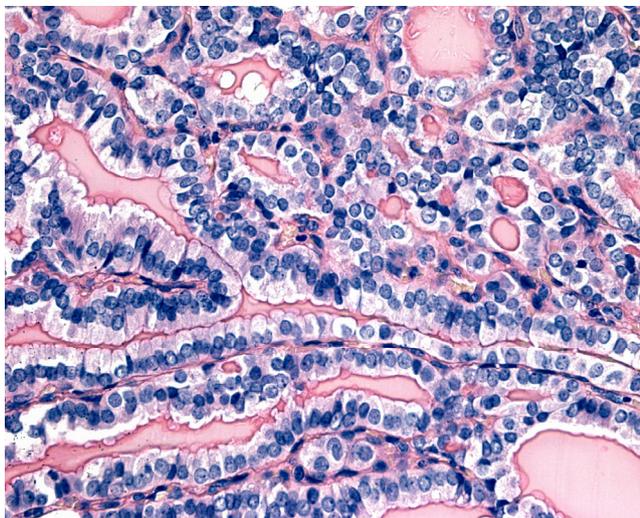


Рис. 1. Пример цветной текстуры гистологических изображений.

Для решения поставленной задачи были выделены две группы триплетных признаков:

1) признаки, характеризующие геометрические особенности изображения;

2) признаки, характеризующие особенности цвета изображения.

Причем вторая группа подразделяется на три соответственно компонента цвета в системе RGB:

– признаки, характеризующие яркостные особенности красного компонента цвета изображения;

– признаки, характеризующие яркостные особенности зеленого компонента цвета изображения;

– признаки, характеризующие яркостные особенности голубого компонента цвета изображения.

Признаки первой и второй групп имеют одинаковую трехфункциональную структуру. Отличие между ними заключается лишь в подходе к заданию характеристик однородных по яркости отрезков сканирующих прямых. Для построения признаков, характеризующих геометрические особенности изображения, однородным по яркости отрезкам сканирующих прямых ставится в соответствие геометрическая величина – длина отрезка.

Так как характеристики цвета изображения существенно зависят от степени освещенности объекта в момент фотосъемки, то для построения триплетных признаков второй группы однородным по яркости отрезкам сканирующих прямых целесообразно поставить в соответствие некоторую относительную характеристику яркости отрезка. В качестве такой характеристики может служить

$$I_i = \frac{\sum_{j=k}^m f(\theta, \rho, t_j)}{(m - k + 1) \cdot \bar{I}_l},$$

где t_k, t_{k+1}, \dots, t_m принадлежат одному однородному по яркости отрезку сканирующей прямой, t_{k-1}, t_{m+1} принадлежат другому отрезку той же прямой или t_{k-1}, t_{m+1} не принадлежат сетчатке; \bar{I}_l – средняя яркость всех затемненных участков сканирующей прямой. В этом случае формируемые триплетные признаки, характеризующие особенности цвета текстуры, не зависят от изменений освещенности исследуемых объектов в момент фотосъемки.

Для формирования признаков, характеризующих геометрические особенности изображения, функция $f(\theta, \rho, t)$ принималась равной

$$f(\theta, \rho, t) = \begin{cases} 1; & t \in F \cap l, \\ 0; & t \notin F \cap l. \end{cases}$$

Для формирования же признаков, характеризующих яркостные особенности текстур, функция $f(\theta, \rho, t)$ имела следующий вид [15]:

$$f(\theta, \rho, t) = \begin{cases} i; & t \in F \cap l, \\ 0; & t \notin F \cap l, \end{cases}$$

где i – значение яркости в точке t .

Далее посредством трейс-функционала $T(F \cap l(\theta, \rho)) = Tf(\theta, \rho, t)$ составляется трейс-матрица, по которой путем последовательной свертки

диаметральным и круговым функционалом определяется признак $\Pi(F) = \Theta \circ P \circ T(F \cap l(\theta, \rho))$.

Зачастую анализируемые цветные текстуры, относящиеся к одному классу, имеют высокий уровень вариабельности формы и положения повторяющихся включений. Поэтому для их распознавания целесообразно применять признаки, инвариантные к группам движений и масштабным преобразованиям.

3. Триpletные признаки цветных текстур, инвариантные к группе движений и линейным деформациям

Для распознавания цветных текстур представляют особый интерес признаки, инвариантные по отношению к группе движений и линейным деформациям изображений, так как опора на инвариантные признаки придает гибкость, надежность и универсальность системам распознавания.

Решение задачи формирования инвариантных признаков изображений целесообразно начать с исследования свойств функционалов, образующих композицию в структуре искомым признаков. Задача определения свойств инвариантности к заданным преобразованиям изображений трансформируется в задачу исследования условий на функционалы T , P и Θ , при которых образованные ими tripletные признаки будут обладать заранее заданным свойством инвариантности.

Рассмотрим более подробно каждый вид преобразований изображений.

1. Перенос. Для того чтобы признак $\Pi(F)$ был инвариантен к переносу, необходимо и достаточно, чтобы P функционал был инвариантен к переносу.

Но в силу дискретности процесса сканирования мы можем говорить лишь о приближительной инвариантности признака.

Приведем пример признака, инвариантного к переносу.

$$\Pi_1 = T_1 \circ P_2 \circ \Theta_7,$$

где $T_1 = \max_i x_i$, $x_i = \sum_{j=k}^m f(\theta, \rho, t_j)$, $t_k = t_{k+1} = \dots = t_m = 1$, $t_{k-1} = t_{m+1} = 0$ или t_{k-1} ,

t_{m+1} не принадлежат сетчатке; $P_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^m g^2(\theta_j, \rho_i)}$, $g(\theta_j, \rho_i) = T(F \cap l(\theta_j, \rho_i))$,

m – число дискретных значений ρ ; $\Theta_7 = \sum_{j=1}^n \ln |h(\theta_j) + 1| \cdot \Delta\theta$, $\Delta\theta$ – шаг сканирования по θ .

2. Поворот. Для того чтобы признак $\Pi(F)$ был инвариантен к повороту, необходимо и достаточно, чтобы Θ функционал был инвариантен к повороту.

Приведем пример признака, инвариантного к повороту:

$$\Pi_1 = T_2 \circ P_1 \circ \Theta_3,$$

где $T_2 = k$, k – число затемненных отрезков, выделяемых на сканирующей

прямой; $P_1 = \sum_{i=1}^m g(\theta_j, \rho_i) \cdot \Delta\rho$, $\Delta\rho$ – шаг сканирования по ρ ;

$$\Theta_3 = \sqrt{\sum_{j=1}^n (h(\theta_j))^2}, \quad h(\theta_j) = P(g(\theta_j, \rho)).$$

3. Масштабные преобразования. Для того чтобы признак $\Pi(F)$ был инвариантен к масштабным преобразованиям, необходимо и достаточно, чтобы T или P функционал был инвариантен к масштабным преобразованиям и P функционал был инвариантен к переносу.

Вышесказанное является строгим только для непрерывного случая. Но мы имеем дело с дискретным сканированием, в силу которого появляется некоторое дополнительное условие. Поясним его суть.

При гомотетии диапазон ρ трейс-матрицы расширяется ($k > 1$) или сужается ($k < 1$) в k раз, т.е. $\rho' = k\rho$, так как изображение F' пересечет в k раз больше (при $k > 1$) или в k раз меньше (при $k < 1$) прямых, чем изображение F . Таким образом, количество ненулевых значений в i -м столбце трейс-матрицы, построенной для изображения F' , и количество ненулевых значений в i -м столбце трейс-матрицы, построенной для изображения F , будут отличаться в k раз. Поэтому степень нестабильности признака к рассматриваемому преобразованию зависит от выбора P функционала. Если P функционал имеет

накопительный характер, например $P = \sum_{i=1}^m g(\theta_j, \rho_i)$, то содержащий его

признак будет иметь высокую степень нестабильности. Обратная же ситуация наблюдается с признаками, в структуру которых входят P функционалы, такие как

$$P = \max_i g(\theta_j, \rho_i),$$

$$P = \frac{\sum_{i=1}^m g(\theta_j, \rho_i)}{m} \text{ и т.п.}$$

Приведем примеры признаков, инвариантных к масштабным преобразованиям изображений, и экспериментально определим степень нестабильности каждого. Степень нестабильности признака (β) определим как относительную его погрешность, выраженную в процентах.

В табл. 1 приведены результаты эксперимента.

Таблица 1

Функционалы, составляющие признак			Значение признака изображения						$\beta, \%$
T	P	Θ	$k = 1$	$k = 1,3$	$k = 1,5$	$k = 0,5$	$k = 0,6$	$k = 0,75$	
T ₁₂	P ₁₀	Θ_2	1,9	1,7	2,12	2,41	2,49	2,49	12,79
T ₁₁	P ₄	Θ_3	38,66	35,18	35,15	36,89	39,97	40,75	5,37
T ₁₁	P ₄	Θ_4	939,63	856,52	854,93	896,91	971,47	989,89	5,31
T ₁₁	P ₄	Θ_6	0,55	0,53	0,65	0,6	0,68	0,77	10,81

В табл. 1 приведены следующие функционалы:

$$T_{11} = \frac{k \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^k I_i^2}}{\sum_{i=1}^k I_i},$$

если $\sum_{i=1}^k I_i \neq 0$, в противном случае $T_{11} = 0$, I_j характеризует яркость голубого компонента цвета;

$$T_{12} = \frac{\sum_{i=1}^k x_i}{k \cdot \max_i x_i},$$

если $k \neq 0$. В противном случае, $T_{12} = 0$;

$$P_{10} = \frac{\sum_{i=1}^m g(\theta_j, \rho_i)}{m}; P_4 = \max_i g(\theta_j, \rho_i);$$

$$\Theta_2 = \sum_{j=1}^n |h(\theta_{j+1}) - h(\theta_j)|; \Theta_4 = \sum_{j=1}^n h(\theta_j); \Theta_6 = \max_j h(\theta_j) - \min_j h(\theta_j).$$

Проведенные эксперименты показывают, что построенные триплетные признаки обладают достаточно высокой степенью инвариантности к группе движений и к линейным деформациям цветных текстур.

Заключение

Существует обширный класс задач медицинской и технической диагностики, где ключевая информация заключена в зрительных образах. В настоящей статье рассмотрена задача формирования признаков цветных текстур. Для решения данной проблемы предложен новый подход, основанный на аппарате стохастической геометрии и функционального анализа. Его суть заключается в формировании триплетных признаков двух типов: характеризующих геометрические особенности и описывающих особенности цвета объекта исследования. Таким образом, построенная группа признаков позволит более полно описать цветные текстуры. Причем, как показывают проведенные эксперименты, при определенном выборе функционалов, входящих в структуру триплетного признака, формируемые характеристики приобретают свойства инвариантности к группе движений и линейным деформациям.

Список литературы

1. Федотов, Н. Г. Методы стохастической геометрии в распознавании образов / Н. Г. Федотов. – М. : Радио и связь, 1990. – 144 с.

2. **Федотов, Н. Г.** Теория признаков распознавания образов на основе стохастической геометрии и функционального анализа / Н. Г. Федотов. – М. : ФИЗМАТ-ЛИТ, 2009. – 304 с.
3. **Kendall, W. S.** *New Perspectives in Stochastic Geometry* / Wilfrid S. Kendall, Ilya Molchanov. – Oxford : UK: Oxford University Press, January, 2010.
4. **Kadyrov, A. A.** Image scanning leads to alternative understanding of image. Third int. conf. on automation, robotics and computer vision (ICARCV'94) / A. A. Kadyrov, M. V. Saveleva, N. G. Fedotov. – Singapore, 1994.
5. **Fedotov, N. G.** Image scanning in machine vision leads to new understanding of image / N. G. Fedotov, A. A. Kadyrov // In Proc. of 5th International Workshop on Digital In Processing and Computer Graphics, Proc. International Society for Optical Engineering (SPIE). – 1995. – Vol. 2363. – P. 256–261.
6. **Fedotov, N. G.** New Theory of Pattern Recognition Feature on the Basis of Stochastic Geometriy / N. G. Fedotov, L. A. Shulga // WSCG'2000 Conference Proceedings. – University of West Bohemia, 2000. – Vol. 1 (2). – P. 373–380.
7. **Kadyrov, A. A.** Triple Features Pattern Recognition and Image Analysis / A. A. Kadyrov and N. G. Fedotov // *Advances in Mathematical Theory and Applications*. – 1995. – Vol. 5, № 4. – P. 546–556.
8. **Федотов, Н. Г.** Формирование признаков распознавания сложноструктурированных изображений на основе стохастической геометрии / Н. Г. Федотов, А. С. Кольчугин, О. А. Смолькин, А. В. Моисеев, С. В. Романов // *Измерительная техника*. – 2008. – № 2. – С. 56–61.
9. **Vidal, M.** Pre-processing of hyperspectral images. Essential steps before image analysis / M. Vidal, J. M. Amigo // *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. – 2012. – Vol. 117, № 1. – P. 138–148.
10. **Федотов, Н. Г.** Техническая дефектоскопия на основе новой теории распознавания образов / Н. Г. Федотов, Т. В. Никифорова // *Измерительная техника*. – 2002. – № 12. – С. 27–31.
11. **Fedotov, N. G.** Visual mining for biomatrical system based on stochastic geometry / N. G. Fedotov, L. A. Shulga, A. V. Roy // *Proc. Int. Conf. Pattern Recognition and Image Analysis. PRIA-7-2004*. – 2004. – Vol. 2. – P. 473–475.
12. **Shin, B.-S.** Effective feature extraction by trace transform for insect footprint recognition / B.-S. Shin, E.-Y. Cha, K.-B. Kim, K.-W. Cho, R. Klette, W. W. Young // 3rd International Conference on Bio-Inspired Computing: Theories and Applications, BICTA 2008 sponsors: IEEE South Australia Section. – Adelaide, NT, 2008. – P. 97–102.
13. **Fooprateepsiri, R.** Highly robust approach face recognition using hamming - trace combination / R. Fooprateepsiri, W. Kurutach // *Proc. of the IADIS Int. Conf. Intelligent Systems and Agents 2010, Proc. of the IADIS European Conference on Data Mining 2010, Part of the MCCSIS–2010*, 2010. – P. 83–90.
14. **Fedotov, N. G.** Triple features of ultrasonic image recognition / N. G. Fedotov, L. A. Shulga, A. S. Kol'chugin, O. A. Smol'kin, S. V. Romanov // *Proc. Of the 8th Int. Conf. on Pattern Recognition and Image Analysis (PRIA-8-2007)*. – Yoshkar-Ola, Russia, 2007. – Vol. 1. – P. 299–300.

References

1. Fedotov N. G. *Metody stokhasticheskoy geometrii v raspoznavanii obrazov* [Methods of stochastic geometry in image recognition]. Moscow: Radio i svyaz', 1990, 144 p.
2. Fedotov N. G. *Teoriya priznakov raspoznavaniya obrazov na osnove stokhasticheskoy geometrii i funktsional'nogo analiza* [Theory of image recognition features on the basis of stochastic geometry and functional analysis]. Moscow: FIZMAT-LIT, 2009, 304 p.
3. Kendall W. S., Molchanov I. *New Perspectives in Stochastic Geometry*. Oxford: UK: Oxford University Press, January, 2010.

4. Kadyrov A. A., Saveleva M. V., Fedotov N. G. *Image scanning leads to alternative understanding of image. Third int. conf. on automation, robotics and computer vision (ICARCV'94)*. Singapore, 1994.
5. Fedotov N. G., Kadyrov A. A. *In Proc. of 5th International Workshop on Digital In Processing and Computer Graphics, Proc. International Society for Optical Engineering (SPIE)*. 1995, vol. 2363, pp. 256–261.
6. Fedotov N. G., Shulga L. A. *WSCG'2000 Conference Proceedings. – University of West Bohemia*. 2000, vol. 1 (2), pp. 373–380.
7. Kadyrov A. A. and Fedotov N. G. *Advances in Mathematical Theory and Applications*. 1995, vol. 5, no. 4, pp. 546–556.
8. Fedotov N. G., Kol'chugin A. S., Smol'kin O. A., Moiseev A. V., Romanov S. V. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measuring technology]. 2008, no. 2, pp. 56–61.
9. Vidal M., Amigo J. M. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2012, vol. 117, no. 1, pp. 138–148.
10. Fedotov N. G., Nikiforova T. V. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measuring technology]. 2002, no. 12, pp. 27–31.
11. Fedotov N. G., Shulga L. A., Roy A. V. *Proc. Int. Conf. Pattern Recognition and Image Analysis. PRIA-7-2004*. 2004, vol. 2, pp. 473–475.
12. Shin B.-S., Cha E.-Y., Kim K.-B., Cho K.-W., Klette R., Young W. W. *3rd International Conference on Bio-Inspired Computing: Theories and Applications, BIC-TA 2008 sponsors: IEEE South Australia Section*. Adelaide, NT, 2008, pp. 97–102.
13. Fooprateepsiri R., Kurutach W. *Proc. of the IADIS Int. Conf. Intelligent Systems and Agents 2010, Proc. of the IADIS European Conference on Data Mining 2010, Part of the MCCSIS-2010*. 2010, pp. 83–90.
14. Fedotov N. G., Shulga L. A., Kol'chugin A. S., Smol'kin O. A., Romanov S. V. *Proc. Of the 8th Int. Conf. on Pattern Recognition and Image Analysis (PRIA-8-2007)*. Yoshkar-Ola, Russia, 2007, vol. 1, pp. 299–300.

Федотов Николай Гаврилович

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой экономической
кибернетики, Пензенский
государственный университет (Россия,
г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: fedotov@pgu.ru

Fedotov Nikolay Gavrilovich

Doctor of engineering sciences, professor,
head of sub-department of economic
cybernetics, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Голдуева Дарья Алексеевна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра экономической кибернетики,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: vrem0@yandex.ru

Goldueva Dar'ya Alekseevna

Candidate of engineering sciences, associate
professor, sub-department of economic
cybernetics, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 681.39; 007.001.362

Федотов, Н. Г.

Формирование триплетных признаков цветных текстур / Н. Г. Федотов, Д. А. Голдуева // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 4 (28). – С. 32–42.

ОПТИМАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ТАБУЛИРОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Аннотация. *Актуальность и цели.* Физические поля различной природы, как правило, имеют сложную структуру, не поддающуюся аналитическому представлению. Решение многих задач техники и физики требует представления с высокой степенью точности информации о физических полях как стационарных, так и переменных. Под представлением физического поля в какой-нибудь области подразумевается равномерная аппроксимация поля с заданной точностью в рассматриваемой области. Стандартные методы, основанные на аппроксимации полей по равноотстоящим узлам, приводят к значительным погрешностям. Поэтому актуальными являются задачи построения равномерной (в той или иной метрике) аппроксимации полей в заданной области. Второй актуальной задачей является построение оптимальных методов табулирования и передачи информации, позволяющих с заданной точностью восстанавливать поле. Решению этих двух задач посвящена данная статья. *Материалы и методы.* Для решения указанных задач предлагается метод, общий для физических полей любой природы, который заключается в следующем: 1) строятся алгоритмы равномерной аппроксимации полей в рассматриваемой области; 2) разрабатываются оптимальные методы табулирования информации о полях; 3) строится аппарат расшифровки таблиц, позволяющий с заранее заданной точностью восстановить физическое поле в заданной области. Для построения наилучшего равномерного приближения физического поля определяется функциональный класс, к которому принадлежит данное поле, вычисляются поперечники Колмогорова соответствующего класса функций и строятся сплайны, являющиеся оптимальным методом приближения. Затем с использованием информации о классе функций проводится табулирование физического поля. При табулировании физических полей естественно опираться на концепцию колмогоровской энтропии. Последним этапом является разработка аппарата восстановления с заданной точностью физического поля по результатам табулирования. *Результаты.* Предложены оптимальные по точности и памяти методы восстановления потенциальных полей различной природы: ньютоновского и кулоновского потенциалов, электростатических полей. *Выводы.* Результаты работы могут использоваться при разработке оптимальных методов получения и передачи информации о физических полях любой природы.

Ключевые слова: физическое поле, равномерная аппроксимация, оптимальные методы табулирования информации, поперечник, сплайн.

I. V. Boykov, A. I. Boykova, N. P. Krivulin, G. I. Grinchenkov

OPTIMAL METHODS OF PHYSICAL FIELD TABULATION

Abstract. *Background.* Physical fields of various nature, as a rule, have a complex structure that is impossible to be represented analytically. Solution of many problems of physics and engineering requires high precision representation of information on both constant and variable physical fields. Under the notion of a physical field in a certain range we understand uniform approximation of a field with

given accuracy in a range under investigation. Standard methods, based on field approximation by equidistant nodes, lead to significant errors. Therefore the problems of formation of uniform (in one or another metrics) approximation of fields in the given range are topical ones. The second topical problem is the development of optimal methods of information tabulation and transfer enabling to restore a field with the given accuracy. The article is devoted to solution the said problems. *Materials and methods.* To solve the said problems the authors suggest a method common for physical fields of any nature, which is based as follows: 1) building of algorithms of uniform approximation of fields in the range under investigation; 2) development of optimal methods of field information tabulation; 3) building of an apparatus of table decoding, enabling to restore a physical field in the given range with predetermined accuracy. In order to form the best uniform approximation of a physical field it is necessary to determine a functional class, which the said field belong to, to calculate Kolmogorov widths of the corresponding function class and to build splines being an optimal method of approximation. After that, a physical field is tabulated using the information on the function class. Tabulation of physical fields is naturally based on the concept of Kolmogorov entropy. The last step is the development of an apparatus of restoration of a physical field with the given accuracy on the basis of tabulation results. *Results.* The authors suggest the methods, optimal in accuracy and memory, of restoration of potential fields of various nature: of Newtonian and Coulomb potentials, of electrostatic fields. *Conclusions.* The results of the study may be applied in development of optimal methods of acquisition and transfer of information on physical fields of various nature.

Key words: physical field, uniform approximation, optimal methods of information tabulation, width, spline.

Введение

Многие физические поля (поля силы тяжести, электрические и магнитные поля, поля напряжений в материалах в окрестности мест сварок, трещин и т.д.) имеют неоднородную структуру и моделируются различным математическим аппаратом. Известные методы восстановления физических полей не гарантируют равномерного представления поля во всей рассматриваемой области, оптимальную аппроксимацию поля и эффективный метод табулирования и передачи информации об исследуемом поле.

Для равномерной с точностью ε аппроксимации поля $F(x)$ в области $G, x \in G$, необходимо:

- 1) исследовать гладкость функции $F(x)$;
- 2) разработать оптимальный по точности метод аппроксимации поля $F(x)$;
- 3) разработать оптимальный по памяти алгоритм табулирования поля;
- 4) разработать метод дешифровки таблиц, позволяющий с точностью ε восстанавливать поле в области G .

1. Классы функций

В этом разделе приведены классы функций, используемые в работе.

Определение 1.1. Класс $W^r(M; a, b)$ состоит из функций, заданных на отрезке $[a, b]$, непрерывных и имеющих непрерывные производные до

$(r-1)$ -го порядка включительно и кусочно-непрерывную производную r -го порядка, удовлетворяющую на этом отрезке неравенству $|f^{(r)}(x)| \leq M$.

Определение 1.2. Класс $C_l^r(M; D)$, $D = [a_1, b_1; \dots; a_l, b_l]$, состоит из функций, заданных в области D , непрерывных и имеющих непрерывные частные производные до $(r-1)$ -го порядка включительно и кусочно-непрерывные частные производные r -го порядка, удовлетворяющие в этой области неравенству $\left| \frac{\partial^r f(x)}{\partial x_1^{r_1} \dots \partial x_l^{r_l}} \right| \leq M$, $r = r_1 + \dots + r_l, l = 2, 3, \dots$

Определение 1.3 [1, 2]. Пусть $\Omega = [-1, 1]^l$, $l = 1, 2, \dots$. Функция $\varphi(x_1, \dots, x_l)$ принадлежит классу $Q_{r, \gamma}(\Omega, M)$, если выполнены условия

$$\max_{x \in \Omega} \left| \partial^{|\nu|} \varphi(x) / \partial x_1^{\nu_1} \dots \partial x_l^{\nu_l} \right| \leq M \text{ при } 0 \leq |\nu| \leq r;$$

$$|\partial^{|\nu|} \varphi(x) / \partial x_1^{\nu_1} \dots \partial x_l^{\nu_l}| \leq M / (d(x, \Gamma))^{|\nu| - r - \zeta}, \quad x \in \Omega \setminus \Gamma, \text{ при } r < |\nu| \leq s,$$

где $s = r + [\gamma] + 1$, $\gamma = [\gamma] + \mu$, $0 < \mu < 1$, $\zeta = 1 - \mu$ при γ нецелом; $s = r + \gamma$, $\zeta = 0$ при γ целом, $d(x, \Gamma)$ – расстояние от точки $x (x = (x_1, \dots, x_l))$ до границы Γ области Ω , вычисляемое по формуле

$$d(x, \Gamma) = \min_{1 \leq i \leq l} \min(|1 + x_i|, |1 - x_i|).$$

Определение 1.4 [1, 2]. Пусть $\Omega = [-1, 1]^l$, $l = 1, 2, \dots$, $r = 1, 2, \dots$, $0 < \gamma \leq 1$. Функция $\varphi(x_1, \dots, x_l)$ принадлежит классу $B_{r, \gamma}(\Omega, M)$, если выполнены условия

$$\max_{x \in \Omega} |\partial^{|\nu|} \varphi(x_1, \dots, x_l) / \partial x_1^{\nu_1} \dots \partial x_l^{\nu_l}| \leq M^{|\nu|} |v|^{|\nu|} \text{ при } 0 \leq |\nu| \leq r;$$

$$|\partial^{|\nu|} \varphi(x_1, \dots, x_l) / \partial x_1^{\nu_1} \dots \partial x_l^{\nu_l}| \leq M^{|\nu|} |v|^{|\nu|} / (d(x, \Gamma))^{|\nu| - r - 1 + \gamma} \text{ при } r < |\nu| \leq \infty.$$

2. Определения поперечников и энтропии

Ниже приводятся определения поперечников и ε -энтропии, используемые в работе. Пусть B – банахово пространство, $X \subset B$ – компакт.

Определение 2.1. Пусть L^n – множество n -мерных линейных подпространств пространства B . Выражение

$$d_n(X, B) = \inf_{L^n} \sup_{x \in X} \inf_{u \in L^n} \|x - u\|,$$

где последний \inf берется по всем подпространствам L^n размерности n , определяет n -поперечник Колмогорова.

В 1948 г. вышла из печати знаменитая работа К. Шеннона «Математическая теория связи», в которой понятие энтропии было

перенесено из статистической физики на теорию передачи информации [3]. В частности, К. Шеннон дал следующее определение энтропии дискретных множеств.

Определение 2.2 [3]. Пусть X – множество, состоящее из n элементов x_1, x_2, \dots, x_n . Число $H(X) = \log_2 n$ называется энтропией множества X .

Энтропия $H(X)$ множества X определяет число двоичных разрядов, которыми необходимо располагать для того, чтобы можно было бы однозначно выделить из множества X каждый из его элементов. Невозможно представить элементы бесконечного множества двоичными числами $0, \alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_m$ с фиксированным числом разрядов m . Поэтому приходится прибегнуть к приближенному представлению элементов бесконечного множества с точностью $\epsilon (\epsilon > 0)$.

Конечное множество $S \subset B$ называется ϵ -сетью для X , если для любого $x \in X$ найдется такой элемент $s \in S$, что $\|x - s\| \leq \epsilon$. Минимальную мощность ϵ -сети обозначим $V_\epsilon(X, B)$.

Конечная система ω замкнутых в компакте X множеств называется 2ϵ -покрытием X , если объединение элементов этой системы совпадает с X , а диаметр каждого из них не превосходит 2ϵ . Минимальную мощность 2ϵ -покрытия обозначим $V_\epsilon(X)$.

Конечное множество $U \subset X$ называется ϵ -различимым, если для любых двух элементов $x_1, x_2 \in U$ имеет место неравенство $\|x_1 - x_2\| > \epsilon$.

Определение 2.3. Пусть F – компактное метрическое пространство, а $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_l)$ – его произвольное 2ϵ -покрытие множествами $\{\alpha_k\}$ из F . Обозначим через $N_\epsilon(F)$ число элементов наиболее экономного, т.е. состоящего из наименьшего числа множеств $\{\alpha_k\}$, 2ϵ -покрытия $S_\epsilon(F)$. Число $H_\epsilon(F) = \log_2 N_\epsilon(F)$ называется абсолютной ϵ -энтропией пространства F .

Связь между длиной таблицы элементов компакта X и его ϵ -энтропией описывается следующим утверждением [4].

Теорема 2.1. Для того чтобы способ табулирования имел точность ϵ , объем таблиц должен удовлетворять неравенству $N_\epsilon \geq H_\epsilon(X)$.

3. Табулирование информации о потенциальных полях

В данном разделе исследуются методы табулирования информации о потенциальных полях.

3.1. Гладкость потенциальных полей

Задачу определения гладкости физических полей продемонстрируем на примере гравитационных полей. Известно представление потенциальных полей в виде интеграла типа Коши. В случае, если плотность $\rho(\eta)$ непрерывна, поле может быть представлено в виде интеграла [5]

$$V(\zeta_1) = \frac{1}{2\pi i} \int_L \frac{2\pi\gamma(\sigma(\zeta_1) - \sigma(\zeta))}{\zeta - \zeta_1} d\zeta, \text{ где } \sigma(\zeta) = -\frac{1}{\pi} \iint_G \rho(\eta) \frac{ds}{\eta - \zeta}, \quad L = \partial G.$$

Справедливо следующее утверждение.

Теорема 3.1 [6, 7]. Пусть L – гладкая кривая. Пусть функция $\rho(\eta) \in W^r(M)$. Тогда справедлива оценка

$$\left| \frac{\partial^s V(\zeta)}{\partial \zeta^s} \right| \leq c 2^s s! \begin{cases} 1, & 0 \leq s \leq r, \\ d(\zeta, L)^{-s+r}, & r < s < \infty, \end{cases}$$

где $d(\zeta, L)$ – расстояние от точки ζ до границы L в области G .

В трехмерном случае потенциал, создаваемый тяготеющими массами плотности $\rho(x, y, z)$, расположенными в области $D \in R_3$, описывается формулой

$$V(x, y, z) = \iiint_D \frac{\rho(\xi, \eta, \zeta) d\xi d\eta d\zeta}{((x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta)^2)^{1/2}},$$

где (x, y, z) – точка вне области D ; (ξ, η, ζ) – точка, пробегающая область D ; $\rho(\xi, \eta, \zeta)$ – плотность тела.

Теорема 3.2 [6, 7]. Пусть Γ – гладкая поверхность, $s = s_1 + s_2 + s_3$, $0 \leq s_i \leq s$, $i = 1, 2, 3$.

Пусть плотность $\rho(x, y, z)$ ограничена и интегрируема. Тогда справедлива оценка

$$\left| \frac{\partial^s V(x, y, z)}{\partial x^{s_1} \partial y^{s_2} \partial z^{s_3}} \right| \leq c 2^s s! \begin{cases} 1, & 0 \leq s \leq 1, \\ (d(P, \Gamma))^{-s+1}, & 1 \leq s < \infty, \end{cases}$$

где $d(P, \Gamma)$ – расстояние от точки $P(x, y, z)$ до границы Γ области D .

Пусть $\Gamma = \partial D$ – гладкая ляпуновская поверхность, принадлежащая классу $L_k(B, \lambda)$ (см. [8]), $\rho(x, y, z) \in C_3^r(D)$, $0 < r \leq k$.

Теорема 3.3 [6, 7]. Пусть $\Gamma \in L_k(B, \lambda)$, $\rho(x, y, z) \in C_3^r(D)$, $0 < r \leq k$; $s = s_1 + s_2 + s_3$, $0 \leq s_i \leq s$, $i = 1, 2, 3$. Справедлива оценка

$$\left| \frac{\partial^s V(x, y, z)}{\partial x^{s_1} \partial y^{s_2} \partial z^{s_3}} \right| \leq c 2^s s! \begin{cases} 1, & 0 \leq s \leq k+2, \\ (d(P, \Gamma))^{-s+k+2}, & k+2 < s < \infty, \end{cases}$$

где $d(P, \Gamma)$ – расстояние от точки $P(x, y, z)$ до границы Γ области D .

Из утверждений теорем 3.1–3.3 следует, что потенциальные поля, создаваемые тяготеющими массами, принадлежат классу функций $B_{r,\gamma}(D, M)$. Отметим, что этому классу функций, наряду с потенциальными полями тяготения, принадлежат многие другие физические поля.

Известно [1, 2], что класс функций $B_{r,\gamma}(M, \Omega)$ вложен в более общий класс $Q_{r,\gamma_1}(\Omega, M_1)$, но с другими константами γ_1 и M_1 . Поэтому

представляет интерес исследование задачи табулирования более общего класса функций $Q_{r,\gamma}(\Omega,1)$.

В связи с этим актуальной является следующая задача.

Задача. Пусть в области Ω имеется поле, принадлежащее классу функций $Q_{r,\gamma}(\Omega,M)$. Пусть задано значение $\varepsilon(\varepsilon > 0)$. Требуется построить метод наилучшего равномерного приближения и наилучшего табулирования класса функции $Q_{r,\gamma}(\Omega,M)$ и построить алгоритм, позволяющий по результатам табулирования восстановить произвольную функцию из класса $Q_{r,\gamma}(\Omega,M)$ с точностью ε .

3.2. Функции одной переменной

Оценим число узлов, необходимое и достаточное для восстановления функций из класса $Q_{r,\gamma}(\Omega,M)$ с точностью ε .

Теорема 3.4 [1, 2]. Пусть $\Omega = [-1,1]$. Тогда справедлива оценка

$$d_n(Q_{r,\gamma}(\Omega,M),C) \approx n^{-s}.$$

Построим непрерывный сплайн $f_N(t)$, приближающий функции из класса $Q_{r,\gamma}(\Omega,M)$ с точностью cn^{-s} и имеющий $2ns - 2n + 1$ параметр. Для этого разделим сегмент $[-1,1]$ на $N = 2n$ частей точками $t_k = -1 + (k/n)^v$ и $\tau_k = 1 - (k/n)^v$, $k = 0, 1, \dots, n$, где $v = s / (s - \gamma)$. Пусть $\Delta_k = [t_k, t_{k+1}]$, $\Delta_k^* = [\tau_{k+1}, \tau_k]$, $k = 0, 1, \dots, n-1$. Сплайн $f_N(t)$ состоит из интерполяционных полиномов $P_s(f, \Delta_k)$, $P_s(f, \Delta_k^*)$, $k = 0, 1, \dots, n-1$, которые строятся следующим образом. В сегменте $[a,b]$ аппроксимируем функцию $f(t)$ интерполяционным полиномом $P_s(f, [a,b])$ степени $(s-1)$, построенным по узлам ζ'_l , $l = 1, 2, \dots, s$, являющимся образами узлов ζ_1, \dots, ζ_s полинома Чебышева первого рода степени s , полученными при отображении сегмента $[\zeta_1, \zeta_s]$ на сегмент $[a,b]$.

В работах [1, 2] показано, что $\|f(t) - f_N(t)\| \leq cN^{-s}$.

Теорема 3.5 [1, 2]. Пусть $\Omega = [-1,1]$, $1 \leq p \leq \infty$. Справедлива оценка

$$H_\varepsilon(Q_{r,\gamma}(\Omega,1)) \approx (1/\varepsilon)^{1/s}.$$

Укажем способ построения таблиц и построим алгоритм оптимального восстановления функций класса $Q_{r,\gamma}(\Omega,1)$ с точностью ε . Ограничимся рассмотрением класса функций $Q_{r,\gamma}(\Omega,M)$ при γ целом числе.

Пусть $\Omega = [-1,1]$. На сегменте $[-1,1]$ введем узлы $t_k = -1 + (k/N)^v$, $k = 0, 1, \dots, N$, $t_k = 1 - ((2N - k)/N)^v$, $k = N + 1, \dots, 2N$, где $v = s / (s - \gamma)$. Пусть $\Delta_k = [t_k, t_{k+1}]$, $h_k = t_{k+1} - t_k$, $k = 0, 1, \dots, 2N - 1$. Пусть в точке $t_N = 0$ заданы значения функции $f(0)$ и ее производных $f^{(k)}(0)$ с точностью ε_k ,

$k = 0, 1, \dots, s$. Положим $\varepsilon_k = N^{-s+k}$, $k = 0, 1, \dots, s$. В любой точке t сегмента Δ_N функция $f(t)$ равна

$$f(t) = f(0) + \frac{f'(0)}{1!}t + \dots + \frac{f^{(s)}(0)}{s!}t^s + \frac{f^{(s)}(\Theta t) - f^{(s)}(0)}{s!}t^s, \quad 0 < \Theta < 1. \quad (1)$$

Будем вычислять функцию $f(t)$ в сегменте Δ_N по формуле

$$\bar{f}(t) = \bar{f}(0) + \frac{\bar{f}'(0)}{1!}t + \dots + \frac{\bar{f}^{(s)}(0)}{s!}t^s, \quad (2)$$

где $\bar{f}(0)$ и $\bar{f}^{(k)}(0)$ – значения $f(0)$ и $f^{(k)}(0)$, вычисленные с точностью ε_0 и ε_k , $k = 1, 2, \dots, s$, соответственно. Погрешность, которая возникает при переходе от формулы (1) к формуле (2), равна [2]

$$|\Delta_N f(t)| \leq C_0 \varepsilon_0. \quad (3)$$

В сегменте Δ_N

$$f^{(k)}(t) = f^{(k)}(0) + \frac{f^{(k+1)}(0)}{1!}t + \dots + \frac{f^{(s)}(0)}{(s-k)!}t^{s-k} + \frac{f^{(s)}(\Theta t) - f^{(s)}(0)}{(s-k)!}t^{s-k}.$$

Будем вычислять функцию $f^{(k)}(t)$ в сегменте Δ_N по формуле

$$\bar{f}^{(k)}(t) = \sum_{l=k}^s \frac{\bar{f}^{(l)}(0)}{(l-k)!}t^{l-k}. \quad (4)$$

Тогда погрешность восстановления функции $f^{(k)}(t)$ в сегменте Δ_N равна

$$\begin{aligned} |\Delta_N f^{(k)}(t)| &= |f^{(k)}(t) - \bar{f}^{(k)}(t)| \leq \\ &\leq \frac{1}{N^{s-k}} \left(\sum_{l=k}^s \frac{v^{l-k}}{(l-k)!} + \frac{2^{1+\nu\gamma} v^{s-k}}{(s-k)!} \right) = C_k^N \varepsilon_k, \end{aligned} \quad (5)$$

где через C_k обозначено выражение в скобках.

Таким образом, в точке t_{N+1} значения $f^{(k)}(t_{N+1})$ вычисляются с точностью $C_N^* \varepsilon_k$, $k = 0, \dots, s$, где $C_N^* = \max_{0 \leq k \leq s} C_k^N$, т.е. происходит потеря точности в C_N^* раз. Это означает, что информация, содержащаяся в $[\log_2 C_N^*] + 1$ последнем двоичном разряде каждого значения $f^{(k)}(t_{N+1})$, является недостоверной. Для того чтобы продолжить вычисления на сегменте Δ_{N+1} , нужно располагать значениями $[\log_2 C_k^N] + 1$ последних двоичных разрядов в числах $f^{(k)}(t_N)$, $k = 0, 1, \dots, s$.

Значения функции $f(t)$ в сегменте Δ_{N+l} можно определить по формуле Тейлора

$$f(t) = f(t_{N+l}) + \frac{f'(t_{N+l})}{1!}(t-t_{N+l}) + \dots + \frac{f^{(s)}(t_{N+l})}{s!}(t-t_{N+l})^s + \frac{f^{(s)}(t_{N+l} + \Theta h_{N+l}) - f^{(s)}(t_{N+l})}{s!}(t-t_{N+l})^s. \quad (6)$$

В сегменте Δ_{N+l} значения $f(t)$ будем вычислять по формуле

$$\bar{f}(t) = \bar{f}(t_{N+l}) + \frac{\bar{f}'(t_{N+l})}{1!}(t-t_{N+l}) + \dots + \frac{\bar{f}^{(s)}(t_{N+l})}{s!}(t-t_{N+l})^s, \quad (7)$$

где

$$|f(t_{N+l}) - \bar{f}(t_{N+l})| \leq \varepsilon_0^l, \quad |f^{(k)}(t_{N+l}) - \bar{f}^{(k)}(t_{N+l})| \leq \varepsilon_k^l.$$

Возникающая погрешность оценивается неравенством

$$|\Delta_{N+l}f(t)| \leq \frac{1}{N^s} \left[\sum_{k=0}^s \frac{v^k}{k!} + \frac{2^{1+\nu\gamma} v^s}{s!} \right] \leq C_0^{N+l} \frac{1}{N^s}.$$

При получении оценок $|\Delta_{N+l}f(t)|$, $l = 0, 1, \dots, N-2$, полагаем $\varepsilon_0^l = \frac{1}{N^s}$,

$\varepsilon_k^l = \frac{1}{N^{s-k}}$, $k = 1, 2, \dots, s$, $l = 0, 1, \dots, 2N-2$. Значение $f^{(k)}(t)$ в сегменте Δ_{N+l} равно

$$f^{(k)}(t) = \sum_{j=k}^s \frac{f^{(j)}(t_{N+l})}{(j-k)!} (t-t_{N+l})^{j-k} + \frac{f^{(s)}(t_{N+l} + \Theta h_l) - f^{(s)}(t_{N+l})}{(s-k)!} (t-t_{N+l})^{s-k}.$$

Вычислять функцию $f^{(k)}(t)$ в сегменте Δ_{N+l} будем по формуле

$$\bar{f}^{(k)}(t) = \sum_{j=k}^s \frac{\bar{f}^{(j)}(t_{N+l})}{(j-k)!} (t-t_{N+l})^{j-k}. \quad (8)$$

Погрешность оценивается неравенством

$$|\Delta_{N+l}\bar{f}^{(k)}(t)| = |f^{(k)}(t) - \bar{f}^{(k)}(t)| \leq C_k^{N+l} \frac{1}{N^{s-k}}.$$

Таким образом, при задании значений $f^{(k)}(t_{N+l})$ с точностью ε_k^l значения $f^{(k)}(t_{N+l+1})$ вычисляются с точностью $C_k^{N+l} \varepsilon_k^l$, т.е. происходит потеря точности в $\log_2 C_k^{N+l}$ раз. Это утверждение справедливо при $l = N, N+1, \dots, 2N-2$. Аналогичные оценки справедливы и для сегментов Δ_k , $k = 1, \dots, N-1$.

На сегменте $[t_{2N-1}, 1]$ значения $f(t)$ вычисляются по формуле

$$\bar{f}(t) = \sum_{k=0}^r \frac{\bar{f}^{(k)}(1)}{k!} (t-1)^k, \quad (9)$$

имеющей погрешность $|\Delta_{2N-1} f(t)| = |f(t) - \bar{f}(t)| \leq C_0^{2N} \frac{1}{N^s}$.

Аналогичным образом вычисляется функция $f(t)$ в сегментах $\Delta_{N-1}, \Delta_{N-2}, \dots, \Delta_0$. Пусть $C_* = \max(\max_{k,l} C_k^l, C_0^0, C_0^{2N})$, где $k = 0, 1, \dots, s$, $l = 1, \dots, 2N-1$.

Таким образом, для восстановления функции $f(t)$ с точностью ε требуется располагать значениями $f^{(k)}(0)$, $k = 0, 1, \dots, s$, $f^{(k)}(\pm 1)$, $k = 0, 1, \dots, r$, вычисленными с точностью ε_k , и последним $[\log_2 C_k^l] + 1$ двоичным разрядом в числах $f^{(k)}(t_l)$, $k = 0, 1, \dots, r, l = 1, 2, \dots, 2N-1$. Общее число двоичных разрядов, необходимых для построения ε -сети, равно $O\left(\left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^{1/s}\right)$.

Для того чтобы вычислить по формулам (2), (4), (7)–(9) значения функции $f(t)$ с точностью $\varepsilon = \frac{1}{N^s}$ в сегментах $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_{2N-2}$, достаточно выполнения соотношений

$$C_0^N \varepsilon_0^N = \varepsilon = \frac{1}{N^s}, \quad C_k^N \varepsilon_k^N = \frac{1}{N^{s-k}} = \varepsilon N^k, \quad k = 1, 2, \dots, s.$$

Следовательно, нужно положить $\varepsilon_0^N = \frac{\varepsilon}{C_0^N}$, $\varepsilon_k^N = \frac{\varepsilon N^k}{C_k^N}$, $k = 1, 2, \dots, s$.

В узлах ± 1 нужно запомнить значения функции $f(t)$ с точностью $\varepsilon = \frac{1}{N^s}$, а ее производных с точностью $\varepsilon_k = \varepsilon N^{sk/(s-\gamma)}$, $k = 1, 2, \dots, r$. Из этих оценок

следует, что $H_\varepsilon(Q_{r,\gamma}([-1, 1], M)) \leq c \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^{\frac{1}{s}}$.

Сравнивая эффективность описанного алгоритма со стандартными алгоритмами, построенными по равноотстоящим узлам, можно показать, что его использование позволяет уменьшить число разрядов памяти в $O(1/\varepsilon)^{s/(r-1)} |\log_2 \varepsilon|$ раз.

3.3. Функции многих переменных

В этом разделе излагаются оптимальные методы восстановления многомерных физических полей, моделируемых классами функций $Q_{r,\gamma}(\Omega, M)$, $\Omega = [-1, 1]^l, l \geq 2$. Известны следующие утверждения.

Теорема 3.6 [2]. Пусть $\Omega = [-1, 1]^l, l \geq 2, v = s / (s - \gamma)$. Справедлива оценка

$$H_\varepsilon(Q_{r,\gamma}(\Omega, M)) \approx A \begin{cases} \varepsilon^{-(l-1)/(s-\gamma)}, & v > l / (l-1), \\ \varepsilon^{-l/s}, & v < l / (l-1), \\ \frac{|\ln \varepsilon|^{l/p}}{\varepsilon^{l/s}}, & v = l / (l-1). \end{cases} \quad (10)$$

Теорема 3.7 [1, 2]. Пусть $\Omega = [-1, 1]^l, l \geq 2, v = s / (s - \gamma)$. Справедливы оценки

$$d_n(Q_{r,\gamma}(\Omega, M), C) \approx \begin{cases} n^{-(s-\gamma)/(l-1)}, & v > l / (l-1), \\ n^{-s/l} (\ln n)^{s/l}, & v = l / (l-1), \\ n^{-s/l}, & v < l / (l-1). \end{cases} \quad (11)$$

Построим сплайн $f(t_1, \dots, t_l)$, реализующий оценку (11).

Обозначим через Δ_k множество точек $x = (x_1, \dots, x_l)$ из Ω , расстояние от которых до границы Γ области Ω удовлетворяет неравенствам

$$(k / N)^v \leq d(x, \Gamma) \leq ((k + 1) / N)^v,$$

где $v = s / (s - \gamma)$.

В каждой области Δ_k разместим кубы $\Delta_{i_1, \dots, i_l}^k$, ребра которых равны $h_k = ((k + 1) / N)^v - (k / N)^v$ и параллельны координатным осям. Воспользуемся этим разбиением. Построение сплайна начнем с куба Δ_{N-1} . В этом кубе функцию $f(t_1, \dots, t_l)$ аппроксимируем интерполяционным полиномом

$$f_N(t_1, \dots, t_l; \Delta_{N-1}) = P_{s, \dots, s}[f, \Delta_{N-1}].$$

Здесь $P_{s, \dots, s}[f, [a_1, b_1; \dots; a_l, b_l]] = P_s^{t_1}[P_s^{t_2} \dots [P_s^{t_l}, [f, [a_l, b_l]]], \dots, [a_1, b_1]]$ через $P^{t_i}[f, [a_i, b_i]]$ обозначен многочлен $P_s[f, [a_i, b_i]]$, построенный при доказательстве теоремы 2.1 и действующий по переменной $t_i, i = 1, 2, \dots, l$.

Перейдем к области Δ_{N-2} . Эта область разбивается на кубы $\Delta_{i_1, \dots, i_l}^{N-2}$, причем разбиение происходит таким образом, чтобы вершины куба Δ_{N-1} входили в число точек разбиения. В каждом из кубов $\Delta_{i_1, \dots, i_l}^{N-2}$ полином $f_N(t_1, \dots, t_l; \Delta_{i_1, \dots, i_l}^{N-2})$ определяется формулой

$$f_N(t_1, \dots, t_l; \Delta_{i_1, \dots, i_l}^{N-2}) = P_{s, \dots, s} \bar{f}(t_1, \dots, t_l),$$

где функция $\bar{f}(t_1, \dots, t_l)$ равна $f(t_1, \dots, t_l)$ во всех узлах интерполирования, кроме расположенных на гранях куба Δ_{N-1} . В этих узлах значения $\bar{f}(t_1, \dots, t_l)$ полагаются равными значениям полинома $P_{s, \dots, s}[f, \Delta_{N-1}]$.

Описанным образом проводится аппроксимация во всех областях Δ_i при $i \geq 0$. Полученный при этом сплайн обозначим через $f_N(t_1, \dots, t_l)$.

Можно показать [1, 2], что сплайн $f_N(t_1, \dots, t_l)$ непрерывен в Ω и что справедлива оценка

$$\|f(t_1, \dots, t_l) - f_N(t_1, \dots, t_l)\|_C \leq c \begin{cases} n^{-(s-\gamma)/(l-1)}, & v > l/(l-1), \\ n^{-s/l} (\ln n)^{s/l}, & v = l/(l-1), \\ n^{-s/l}, & v < l/(l-1), \end{cases}$$

где $v = s/(s-\gamma)$.

Следовательно, сплайн $f_N(t_1, \dots, t_l)$ реализует оценку (11) и тем самым является оптимальным по порядку алгоритмом восстановления функций $f \in Q_{r, \gamma}(\Omega, M)$.

Выше было показано, что локальный сплайн $f_N(t_1, \dots, t_l)$ является оптимальным по порядку алгоритмом аппроксимации функций $f(t_1, \dots, t_l) \in Q_{l, \gamma}(\Omega, 1)$.

Построим теперь оптимальный по порядку алгоритм табулирования информации о сплайне $f_N(t_1, \dots, t_l)$. Для простоты изложения ограничимся двумерным случаем. Распространение полученного метода на l -мерные ($l > 2$) области можно провести по аналогии с рассуждениями, приведенными в [1, 2].

Для того чтобы восстановить функцию $f(t_1, t_2) \in Q_{r, \gamma}(\Omega, 1)$ в области Ω с точностью ε , нужно располагать значениями этой функции в узлах сплайна $f_N(t_1, t_2)$ с точностью

$$\varepsilon^* = \frac{\varepsilon}{\lambda_s},$$

где λ_s – константа Лебега по s узлам интерполяционного полинома $P_s(f, [-1, 1])$. Построение таблицы начнем с области Δ_{N-1} . Обозначим вершины квадрата Δ_{N-1} через $A_{i, N-1}$, $i = 1, 2, 3, 4$. В вершине $A_{1, N-1}$ запомним значение функций $f(x_1, x_2)$ с точностью ε_0 и значение частных производных k -го порядка, $k = 1, 2, \dots, s$, с точностью ε_k . Связь между константами ε^* , ε_0 , ε_k , $k = 1, 2, \dots, s$, будет установлена ниже.

В области Δ_{N-1} функция $f(x_1, x_2)$ равна

$$f(x_1, x_2) = f(A_{1,N-1}) + \frac{1}{1!} df(A_{1,N-1}) + \dots + \frac{1}{s!} d^s f(A_{1,N-1}) + \frac{1}{s!} (d^s f(A_{1,N-1} + \theta(x - A_{1,N-1})) - d^s f(A_{1,N-1})), \quad (12)$$

где $d^k f$ – функционал k -го порядка от функции $f(x), x = (x_1, x_2), 0 < \theta < 1$.

При построении таблицы функцию $f(x_1, x_2)$ в области Δ_{N-1} аппроксимируем отрезком ряда Тейлора

$$\bar{f}(x_1, x_2) = \bar{f}(A_{1,N-1}) + \frac{1}{1!} \overline{df}(A_{1,N-1}) + \dots + \frac{1}{s!} \overline{d^s f}(A_{1,N-1}), \quad (13)$$

где через $\bar{f}(A_{1,N-1})$ обозначено значение $f(A_{1,N-1})$, вычисленное с точностью ε_0 , а через $\overline{d^k f}(A_{1,N-1})$ обозначено значение дифференциала k -го порядка, $k = 1, 2, \dots, s$, в котором значения частных производных k -го порядка в точке $A_{1,N-1}$ вычислены с точностью ε_k .

Оценим погрешность, возникающую при аппроксимации функции $f(x_1, x_2)$ в области Δ_{N-1} отрезком ряда Тейлора $\bar{f}(x_1, x_2)$. Очевидно,

$$\begin{aligned} |f(x_1, x_2) - \bar{f}(x_1, x_2)| &\leq |f(A_{1,N-1}) - \bar{f}(A_{1,N-1})| + \\ &+ \sum_{k=1}^s \frac{1}{k!} |d^k f(A_{1,N-1}) - \overline{d^k f}(A_{1,N-1})| \leq \\ &\leq \varepsilon_0 + \sum_{k=1}^s \frac{c_k}{k!} \varepsilon_k h_{N-1}^k + \frac{2}{s!} M \left(\frac{\partial^s f}{\partial x_{x_1}^{s_1} \partial x_{x_2}^{s_2}}, \Delta_{N-1} \right) h_{N-1}^s. \end{aligned}$$

Здесь c_k – число слагаемых в дифференциале d^k ,

$$M \left(\frac{\partial^s f}{\partial x_{x_1}^{s_1} \partial x_{x_2}^{s_2}}, \Delta_{N-1} \right) = \max_{1 \leq s_1 + s_2 \leq s} \max_{x \in \Delta_{N-1}} \left| \frac{\partial^s f(x)}{\partial x_{x_1}^{s_1} \partial x_{x_2}^{s_2}} \right|.$$

Положим $\varepsilon_k = \varepsilon_0 / h_{N-1}^k = \varepsilon_0 N^k, k = 1, 2, \dots, s$.

В результате имеем

$$|f(x_1, x_2) - \bar{f}(x_1, x_2)| \leq \varepsilon_0 + c_s \sum_{k=1}^s \frac{\varepsilon_0}{k!} + \frac{2}{s!} \left(\frac{N}{N-1} \right)^{\text{vy}} \left(\frac{v}{N} \right)^s \leq$$

$$\leq c_s \varepsilon_0 \left(2 + \sum_{k=1}^s \frac{1}{k!} \right) + \varepsilon_0 \leq 4c_s \varepsilon_0.$$

Из этого неравенства можно сделать следующий вывод: для того чтобы в области Δ_{N-1} функцию $f(x_1, x_2)$ аппроксимировать отрезком ряда Тейлора (9) с точностью ε^* , нужно положить $\varepsilon_0 = \varepsilon^* / 4c_s$.

Аналогичным образом частные производные

$$\frac{\partial^v f(x_1, x_2)}{\partial x_1^{v_1} \partial x_2^{v_2}}, \quad 1 \leq v \leq s, v = v_1 + v_2,$$

$0 \leq v_i \leq s_i$, аппроксимируем отрезком рядов Тейлора.

Для определенности представим

$$\overline{\frac{\partial f(x_1, x_2)}{\partial x_1}} = \frac{\overline{df}(A_{1,N-1})}{\partial x_1} + \sum_{k=1}^s \frac{1}{k!} \overline{d^k} \left(\frac{df(A_{1,N-1})}{\partial x_1} \right). \quad (14)$$

Рассмотрим квадрат $\Delta_{i_1 i_2}^{N-2}$ с вершинами в точках $A_{i,N-2}$, $i = 1, \dots, 4$.

Будем считать, что точки $A_{1,N-2}$ и $A_{2,N-2}$ лежат на стороне общей для квадратов Δ_{N-1} и $\Delta_{i_1 i_2}^{N-2}$. Для того чтобы вычислять значения функции

$f(x_1, x_2)$ в узлах полинома $P_{s,s} \left(f, \Delta_{i_1 i_2}^{N-2} \right)$ с точностью ε^* по формулам аналогичным формулам (13) и (14), нужно располагать значениями функции $f(x_1, x_2)$ и ее частных производных в точке $A_{1,N-2}$ с точностью ε_0 . Применение формулы (13) и формул, аналогичных (14), позволяет вычислить эти значения с точностью $4c_s \varepsilon_0$. Это означает, что необходима дополнительная информация о значениях функций $f(x_1, x_2)$ и ее частных производных. Нетрудно видеть, что по формулам (13) и (14) нельзя достоверно восстановить $[\log_2 4c_s] + 1$ последний двоичный разряд. Таким образом, в точке $A_{1,N-1}$ нужно дополнительно запомнить $[O(\log_2 4c_s)]$ разрядов.

Располагая этой информацией, в квадрате $\Delta_{i_1 i_2}^{N-2}$ функцию $f(x_1, x_2)$ аппроксимируем отрезком ряда Тейлора

$$\overline{f}(x_1, x_2) = \overline{f}(A_{1,N-2}) + \frac{1}{1!} \overline{df}(A_{1,N-2}) + \dots + \frac{1}{s!} \overline{d^s f}(A_{1,N-2}). \quad (15)$$

Частные производные аппроксимируем формулами, аналогичными

$$\overline{\frac{\partial f(x_1, x_2)}{\partial x_1}} = \frac{\overline{df}(A_{1,N-2})}{\partial x_1} + \sum_{k=1}^s \frac{1}{k!} \overline{d^k} \left(\frac{df(A_{1,N-2})}{\partial x_1} \right). \quad (16)$$

Аналогично проводится аппроксимация во всех областях $\Delta_{i_1 i_2}^k$, $k = 1, 2, \dots, N - 2$.

Рассмотрим квадрат $\Delta_{i_1 i_2}^k$ с вершинами в точках $A_{i,k}$, $i = 1, 2, 3, 4$, $k = 1, 2, \dots, N - 2$. Предположим, что точки $A_{1,k}$ и $A_{2,k}$ лежат на стороне, общей с областями $\Delta_{i_1 i_2}^k$ и Δ_{k+1} . Предположим также, что в точке $A_{1,k}$ значения функции $f(x_1, x_2)$ и ее частных производных до s -го порядка известны с точностью $\varepsilon_k, k = 0, 1, \dots, s$.

Функцию $f(x_1, x_2)$ в области $\Delta_{i_1 i_2}^k$ будем аппроксимировать отрезком ряда Тейлора

$$\bar{f}(x_1, x_2) = \bar{f}(A_{1,k}) + \frac{1}{1!} \bar{d}f(A_{1,k}) + \dots + \frac{1}{s!} \bar{d}^s f(A_{1,k}). \quad (17)$$

Оценим погрешность такой аппроксимации. Очевидно,

$$\begin{aligned} |f(x_1, x_2) - \bar{f}(x_1, x_2)| &\leq |f(A_{1,k}) - \bar{f}(A_{1,k})| + \sum_{l=1}^s \frac{1}{l!} \left| d^l f(A_{1,k}) - \bar{d}^l f(A_{1,k}) \right| + \\ &+ \frac{1}{s!} \left| d^s f(A_{1,k} + \theta(x - A_{1,k})) - d^s f(A_{1,k}) \right| \leq \\ &\leq \varepsilon_0 + \sum_{l=1}^s \frac{c_l}{l!} \varepsilon_l h_k^l + \frac{2}{s!} M \left(\frac{\partial^s f}{\partial x_{x_1}^{s_1} \partial x_{x_2}^{s_2}}, \Delta_k \right) h_k^s \leq \\ &\leq \varepsilon_0 + \sum_{l=1}^s \frac{c_l}{l!} \varepsilon_0 N^l \left(\left(\frac{k+\theta}{N} \right)^v - \left(\frac{k}{N} \right)^v \right)^l + \frac{2}{s!} \frac{1}{(k/N)^{\nu \gamma}} h_k^s \leq \\ &\leq \varepsilon_0 \left(1 + \sum_{l=1}^s \frac{c_l}{l!} \right) + \frac{2}{s!} \left(\frac{k}{N} \right)^{\nu \gamma} \left(\left(\frac{k+\theta}{N} \right)^v - \left(\frac{k}{N} \right)^v \right)^s \leq \\ &\leq \varepsilon_0 \left(1 + \sum_{l=1}^s \frac{c_l}{l!} \right) + \frac{2}{s!} \left(\frac{k}{N} \right)^{\nu \gamma} \left(\frac{\nu(k+\theta)^{\nu-1}}{N^\nu} \right)^s \leq 3c_s \varepsilon_0 + \frac{2}{s!} \frac{1}{N^s} \leq 4c_s \varepsilon_0. \end{aligned}$$

Аналогичным образом аппроксимируем частные производные функции $f(x_1, x_2)$ в области Δ_k .

Таким образом, для аппроксимации функции $f(x_1, x_2)$ в области $\Delta_{i_1 i_2}^k$ нужно в каждом узле аппроксимации запомнить $[O(\log_2 4c_s)]$ двоичных разрядов.

Осталось построить алгоритм аппроксимации функции $f(x_1, x_2)$ в областях Δ_{i_1, i_2}^0 .

Отличие от предыдущего случая заключается только в том, что используются производные до r -го порядка, и поэтому на подробном построении не останавливаемся.

Таким образом, для построения описанного выше алгоритма нужно запомнить с точностью $\varepsilon_k, k = 0, 1, \dots, s$, значения функции $f(x_1, x_2)$, ее частных производных до s -го порядка в точке $A_{1, N-1}$ и значения функции $f(x_1, x_2)$ и ее частных производных до r -го порядка в точке $(-1, -1)$, а также $(\alpha + 1)[\log_2(4C_s)] + 1$ двоичных разрядов в каждом узле интерполяции. Здесь α – число частных производных s -го порядка. В общей сложности нужно запомнить число двоичных разрядов, выражаемых правой частью формулы (17). Используя результаты работы [2], можно показать, что изложенный алгоритм является оптимальным по порядку по точности и памяти.

Реализация метода

Остановимся на вопросе реализации изложенного выше метода восстановления информации о потенциальных полях в случае, когда по техническим причинам невозможно измерить значение производных до достаточно высокого порядка. Для определенности ограничимся рассмотрением класса функций $Q_{r, \gamma}(M, \Omega), \Omega = [-1, 1]$. Класс функций $Q_{r, \gamma}(M, \Omega), \Omega = [-1, 1]^l, l = 2, 3, \dots$, исследуется аналогично, но технически более сложно.

Пусть $f(x) \in Q_{r, \gamma}(1, \Omega), \Omega = [-1, 1]$. Пусть $\varepsilon > 0$ – достаточно малое число. Требуется определить число $N(\varepsilon)$ узлов $x_k, x_k \in \left[-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right], k = 1, 2, \dots, N(\varepsilon)$, необходимое для вычисления с точностью ε значений производных $f^{(j)}(0), j = 1, 2, \dots, s$, и построить алгоритм вычисления.

Отобразим N узлов полинома Чебышева первого рода с сегмента $[-1, 1]$ на сегмент $[-1/2, 1/2]$ и по полученным узлам построим интерполяционный полином $(N-1)$ -го порядка $L_N(f(x))$. Оценим норму $\|f(x) - L_N(f(x))\|_{C\left[-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right]}$. Так как $f(x) \in Q_{r, \gamma}(1, \Omega), \Omega = [-1, 1]$, то на

сегменте $\left[-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right] f(x) \in W^s(2^\gamma)$. Следовательно, $\|f(x) - L_N(f(x))\|_{C\left[-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right]} \leq C \frac{\ln N}{N^s}$, где C – константа, не зависящая от N .

Для оценки $\|f(x) - L_N(f(x)^{(j)})\|_{C\left[-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right]}, j = 1, 2, \dots, s$, воспользуемся

следующим утверждением.

Лемма 1 [9]. Для любой функции $C^r([a, b])$, $r \geq 0$, существует алгебраический полином Q_n степени $n \geq 4r + 5$ такой, что

$$\|f^{(i)}(x) - Q_n^{(i)}(x)\| \leq \text{const} \left(\frac{\sqrt{x-a}\sqrt{b-x}}{n} \right)^{r-i} \omega \left(f^{(r)}; \frac{\sqrt{x-a}\sqrt{b-x}}{n} \right),$$

$i = 0, 1, \dots, r$, $x \in [a, b]$, где $\omega(t)$ – модуль непрерывности функции $f(x)$, положительная константа не зависит от n , f и x .

Из леммы следует существование полинома $Q_{N-1}(x)$, аппроксимирующего функцию $f(x)$ на сегменте $\left[-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right]$ и удовлетворяющего неравенствам

$$\|f^{(i)}(x) - Q_{N-1}^{(i)}(x)\| \leq \text{const} \left(\frac{1}{n} \right)^{s-i}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, s.$$

Тогда

$$\begin{aligned} \|(f(x) - L_N(f(x)))^{(i)}\| &= \|(f(x) - Q_{N-1} + L_N(Q_{N-1} - f(x)))^{(i)}\| \leq \\ &\leq \|f^{(i)}(x) - Q_{N-1}^{(i)}(x)\| + \|(L_N(Q_{N-1}(x) - f(x)))^{(i)}\| = R_1 + R_2. \end{aligned} \quad (18)$$

Из леммы 1 следует оценка

$$R_1 = \|f^{(i)}(x) - Q_{N-1}^{(i)}(x)\| \leq C \frac{1}{N^{s-i}}, \quad i = 0, 1, \dots, s. \quad (19)$$

Для оценки R_2 воспользуемся следующим утверждением.

Неравенство Бернштейна. Если полином $P_n(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n$ степени не выше n на сегменте $[a, b]$ удовлетворяет неравенству $|P_n(x)| \leq M$, то на интервале (a, b) имеем

$$|f'_n(x)| \leq \frac{Mn}{((x-a)(b-x))^{1/2}}.$$

Применим это неравенство к полиному $L_N(Q_{N-1}(x) - f(x))$. Тогда на сегменте $[-1/4, 1/4]$ имеем

$$|(L_N(Q_{N-1}(x) - f(x)))| \leq \frac{4c \ln N}{N^{s-1}}.$$

Аналогично, на сегменте $[-1/8, 1/8]$ имеем

$$|(L_N(Q_{N-1}(x) - f(x)))^{(2)}| \leq \frac{4 \cdot 8 \cdot c \ln N}{N^{s-2}}.$$

Повторяя этот процесс $(s-1)$ раз, имеем

$$|(L_N(Q_{N-1}(x) - f(x)))^{(s-1)}| \leq \frac{4 \cdot 8 \cdot 16 \cdot \dots \cdot 2^s c \ln N}{N}. \quad (20)$$

Из неравенств (18)–(20) следует, что

$$\|f^{(i)}(0) - (L_N(f(x)))^{(i)}\|_{x=0} \leq \frac{c_i \ln N}{N^{s-i}}, \quad i = 0, 1, \dots, s-1.$$

Из этого неравенства следует, что для достижения точности $\varepsilon_i = \varepsilon_0 N^i$ при вычислении производных $f^{(i)}(0)$, $i = 0, 1, \dots, s-1$, достаточно взять $N \succcurlyeq \left[\left(\frac{1}{\varepsilon} \right)^{1/s} \left(\ln \frac{1}{\varepsilon} \right)^{1/s} \right] + 1$. Пользуясь этим методом, удается восстановить с нужной точностью значения $f^{(i)}(0)$, $i = 0, 1, \dots, s-1$.

Значение $f^{(s)}(0)$ восстанавливается с погрешностью с $\ln N$ и, следовательно, не может быть использовано.

Таким образом, несмотря на то, что $f(x) \in Q_{r,\gamma}(1, \Omega)$, $\Omega = [-1, 1]$, при восстановлении функций $f(x)$ нужно рассматривать ее как функцию из класса $Q_{r,\gamma-1}(1, \Omega)$ и, следовательно, погрешность восстановления имеет порядок $O\left(\frac{1}{N^{s-1}}\right)$.

Замечание. Нетрудно видеть, что в случае $f(x) \in B_{r,\gamma}(M, \Omega)$ возможно восстановление производных любого конечного порядка описанным выше методом.

Список литературы

1. **Бойков, И. В.** Аппроксимация некоторых классов функций локальными сплайнами / И. В. Бойков // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1998. – Т. 38, № 1. – С. 25–33.
2. **Бойков, И. В.** Оптимальные методы приближения функций и вычисления интегралов / И. В. Бойков. – Пенза : Изд-во ПензГУ, 2007. – 236 с.
3. **Шеннон, К.** Статистическая теория передачи электрических сигналов / К. Шеннон // Теория передачи электрических сигналов при наличии помех : сб. ст. – М. : Изд-во иностр. лит., 1953. – С. 181–215.
4. **Колмогоров, А. Н.** Избранные труды. Математика и механика / А. Н. Колмогоров. – М. : Наука, 1985. – 470 с.
5. **Жданов, М. С.** Аналогии интеграла типа Коши в теории геофизических полей / М. С. Жданов. – М. : Наука, 1984. – 327 с.
6. **Бойков, И. В.** Оптимальные методы восстановления потенциальных полей I / И. В. Бойков, А. И. Бойкова // Известия РАН. Физика Земли. – 1998. – № 8. – С. 70–78.
7. **Бойков, И. В.** Оптимальные методы восстановления потенциальных полей II / И. В. Бойков, А. И. Бойкова // Известия РАН. Физика Земли. – 2001. – № 12. – С. 78–89.

8. **Гюнтер, Н. М.** Теория потенциала и ее применение к основным задачам математической физики / Н. М. Гюнтер. – М. : ГИТТЛ, 1953. – 415 с.
9. **Гопенгауз, И. Е.** К теореме А. Ф. Тимана о приближении функций многочленами на конечном отрезке / И. Е. Гопенгауз // Математические заметки. – 1967. – Т. 1, № 2. – С. 173–178.

References

1. Boykov I. V. *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki* [Journal of calculus mathematics and mathematical physics]. 1998, vol. 38, no. 1, pp. 25–33.
2. Boykov I. V. *Optimal'nye metody priblizheniya funktsiy i vychisleniya integralov* [Optimal methods of function approximation and integral calculation]. Penza: Izd-vo PenzGU, 2007, 236 p.
3. Shannon K. *Teoriya peredachi elektricheskikh signalov pri nalichii pomekh: sb. st.* [Theory of electrical signals transfer in presence of noise: collected papers]. Moscow: Izd-vo inostr. lit., 1953, pp. 181–215.
4. Kolmogorov A. N. *Izbrannye trudy. Matematika i mekhanika* [Selected works. Mathematics and mechanics]. Moscow: Nauka, 1985, 470 p.
5. Zhdanov M. S. *Analogi integrala tipa Koshi v teorii geofizicheskikh poley* [Analogues of integrals of Cauchy type in the theory of geophysical fields]. Moscow: Nauka, 1984, 327 p.
6. Boykov I. V., Boykova A. I. *Izvestiya RAN. Fizika Zemli* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Physics of the Earth]. 1998, no. 8, pp. 70–78.
7. Boykov I. V., Boykova A. I. *Izvestiya RAN. Fizika Zemli* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Physics of the Earth]. 2001, no. 12, pp. 78–89.
8. Gyunter N. M. *Teoriya potentsiala i ee primeneniye k osnovnym zadacham matematicheskoy fiziki* [Potential theory and application thereof to basic problems of mathematical physics]. Moscow: GITTL, 1953, 415 p.
9. Gopengauz I. E. *Matematicheskie zametki* [Mathematical notes]. 1967, vol. 1, no. 2, pp. 173–178.

Бойков Илья Владимирович

доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий кафедрой
высшей и прикладной математики,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: boikov@pnzgu.ru

Boykov Ilya Vladimirovich

Doctor of physical and mathematical
sciences, professor, head of sub-department
of higher and applied mathematics,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Бойкова Алла Ильинична

кандидат физико-математических наук,
доцент, старший научный сотрудник,
кафедра высшей и прикладной
математики, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: math@pnzgu.ru

Boykova Alla I'lnichna

Candidate of physical and mathematical
sciences, senior staff scientist,
sub-department of higher and applied
mathematics, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Кривулин Николай Петрович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра высшей и прикладной
математики, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: krivulin@bk.ru

Krivulin Nikolay Petrovich

Candidate of engineering sciences, associate
professor, sub-department of higher
and applied mathematics, Penza State
University (40 Krasnaya street, Penza,
Russia)

Гринченков Григорий Игоревич

аспирант, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: ryazantsevv@mail.ru

Grinchenkov Grigoriy Igorevich

Postgraduate student, Penza State
University (40 Krasnaya street, Penza,
Russia)

УДК 51-74

Бойков, И. В.

**Оптимальные методы табулирования физических полей / И. В. Бойков,
А. И. Бойкова, Н. П. Кривулин, Г. И. Гринченков // Известия высших учеб-
ных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 4 (28). –
С. 43–61.**

СИСТЕМА ПЕРЕДАЧИ НА ОСНОВЕ КАНАЛЬНОГО КОДА

Аннотация. *Актуальность и цели.* Канальное (линейное) кодирование нашло широкое применение в локальных вычислительных сетях и при записи информации на магнитные и оптические накопители информации. Это связано с простотой построения кодеров и декодеров, которые преобразуют сигналы по уровню и форме, а также обеспечивают возможность самосинхронизации приемного устройства. Платой за это является увеличение скорости передачи или скорости записи сигналов равномерными канальными кодами типа Манчестер, NEW, в которых каждый двоичный бит преобразуется в два полубита разной полярности +1 и -1. Это аналогично помехоустойчивому кодированию с двойной избыточностью, поскольку $(n, k) = (2k, k)$, где n – длина кода, k – длина информационной части кода. Предлагается использовать избыточность кода NEW и для обнаружения искажений принятых сигналов. Целью данной работы является моделирование работы канального кода для исследования ошибкообнаруживающих свойств канального кода NEW. *Материалы и методы.* На основе анализа структуры и формы канальных кодов возможно обнаружение ошибок и искажений. Алгебраические методы оценки вероятности обнаружения ошибок канальным кодом NEW весьма затруднительны, поэтому в работе предлагается моделирование системы передачи на основе пакета Simulink, которое позволяет применить статистические методы оценки корректирующих свойств канальных кодов. Ошибкообнаруживающие способности равномерных канальных кодов в сочетании с помехоустойчивыми кодами существенно повышают корректирующие способности систем повышения достоверности передачи информации. *Результаты.* Разработана модель системы передачи информации канальным кодом NEW, состоящая из модели кодера и декодера на основе типовых блоков пакета Simulink. Результаты работы декодера контролируются с помощью блоков Scope и Display. На приеме сигналы регистрируются методом стробирования узлом синхронизации. Блоки сигналов Display обеспечивают подсчет ошибочных элементов принятой информации. *Выводы.* Разработанная и протестированная модель системы передачи на основе канального кода позволяет оценить ошибкообнаруживающие способности кода NEW, которые можно эффективно использовать в каскадных системах помехоустойчивого кодирования информации. Результаты экспериментальных испытаний можно сравнить с данными, полученными по приведенным математическим выражениям.

Ключевые слова: канальный код, модель, система передачи, кодирование, декодирование, обнаружение ошибок, помехоустойчивый код.

Б. А. Savel'ev, M. V. Kruchinina

TRANSFER SYSTEM ON THE BASIS OF CHANNEL CODE

Abstract. *Background.* Channel (linear) coding is widely used in local computing networks and in data recording on magnet and optic data storages. It is associated with simple construction of coders and decoders that transform signals by level and form, as well as provide the possibility of self-synchronization of a receiving device. It leads to the increase of the transfer rate or the rate of signal recording in the form of equal-length channel codes of Manchester type, NEW, where each binary bit is

transformed into two half-bits of different polarity +1 and -1. It is similar to noise resistant coding with binary redundancy as $(n, k) = (2k, k)$, where n – code length, k – length of the information segment of the code. It is suggested to use the NEW code redundancy also detection of received signal distortions. The article aims at modeling the work of the channel code to investigate error-detecting properties of the NEW channel code. *Materials and methods.* On the basis of the analysis of the structure and form of channel codes it is possible to detect errors and distortions. Algebraic methods of error detection probability assessment using the NEW channel code are quite difficult, and therefore the article suggests to model transfer systems on the basis of the Simulink package, that allows applying statistical methods of assessment of channel code's correcting properties. Error-detecting properties of equal-length channel codes in combination with noise resistant codes significantly increase correcting properties of systems of data transfer fidelity improvement. *Results.* The authors developed a model of the system of data transfer by the NEW channel code consisting of a coder and decoder model on the basis of Simulink package standard blocks. Decoder performance is controlled by the Scope and Display blocks. At the reception the signals are registered by the method of strobing by the synchronization unit. Display signal blocks provide enumeration of received data element errors. *Conclusions.* The developed and tested model of the transfer system on the basis of the channel code allows assessing of error-detecting properties of the NEW code that may be efficiently used in cascading systems of noise resistant data coding. Experimental testing results may be compared with data obtained through reduced mathematical expressions.

Key words: channel code, model, transfer system, coding, decoding, detection of errors, noiseproof code.

Введение

В вычислительных сетях и системах хранения информации широкое распространение для повышения достоверности передачи и хранения информации получили каскадные системы помехоустойчивого кодирования, составными частями которых являются внешние и внутренние коды [1, 2]. Эти коды обеспечивают получение конечной скорости передачи при больших длинах кодов. В качестве внешних кодов чаще всего применяются коды Рида – Соломона, циклические коды, турбо-коды [3, 4], а в последнее время коды LDPC (Low – Density Parity – Check) [5, 6]. Внутренними кодами могут быть циклические коды, коды Хэмминга, Рида – Соломона, сверточные и канальные коды [1, 7, 8].

Основные проблемы, стоящие при разработке современных средств хранения и передачи информации, связаны с увеличением плотности записи, уменьшением времени доступа к информации, увеличением скорости передачи информации и с повышением ее достоверности и надежности.

В средствах хранения информации и локальных вычислительных сетях требуется решить следующие задачи:

- увеличение дальности передачи за счет применения двухполярных сигналов;
- спектр линейного сигнала должен быть как можно уже;
- в линейном сигнале должна отсутствовать постоянная составляющая, что позволит повысить верность или дальность передачи сигнала;
- структура линейного сигнала должна обеспечивать возможность выделения тактовой частоты на приемной стороне.

Перечисленные проблемы решаются при помощи линейного кодирования. Параметры получаемого линейного сигнала должны быть согласованы с характеристиками используемой линии связи.

К спектру сигнала предъявляется требование отсутствия постоянной составляющей, т.е. наличия постоянного тока между передатчиком и приемником. В частности, применение различных трансформаторных схем *гальванической развязки* препятствует прохождению постоянного тока.

Более узкий спектр сигналов позволяет на одной и той же линии (с одной и той же полосой пропускания) добиваться более высокой скорости передачи данных.

Синхронизация передатчика и приемника нужна для более точной регистрации сигналов на приеме. Для этого в сетях часто применяют так называемые *самосинхронизирующиеся коды*, сигналы которых несут для передатчика указания о том, в какой момент времени нужно осуществлять распознавание очередного бита. Любой резкий перепад сигнала – так называемый фронт – может использоваться для синхронизации приемника с передатчиком.

1. Анализ процессов передачи информации канальным кодом

Одним из широко применяемых в локальных вычислительных системах (ЛВС) и накопителях является канальный код типа NEW, который обеспечивает указанные характеристики [7]. Принцип преобразования двоичного сигнала в код NEW происходит так (см. рис. 1): двоичная 1 преобразуется в два полубита $(+U, +U)$ или $(-U, -U)$, при этом каждая следующая 1 меняет полярность относительно предыдущей двоичной 1, где U – амплитуда сигнала, T – длина двоичного сигнала, τ – длина полубита; двоичный 0 преобразуется в два полубита вида $(+U, -U)$ или $(-U, +U)$. При этом каждый следующий 0 меняет полярность пары $(+U, -U)$ или $(-U, +U)$ на противоположную. В начале такта уровень сигнала сохраняет уровень сигнала предыдущего такта.

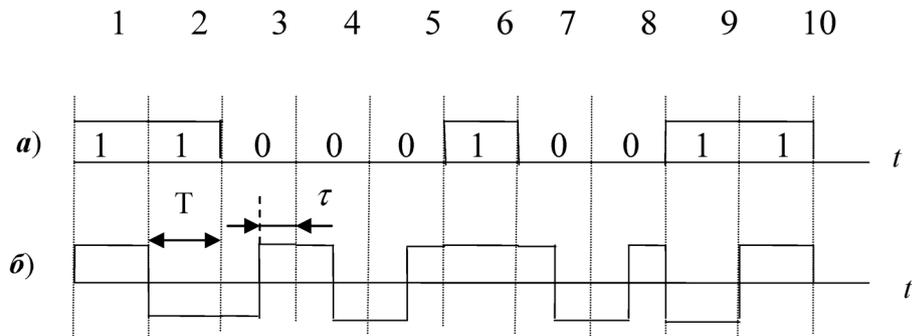


Рис. 1. Преобразование двоичного сигнала в код NEW: **a** – двоичный сигнал; **б** – код NEW, представленный в двухполярном виде NRZ (NRZ – Non Return to Zero)

2. Кодирование

Схема кодирования двоичной последовательности с помощью кода NEW показана на рис. 2. Кодирование осуществляется путем сравнения трех

сигналов: двоичных данных, синхросигнала, получаемого с генератора тактовых импульсов (ГТИ) и двоичных данных, сдвинутых на полпериода данных с помощью триггера D. Двоичные данные поступают на схему в виде биполярного кода NRZ. Сравнение трех указанных сигналов осуществляется путем суммирования по модулю 2 с помощью трех логических элементов «исключающее ИЛИ» (Ср1, Ср2, Ср3). Затем сигналы с выходов схем Ср1, Ср2 и Ср3 перемножаются на логической схеме И (К1). После этого с помощью инвертора Нет1 (Delay1) и схемы И (К2) выделяются фронты импульсов, которые подаются на триггер Т, на выходе которого получают сигналы в коде NEW.

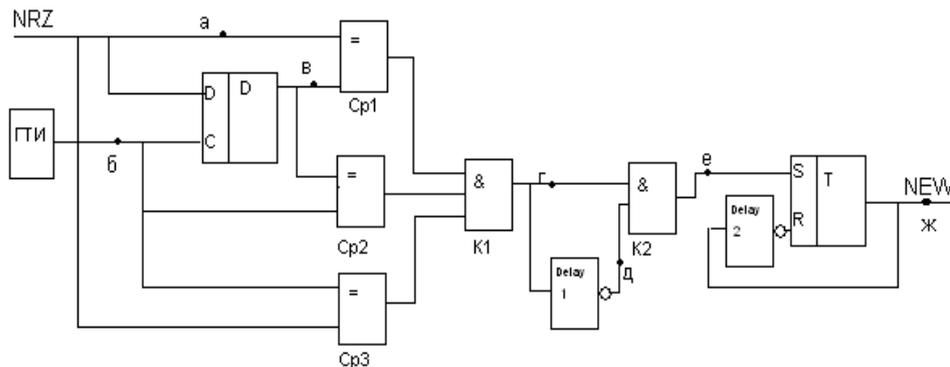


Рис. 2. Схема кодирования с помощью кода NEW

3. Модель кодера канального кода NEW

Модель кодера канального кода NEW представлена на рис. 3. Основные блоки на рис. 3 соответствуют блокам схемы кодирования, приведенным на рис. 2 и реализованным с помощью типовых блоков пакета Simulink [9]. Временные диаграммы работы кодера представлены на рис. 4 и контролируются с помощью осциллографа Scope 1.

В качестве примера для кодирования взята двоичная последовательность 1001010000110001001100001.

Входной сигнал данных формируется с помощью блока сравнения (Compare To Constant 2), логического блока ИЛИ (Logical Operator 1) и мультиплексора (рис. 4,а). В результате сравнения входного сигнала (см. рис. 4,а), синхроимпульса (см. рис. 4,б) и задержанного с помощью блока задержки (Unit Delay) сигнала на сумматорах по модулю 2 (Relational Operator, Relational Operator 1, Relational Operator 2) и схеме И (Logical Operator 2) получен сигнал, показанный на рис. 4,в). Далее выделяются передние фронты полученной последовательности (рис. 4,з). Для этого используется блок задержки (Unit Delay1), схема НЕТ (Logical Operator 4), схема И (Logical Operator 10) и блок сравнения с константой (Compare To Constant 1). Полученный сигнал управляет R-S триггером, который с помощью блока задержки (Unit Delay2) и логической схемы И (Logical Operator 3) формирует сигнал в коде NEW. Сигнал в коде NEW с помощью блока усиления (Gain), блока вычитания константы -1 (Constant) и сумматора преобразуется в двухполярный (рис. 4,д). Осциллограф Scope 1 позволяет проконтролировать сигналы в любой точке кодера.

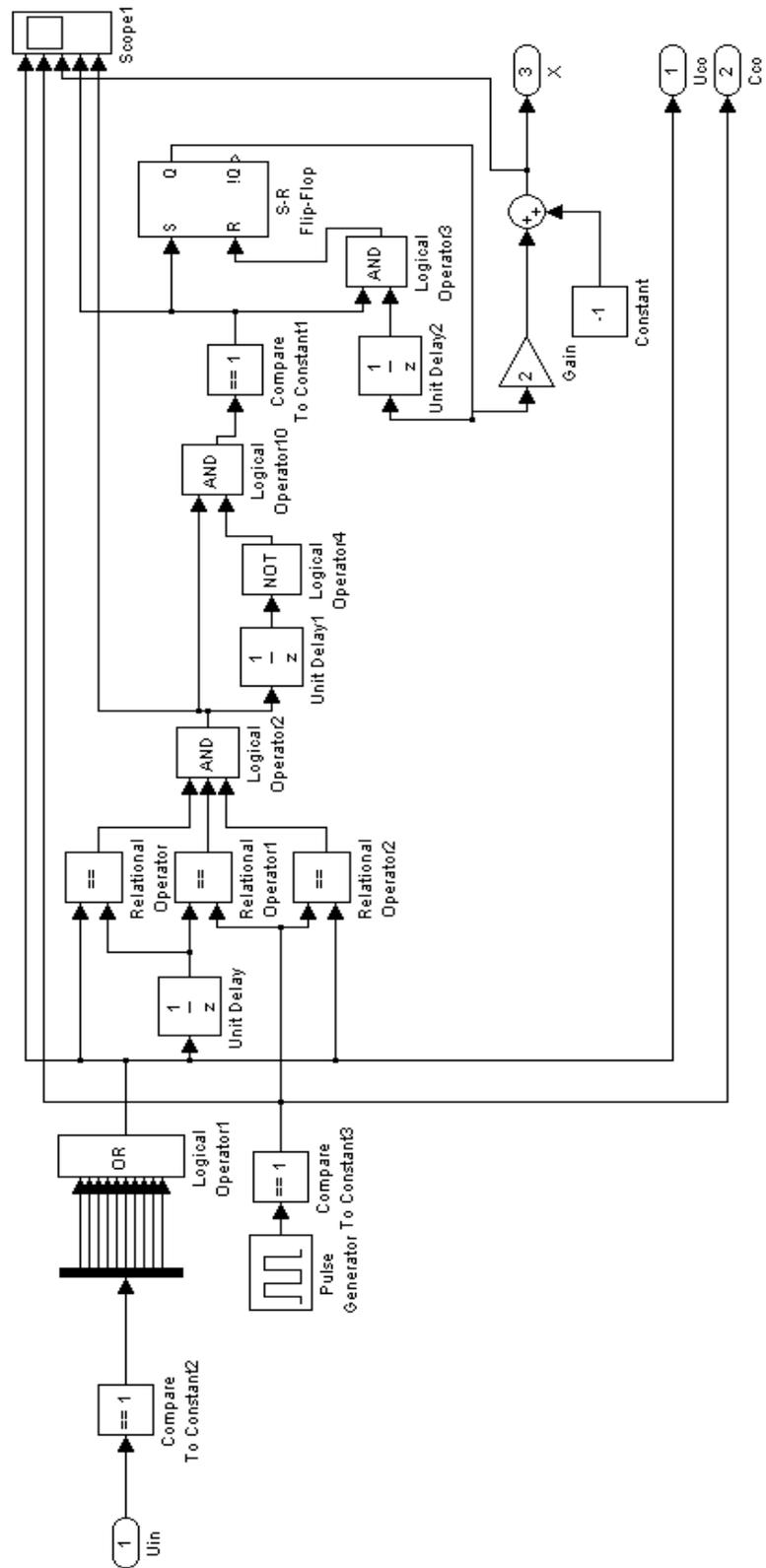


Рис. 3. Модель кодера канального кода NEW

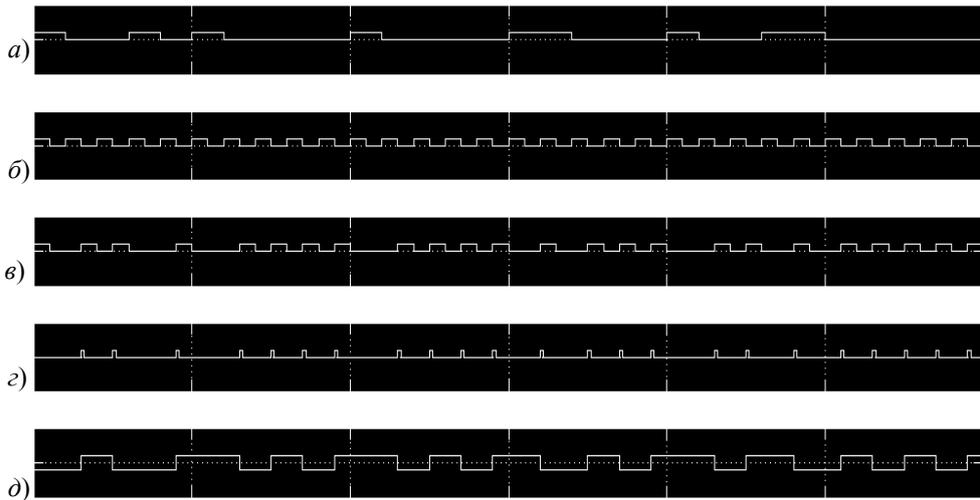


Рис. 4. Временные диаграммы кодирования кодом NEW

4. Декодирование

Схема декодера кода NEW разработана на основе схемы для декодирования сигналов манчестерского кода [8, 10] и приведена на рис. 5. В данном декодере одновременно решаются вопросы синхронизации и преобразования кода NEW в двоичный.

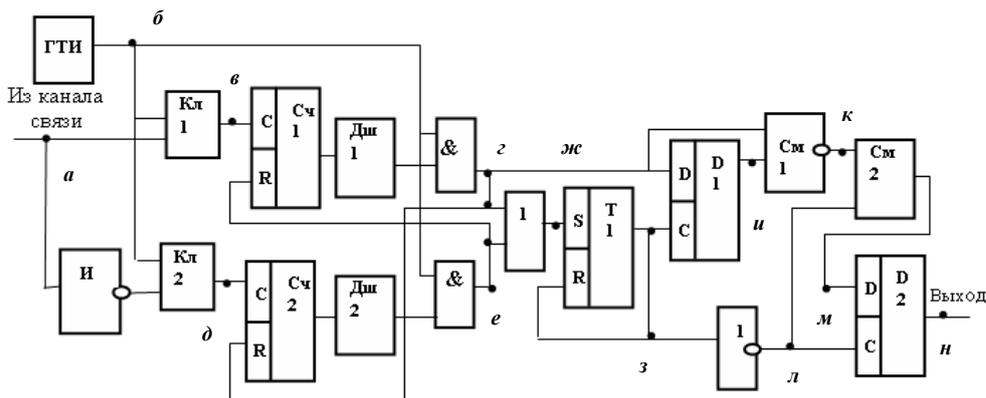


Рис. 5. Декодер кода NEW

Поступающие из канала связи сигналы (рис. 6,а) управляют ключами Кл1 и Кл 2, через которые проходят пакеты импульсов длиной τ (см. рис. 6,в,д), вырабатываемые генератором тактовых импульсов ГТИ (рис. 6,б). Частота импульсов от ГТИ равна $f_{ГТИ} = z \cdot f_{синх}$, где $f_{синх}$ – частота синхронизации, z – коэффициент пересчета счетчиков, $f_{синх} = 1/2\tau$.

Счетчики Сч1 и Сч2 совместно с дешифраторами Дш1 и Дш2 и схемами И1 и И2 вырабатывают короткие импульсы (стробы) в середине положительных и отрицательных импульсов (рис. 6,з,е). Стробы с выходов дешифраторов объединяются на схеме ИЛИ 1 (рис. 6,ж). Далее, проходя через триггер Т1, образуется синхросигнал (рис. 6,з). Подавая его и сигнал с выхода схемы

И1 (рис. 6,з) на входы D1-триггера, получаем сигнал с задержкой на полпериода синхроимпульса (рис. 6,и). Выделенные фронты полученного сигнала с помощью схем неравнозначности на основе сумматоров по модулю 2 (См1 и См2) и инвертированные синхросигналы (рис. 6,л) подаются на входы D2 триггера (рис. 6,к,л,м). Декодированный сигнал получают на выходе триггера D2 (рис. 6,н).

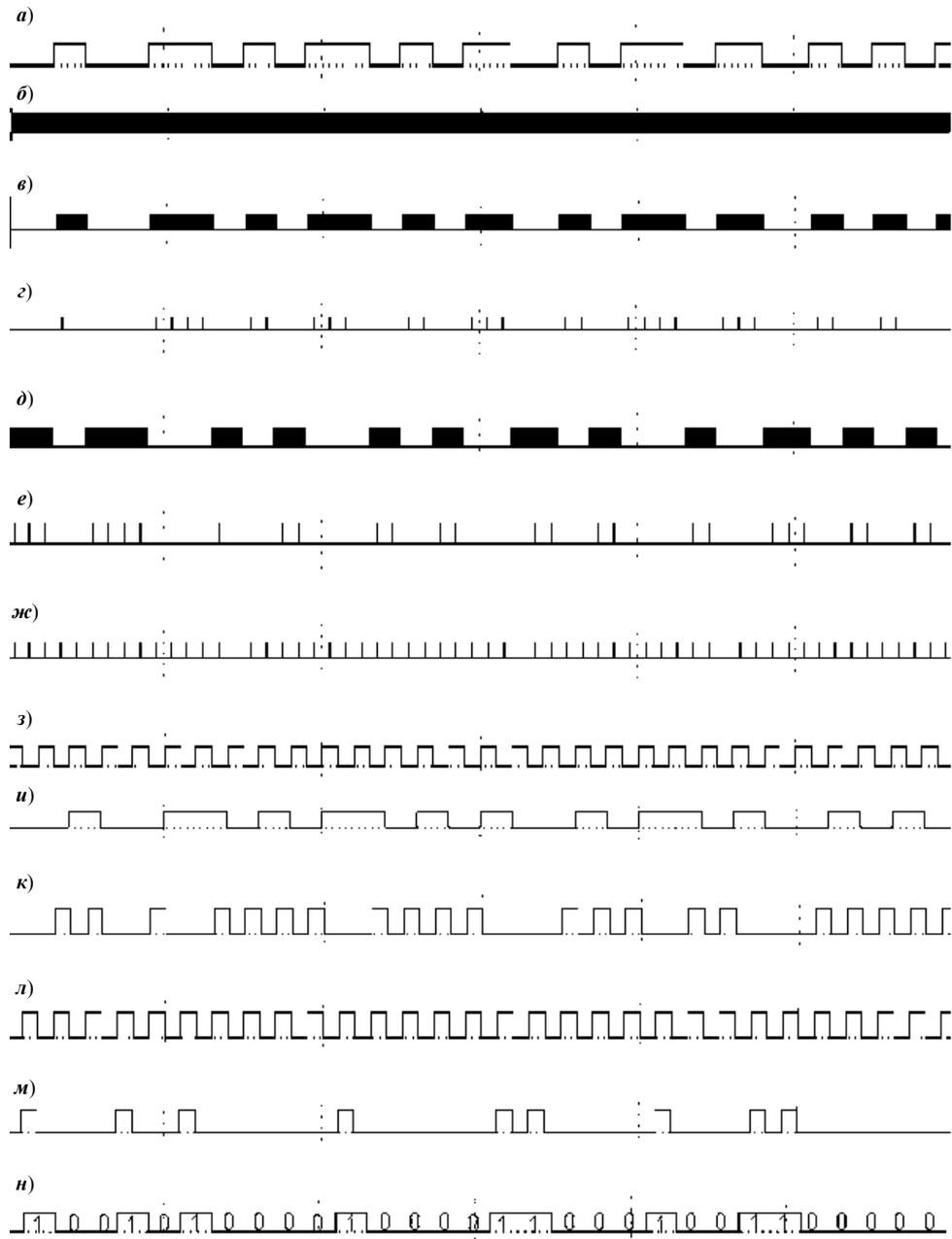


Рис. 6. Временные диаграммы работы декодера NEW

5. Модель декодера канального кода NEW

Модель декодера канального кода NEW также реализована на основе типовых блоков пакета Simulink и показана на рис. 7.

Модель декодера можно разделить на две части: первая часть осуществляет синхронизацию и регистрацию сигналов [10] кода NEW методом стробирования, а вторая часть осуществляет преобразование кода NEW в исходный двоичный код 1001010000110001001100001. Первая часть модели декодера разработана в соответствии со схемой на рис. 5. Для этого использованы блоки пакета Simulink. Временные диаграммы в основных точках модели декодера показаны на рис. 8. Функции регистрации и синхронизации сигналов кода NEW выполняются с помощью: двух блоков выработки констант (Constant1 и Constant2), блока сложения (Add1), блока вычитания (Subtract), двух усилителей (Gain и Gain1), четырех логических блоков умножения (Logical Operator 1, Logical Operator 2, Logical Operator4 и Logical Operator 5), двух счетчиков (Counter и Counter2), двух дешифраторов (Deshifrator, Deshifrator 1), схемы ИЛИ (Logical Operator 6) и блока сравнения с константой (Compare To Constant 2).

На вторую часть декодера сигналы подаются со схем И (Logical Operator 4 и Logical Operator 5), при этом сигналы в коде NEW с выхода блока Logical Operator 4 отображаются на осциллографе Scope 1 (см. рис. 8,а). С помощью SR-триггера (Flip – Flop 1), двух блоков задержки (Unit Delay 1 и Unit Delay 2), двух схем И (Logical Operator 7 и Logical Operator 8) и схемы ИЛИ (Logical Operator 1) выделяются фронты сигналов кода NEW (см. рис. 8,б). Короткие стробы с выходов схем И (Logical Operator4 и Logical Operator5) отображаются на рис. 8,в,г). С помощью схемы ИЛИ (Logical Operator 6) и блока сравнения с константой (Compare To Constant 2) короткие стробы объединяются и затем подаются на схему деления на 2. Деление производится с помощью D-триггера (D Latch 1), блоков задержки (Unit Delay3 и Unit Delay 4) и логического блока И (Logical Operator 12). Сигналы после деления показаны на рис. 8,д).

Процесс преобразования кода NEW в двоичный осуществляется блоками: пяти схем И (Logical Operator 13, Logical Operator 14, Logical Operator 16, Logical Operator 17, Logical Operator 19), схемы ИЛИ (Logical Operator 15, схемы ИЛИ (Logical Operator 18), блока сравнения с константой (Compare To Constant 1) и SR-триггера (Flip – Flop 2). Двоичный код 1001010000110001001100001 показан на рис. 8,е).

6. Обнаружение ошибок кодом NEW

Код NEW обладает способностью к обнаружению ошибок. Это видно из следующего. Как показано выше, каждый двоичный разряд данных на передаче преобразуется в два импульса $\pm U$, что ведет к удвоению разрядов канального кода. Такой код можно обозначить (n, k) , где n – длина канального кода, k – длина двоичного кода, $n = 2k$.

В терминах теории помехоустойчивого кодирования [1] такой код обладает двойной избыточностью, которую можно использовать и для обнаружения некоторых комбинаций ошибок. Например, в коде NEW после двух полубит $(+U, +U)$ не может идти пара $(-U, +U)$ или $(+U, +U)$, а после $(-U, -U)$ не может идти пара $(+U, -U)$ или $(-U, -U)$.

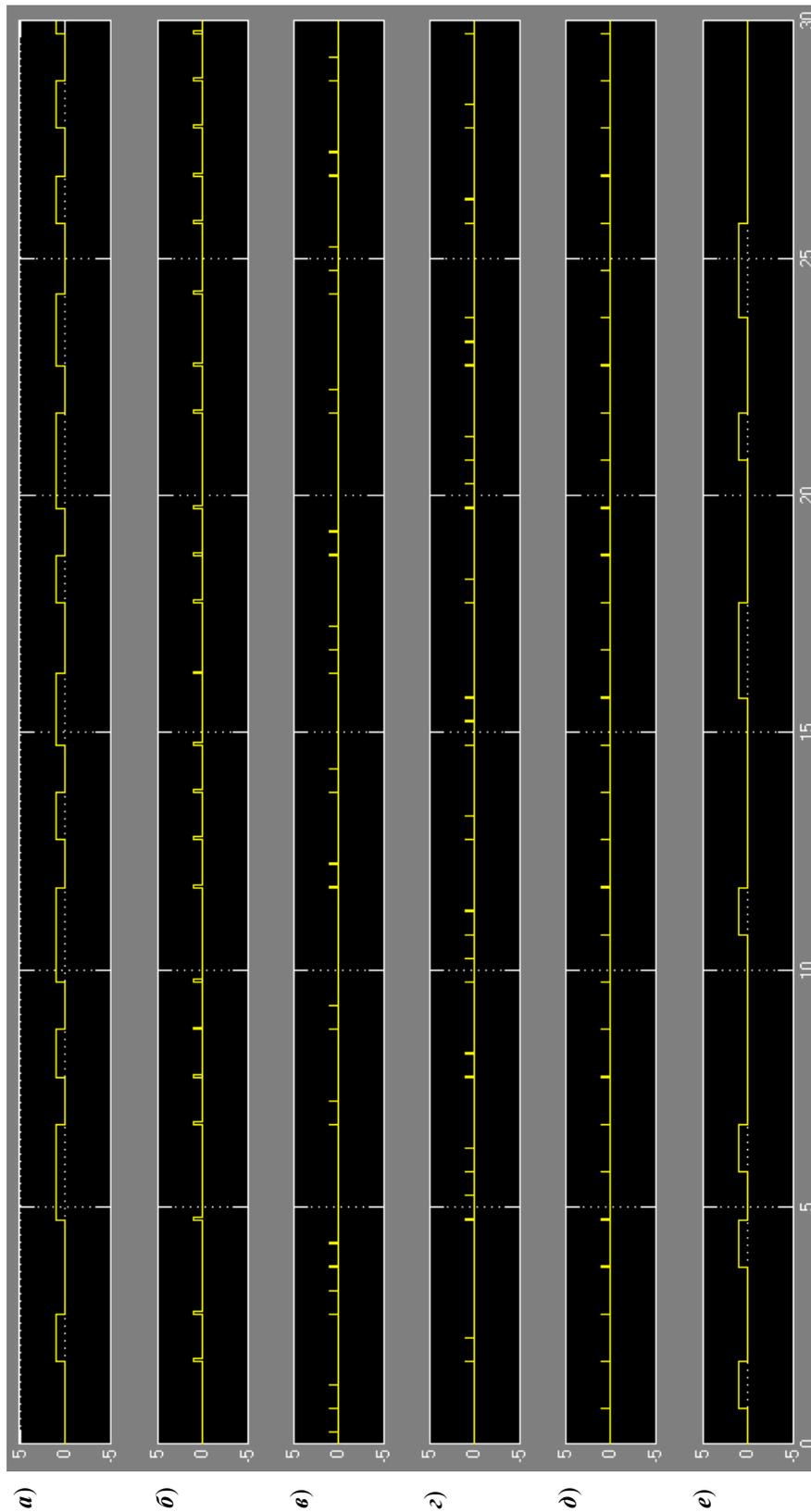


Рис. 8. Временные диаграммы модели декодера канального кода NEW

Это и является сигналом для обнаружения ошибок. Таким образом, кодом NEW обнаруживается часть комбинаций ошибок. Вероятность ошибки этого кода равна

$$P_{\text{ош}}(n) = \sum_{i=1}^n C_n^i p^i (1-p)^{n-i} = \sum_{i=1}^{2k} C_{2k}^i \cdot p^i (1-p)^{2k-i}. \quad (1)$$

Вероятность необнаружения ошибок этим кодом равна

$$P_{\text{но}}(n) = \frac{1}{2^k} \sum_{j=1}^{2k} W_j p^j (1-p)^{2k-j}, \quad (2)$$

где W_i – число вариантов j -кратной необнаруживаемой кодом NEW ошибки, p – вероятность ошибки на бит в канале.

Более точное выражение для вычисления вероятности необнаружения ошибок можно получить после выявления конкретных сочетаний обнаруженных и необнаруженных этим кодом ошибок с учетом корреляции между соседними символами.

Заключение

В статье приведена разработанная и протестированная система передачи дискретной информации на основе канального кода NEW. Модель спроектирована на основе блоков пакета Simulink и включает модели кодирующего и декодирующего устройств. Приведены временные диаграммы, показывающие процессы преобразования сигналов при кодировании и декодировании кодом NEW. Временные диаграммы получены в процессе тестирования модели системы передачи. Модель позволяет исследовать статистические характеристики по ошибкообнаруживающим свойствам канального кода, которые можно сравнить с результатами теоретических расчетов по приведенным формулам.

Список литературы

1. **Форни, Ф.** Каскадные коды / Ф. Форни. – М. : Связь, 1974. – 207 с.
2. **Forney, G. D.** The Viterbi Algorithm / G. D. Forney Proceedings of the IEEE. – 1978. – Vol. 61, № 3. – P. 768–778.
3. **Berrou, C.** Near optimum Error Correcting Coding and Decoding: Turbo – Codes / C. Berrou, A. Glavieux // IEEE Trans. On Communications. – 1996. – Vol. 44, № 10. – P. 1261–1271.
4. **Divsalar, D.** Effective Free Distance of Turbo – Codes / D. Divsalar and R. J. McEliece // Electronic Letters. – 1996. – Vol. 23, № 5. – P. 445–456.
5. **Chung, S.** On the Design of Low – Density Parity – Check Codes within 0.0045 db of the Shannon Limit / S. Chung, D. Forney, T. Richardson, R. Urbanke // IEEE Comm. Letters. Feb. – 2001. – Vol. 5, № 2. – P. 58–60.
6. **Ammar, B.** Construction of low – density parity – check codes based on balanced incomplete block designs / B. Ammar, Y. Kou, J. Xu and S. Lin // IEEE Transactions on information Theory. – 2004. – Vol. 50, № 6. – P. 1257–1268.
7. **Савельев, Б. А.** Моделирование приемника канального кода / Б. А. Савельев, М. А. Баканов // Вычислительные системы и технологии обработки информации : межвуз. сб. науч. тр. – Вып. 8 (31). – Пенза : Инф.-изд. центр ПГУ, 2008. – С. 58–68.
8. **Hagenauer, J.** Iterative Decoding of Binary Block and Convolutional Codes / J. Hagenauer, E. Offer and L. Papke // IEEE Trans. Info. Theory. – 1996. – Vol. 42, № 2. – P. 429–445.

9. Черных, И. В. SIMULINK Среда создания инженерных приложений / И. В. Черных. – М. : ДИАЛОГ-МИФИ, 2004. – 496 с.
10. А. с. 1.591.189 СССР, МКИ⁴, Н03М 5/12, 13/00. Устройство для декодирования сигналов / Савельев Б. А. – 1990, Бюл. № 33.

References

1. Forni F. *Kaskadnye kody* [Cascading codes]. Moscow: Svyaz', 1974, 207 p.
2. Forney G. D. *The Viterbi Algorithm. Proceedings of the IEEE*. 1978, vol. 61, no. 3, pp. 768–278.
3. Berrou C., Glavieux A. *IEEE Trans. On Communications*. 1996, vol. 44, no. 10, pp. 1261–1271.
4. Divsalar D. and McEliece R. J. *Electronic Letters*. 1996, vol. 23, no. 5, pp. 445–456.
5. Chung S., Forney D., Richardson T., Urbanke R. *IEEE Comm. Letters*. Feb. 2001, vol. 5, no. 2, pp. 58–60.
6. Ammar B., Kou Y., Xu J. and Lin S. *IEEE Transactions on information Theory*. 2004, vol. 50, no. 6, pp. 1257–1268.
7. Savel'ev B. A., Bakanov M. A. *Vychislitel'nye sistemy i tekhnologii obrabotki informatsii: mezhvuz. sb. nauch. tr. Вып. 8 (31)* [Computing systems and technologies of data processing: Interuniversity collected papers. Issue 8 (31)]. Penza: Inf.-izd. tsentr PGU, 2008, pp. 58–68.
8. Hagenauer J., Offer E. and Papke L. *IEEE Trans. Info. Theory*. 1996, vol. 42, no. 2, pp. 429–445.
9. Chernykh I. V. *SIMULINK Sreda sozdaniya inzhenernykh prilozheniy* [SIMULINK environment for engineering application building]. Moscow: DIALOG-MIFI, 2004, 496 p.
10. Certificate of authorship 1.591.189 USSR, МКИ⁴, Н03М 5/12, 13/00. Device for signal decoding. Savel'ev B. A. 1990, Bul. no. 33.

Савельев Борис Александрович

доктор технических наук, профессор,
кафедра информационно-
вычислительные системы, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: sba@pnzgu.ru

Savel'ev Boris Aleksandrovich

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of data-computing
systems, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Кручинина Мария Владимировна

аспирант, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: sba@pnzgu.ru

Kruchinina Mariya Vladimirovna

Postgraduate student, Penza State
University (40 Krasnaya street, Penza,
Russia)

УДК 681.324.

Савельев, Б. А.

**Система передачи на основе канального кода / Б. А. Савельев,
М. В. Кручинина // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион.
Технические науки. – 2013. – № 4 (28). – С. 62–73.**

МЕТОД ФРАГМЕНТАРНОГО СЖАТИЯ БИТОВЫХ ПЛОСКОСТЕЙ, ПРЕОБРАЗОВАННЫХ В КОДЫ ГРЕЯ

Аннотация. *Актуальность и цели.* Задача сжатия информации является одной из центральных задач современных информационных технологий. С ростом качества изображений и видеоданных все острее встает вопрос о их сжатии без потерь. Необходимо разработать эффективный алгоритм сжатия видеоданных без потерь, так как большинство существующих на данный момент алгоритмов недостаточно эффективны. Предложен перспективный подход к сжатию видео без потерь – фрагментарный метод сжатия видеопотока, основанный на представлении видеопотока в виде последовательности закодированных элементов из заранее сформированной базы элементарных изображений. *Результаты.* Предложенный в работе метод фрагментарного сжатия позволяет добиться высоких уровней сжатия видеоданных без потерь. Разбиение исходного видеопотока на битовые плоскости позволяет исследовать ранее недоступные конфигурации окон сканирования, а предварительное преобразование изображения в коды Грея приводит к существенному уменьшению как размера базы элементов, так и ее энтропии. *Вывод.* Результаты исследования подтверждают высокую эффективность предложенного метода фрагментарного сжатия.

Ключевые слова: фрагментарное сжатие видеопотока, база элементов видеопотока, битовые плоскости, сжатие без потерь.

I. V. Ognev, A. I. Ognev, A. G. Gor'kov

METHOD OF FRAGMENTARY COMPRESSION OF BIT PLANES, TRANSFORMED INTO GRAY CODES

Abstract. *Background.* The task of data compression is one of the central problems of modern information technologies. With the increase in image and video quality the problem of its lossless compression has become a topical one. It is necessary to develop an efficient algorithm of lossless video data compression. Most of the existing algorithms are not effective enough. The author suggest a promising approach to lossless video compression – fragmentary video compression method based on the concept of the video stream encoded as a sequence of elements of the pre-formed base of elementary images. *Results.* Suggested in this work fragmentary compression method allows to achieve high levels of lossless video data compression. Partition of the source video stream into bit planes allows investigating previously inaccessible window configuration scanning, and prior image transformation to Gray codes leads to a significant decrease either in the size of the database elements, or in its entropy. *Conclusion.* The results confirm high efficiency of the suggested fragmentary compression method.

Key words: fragmentary video compression, base elements of video stream, bit plane, lossless compression.

Введение

Разработка методов, алгоритмов и аппаратных сред сжатия видеоизображений является одним из важнейших направлений развития современных

информационных технологий. Сжатие видео позволяет уменьшить объем данных, необходимый для передачи видео или его хранения.

На сегодня разработаны довольно эффективные методики сжатия видео с потерями. Для многих приложений возникающие потери и артефакты (блочность, замыливание и т.д.) незначительны, но существует широкий круг задач, в которых потери недопустимы. К задачам, где потери недопустимы, можно отнести системы видеонаблюдения, научные видеоданные, архивные записи (например, записи выборов).

На текущий момент существуют способы сжатия видео без потерь (кодеки CorePNG, FFV1, Huffvuv, MSU Lossless Video Codec и другие), но обеспечиваемая ими степень сжатия и время их работы пока недостаточны для их широкого внедрения.

В данной статье рассматривается перспективный подход к сжатию видео без потерь – фрагментарный метод сжатия видеопотока, основанный на представлении видеопотока в виде последовательности закодированных элементов из заранее сформированной базы. Помимо непосредственного описания метода рассмотрены две оптимизации, повышающие его эффективность: представление исходного видеопотока в виде набора битовых видеопотоков, и предварительное кодирование информации о яркости в кодах Грея.

Работа делится на три смысловых блока:

- описание метода фрагментарного сжатия видеопотока;
- применение метода фрагментарного сжатия к видеопотоку, разделенному на битовые плоскости;
- оценка эффективности предварительного преобразования информации в коды Грея.

1. Описание метода фрагментарного сжатия

1.1. Основные определения

При описании самого метода и оценки его эффективности будут использоваться следующие термины.

Пиксель – минимальная единица изображения. Значение пиксела соответствует яркости изображения в одной точке экрана. Количество бит, отводимое для кодирования яркости, называется глубиной цвета (яркости) и обозначается в дальнейшем bpp . В случае работы с цветными видеопотоками для кодирования одного пиксела изображения используется несколько числовых значений, каждое из которых соответствует определенному цветовому каналу.

Кадр – набор всех видимых пикселей в конкретный момент времени. Количество строк пикселей в кадре называется высотой кадра и обозначается в дальнейшем N_1 . Аналогично, количество столбцов пикселей в кадре называется шириной кадра и обозначается N_2 . Таким образом, кадр может быть представлен в виде матрицы чисел $[N_1 \times N_2]$.

Видеопоток (фильм) – последовательность кадров, упорядоченная по времени. Длиной видеопотока будем называть количество кадров в нем и обозначать M – общее число кадров в фильме.

Окно сканирования – прямоугольная область кадра высотой n_1 и шириной n_2 пикселей.

Фрагмент – цифровое представление окна сканирования. Для хранения фрагмента проще всего использовать битовую строку длиной $k = n_1 \cdot n_2 \cdot bpr$ бит.

Логическая разность фрагментов – результат побитового применения операции исключающего ИЛИ к двум фрагментам, полученным в соответствующих окнах соседних кадров. Логическая разность фрагментов, как и сам фрагмент, представляется в виде двоичной строки длиной $k = n_1 \cdot n_2 \cdot bpr$ бит.

Арифметическая разность фрагментов – результат попиксельного вычитания яркостей в соответствующих окнах соседних кадров, представленный в виде битовой строки. Арифметическая разность фрагментов, в отличие от фрагментов и их логических разностей, представляется в виде двоичной строки длиной $k = n_1 \cdot n_2 \cdot bpr + n_1 \cdot n_2$ бит.

Элемент – элементарная часть изображения, представленная в виде битовой строки. В зависимости от используемого варианта алгоритма элементом может быть как сам фрагмент, так и вычисленная на его основе разность (арифметическая или логическая).

Объем фильма – общее количество элементов в кодируемом фильме. Объем фильма обозначается N_{ϕ} и вычисляется по следующей формуле:

$$N_{\phi} = \frac{N_1 \cdot N_2 \cdot M}{n_1 \cdot n_2}.$$

Частота элемента – отношение количества появлений конкретного элемента в кодируемом фильме к объему всего кодируемого фильма.

База элементов – набор всех присутствующих в видеопотоке элементов и их частот. Мощность базы элементов обозначается N_{δ} .

Код элемента – специальным образом построенный двоичный код. Каждому элементу базы элементов ставится в соответствие уникальный код.

1.2. Основная идея метода фрагментарного сжатия

Основная идея метода фрагментарного сжатия заключается в представлении кодируемого видеопотока в виде базы реально встречавшихся элементов и последовательности кодов элементов длины N_{ϕ} .

Так как реальные видеопотоки по сути представляют собой набор осмысленных изображений, медленно меняющихся во времени, следует ожидать существенной корреляции как между соседними окнами одного кадра, так и между соответствующими окнами на соседних кадрах. В случае истинности исходных предположений можно ожидать следующих эффектов:

1) небольшой мощности базы (N_{δ}) относительно мощности множества всех возможных значений фрагментов (2^k) даже при достаточно большом объеме фильма;

2) значительной неравномерности частот появлений различных элементов.

Проведенные эксперименты показывают, что для большинства окон $\frac{N_6}{2^k} \ll 10^{-3}$ и $\frac{H_6}{k} < 0,3$. Таким образом, основную идею метода фрагментарного сжатия можно переформулировать следующим образом: видеопоток представляется в виде хорошо сжимаемой последовательности элементов из некоторого словаря – базы элементов.

Особенностью метода является тот факт, что метод позволяет осуществлять сжатие видеопотока как без потерь, так и с потерями. Причем в случае сжатия с потерями возможна как предварительная обработка сжимаемого видеопотока, так и постобработка, заключающаяся в анализе сформированной базы элементов [1, 2].

Метод фрагментарного сжатия можно представить в виде последовательности трех крупных шагов:

- 1) формирование базы элементов;
- 2) построение коротких кодов для элементов базы;
- 3) формирование сжатого видеопотока.

1.3. Формирование базы элементов

Формирование базы элементов – наиболее сложный в плане реализации этап метода фрагментарного сжатия. Для формирования базы элементов необходимо каждый кадр просканировать окном и для каждого полученного элемента необходимо или добавить его в базу (если он встретился впервые), или пересчитать частоту элемента (в случае, если он встречался ранее).

Основные проблемы при формировании базы элементов заключаются в существенном расходе вычислительных ресурсов ЭВМ (в первую очередь памяти). Поэтому крайне важно использовать эффективные алгоритмы формирования базы [3].

1.4. Построение коротких кодов для элементов базы

Сформированная на предыдущем этапе база элементов представляет собой массив из N_6 битовых строк длиной k бит (элементы). Для каждой строки также хранится частота ее появления в исходном видеопотоке.

Эта информация – исходные данные для всех энтропийных алгоритмов сжатия (дерево Хаффмана, арифметическое кодирование и т.д.). Метод фрагментарного сжатия подразумевает использование префиксных кодов для формирования сжатого видеопотока. Для построения коротких кодов элементов авторы используют предложенный ими ранее метод построения префиксных кодов с помощью дерева секущих функций. В этом методе короткие коды элементов строятся по содержанию самих элементов.

В готовящейся к печати работе Огнева А. И. доказано, что средняя длина таких кодов не превышает величины $H_6 \cdot 1,049$. В серии проведенных экспериментов энтропия базы никогда не превышала 20, т.е. средняя длина кодов секущих для реальных фильмов укладывается в те же априорные оценки избыточности ($H_6 + 1$), что и коды Хаффмана. При этом кодирование с помощью секущих функций вычислительно существенно проще, чем кодирование с помощью алгоритма Хаффмана. Учитывая размеры кодируемых баз элементов ($N_6 \approx 10^7 - 10^9$), это преимущество является весьма существенным.

1.5. Формирование сжатого видеопотока и оценка степени сжатия

В сжатом видеопотоке элементы заменяются полученными на предыдущем шаге кодами. Эксперименты показывают, что длина полученных кодов меньше длины (k) битовой строки, кодирующей элемент. Процесс воспроизведения сжатого видеопотока сводится к прямому декодированию кодов (это возможно, потому что полученные коды обладают свойством префиксности), для которого необходимо иметь информацию о соответствии кодов и элементов базы.

В работе [2] было предложено для передачи базы передавать сам элемент и его частоту. В процессе декодирования необходимо заново построить кодовое дерево по фиксированному алгоритму. Такая концепция подразумевает, помимо передачи непосредственно элементов, дополнительную передачу 64 бит на каждый элемент базы (для кодирования частоты).

Горьков А. Г. предложил способ записи дерева, в листьях которого записана база элементов. При этом, помимо передачи самой базы, достаточно передать два дополнительных бита на каждый элемент базы, т.е. общий объем передаваемой базы составит $(k + 2) \cdot N_G$.

Договоримся о порядке обхода дерева, например, будем использовать обход в ширину. Если встречается узел дерева, то передается бит 0, если в процессе обхода был обнаружен лист, то передается бит 1 и соответствующий элемент базы. В итоге на каждый элемент базы передается всего 2 лишних бита. Указанное представление обратимо: т.е. для каждой строки, построенной описанным способом, можно построить исходное кодовое дерево. Помимо очевидной экономии памяти, описанный способ передачи избавляет от необходимости строить кодовое дерево при декодировании, тем самым значительно повышая его скорость. На рис. 1 показано представление двоичного дерева в виде двоичной строки с помощью описанного метода.

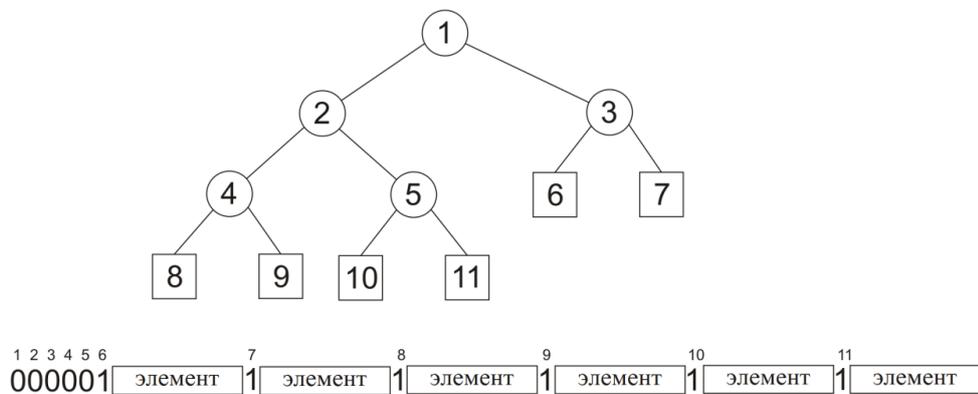


Рис. 1. Эффективное кодирование двоичного дерева

Таким образом, предлагаемая в работе схема передачи видеопотока состоит из двух частей: кодовое дерево, соответствующее сформированной базе, и цепочка кодов элементов.

Для того чтобы оценить степень сжатия, обозначим среднюю длину кодов как l_{cp} , тогда объем сжатой передачи равен

$$V_{сж} = N_{\bar{6}}(k + 2) + l_{ср}N_{\phi}$$

Объем несжатого фильма при этом равен

$$V_{\phi} = N_{\phi}k.$$

Степенью сжатия назовем величину

$$CR = \frac{V_{сж}}{V_{\phi}} = \frac{N_{\bar{6}}}{N_{\phi}} \cdot \frac{k + 2}{k} + \frac{l_{ср}}{k}.$$

Обратную величину будем называть коэффициентом сжатия:

$$CC = \frac{1}{CR} = \frac{1}{\frac{N_{\bar{6}}}{N_{\phi}} \cdot \frac{k + 2}{k} + \frac{l_{ср}}{k}}.$$

Очевидно, что степень сжатия зависит только от следующих параметров: $N_1, N_2, M, bpp, n_1, n_2$. Все рассматриваемые параметры можно разделить на две группы: параметры видеопотока и параметры метода. К первой группе относятся размер и конфигурация кадра ($N_1, N_2, N_1 \cdot N_2$), глубина яркости (bpp) и продолжительность фильма (M). Ко второй группе относятся конфигурация и размер окна сканирования ($n_1, n_2, n_1 \cdot n_2$). Изменение любого из этих параметров неизбежно приводит к изменению состава, объема ($N_{\bar{6}}$) и частотных характеристик базы элементов.

В серии экспериментов было показано, что при увеличении площади окна и фиксированной глубине цвета $\frac{N_{\bar{6}}}{N_{\phi}}$ растет так сильно, что доля кодового дерева в передаче становится доминирующей и неизбежно ведет к уменьшению коэффициента сжатия. Обойти эту проблему можно двумя способами:

1. Эксперименты показали, что при фиксированном размере окна увеличение продолжительности сжимаемого фильма приводит к уменьшению величины $\frac{N_{\bar{6}}}{N_{\phi}}$ ($N_{\bar{6}}$ растет значительно медленнее N_{ϕ}). Отсюда следует, что

гораздо выгоднее собирать базу элементов и кодировать ее для максимально длинных видеопотоков (например, сразу для всего сезона сериала).

2. Второй способ заключается в разделении исходного видеопотока на bpp двоичных видеопотоков. Метод разложения на битовые плоскости [4] заключается в разделении одного изображения с 2^{bpp} уровнями яркости на bpp бинарных изображений. При этом i -е изображение получается путем выделения i -х битов из каждого пикселя исходного изображения. Если применить такое разложение ко всем кадрам видеопотока, то получится bpp двоичных видеопотоков, каждый пиксель которых имеет всего два значения яркости. Это приводит к тому, что вместо одной базы с максимальным разме-

ром 2^k для передачи видеопотока используется bpp баз с максимальным размером $2^{\frac{k}{bpp}}$.

2. Алгоритм фрагментарного сжатия битовых плоскостей

Для того чтобы сократить долю базы в передаче, каждый из bpp двоичных видеопотоков кодируется методом фрагментарного сжатия независимо. При этом для каждого бинарного видеопотока могут быть выбраны свои оптимальные параметры: размеры и конфигурации окна. Степень сжатия, получаемую при кодировании битовых плоскостей, можно легко оценить как среднее арифметическое степеней сжатия двоичных видеопотоков (это становится очевидным, если заметить, что размеры всех бинарных видеопотоков одинаковы).

На рис. 2 показано разложение исходного кадра на битовые плоскости.

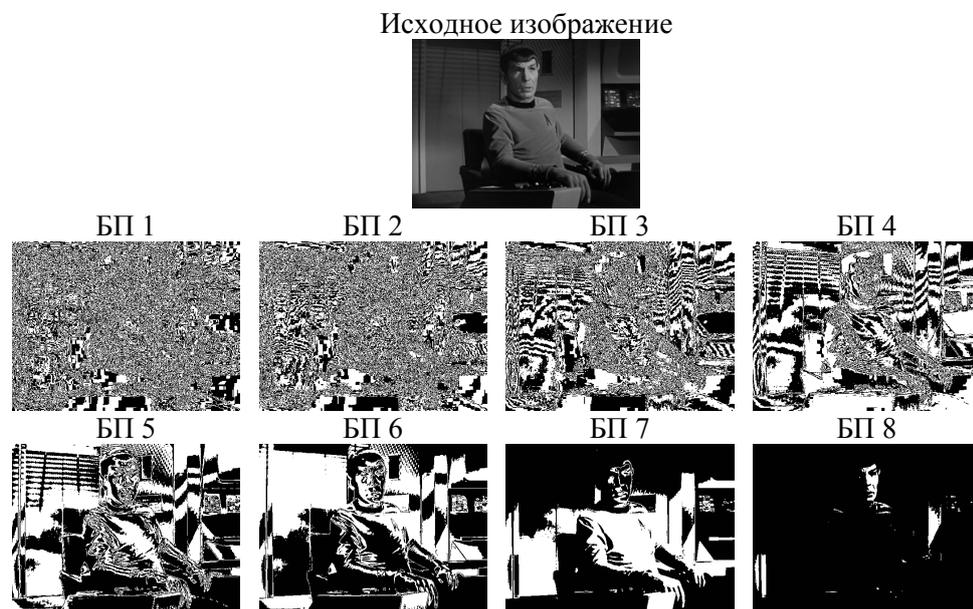


Рис. 2. Разложение кадра на битовые плоскости

Эксперименты показывают, что размеры и частотные характеристики баз бинарных видеопотоков для различных битовых плоскостей существенно отличаются. Была проведена серия экспериментов, в которых видеопотоки, полученные путем выделения битовых плоскостей, кодировались алгоритмом фрагментарного сжатия. Ниже приведена табл. 1, показывающая степень сжатия без потерь для каждой из восьми битовых плоскостей для окон 3×2 , 4×2 , 2×5 , 4×3 ; 3×5 ; 4×5 ; 4×6 ; 6×5 (элементом выступает логическая разность). Для каждого окна также подсчитана средняя степень сжатия (AVG), т.е. степень сжатия исходного видеопотока. Видно, что старшие битовые плоскости сжимаются существенно лучше младших. Это объясняется тем, что старшие битовые плоскости практически полностью состоят из нулевых бит, а младшие сильно зашумлены (см. рис. 2).

Таблица 1

Зависимость степени сжатия от конфигурации окна и битовой плоскости

Плоскость Окна	1	2	3	4	5	6	7	8	AVG
3×2	0,84	0,79	0,67	0,52	0,40	0,30	0,24	0,19	0,49
4×2	0,81	0,76	0,64	0,50	0,37	0,27	0,20	0,14	0,46
2×5	0,80	0,75	0,64	0,49	0,36	0,25	0,18	0,12	0,45
4×3	0,78	0,74	0,62	0,48	0,34	0,24	0,16	0,10	0,43
3×5	0,78	0,74	0,62	0,47	0,34	0,23	0,15	0,09	0,43
4×5	0,76	0,72	0,60	0,46	0,32	0,21	0,13	0,07	0,41
4×6	0,78	0,74	0,62	0,48	0,34	0,22	0,13	0,07	0,42
6×5	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,13	0,06	0,77
Оптим.	0,76	0,72	0,60	0,46	0,32	0,21	0,13	0,06	0,41

Отсюда можно сделать вывод, что различные битовые плоскости должны сжиматься с различными параметрами окна, это позволит резко улучшить степень сжатия по сравнению с общими базами. Например, для каждой из битовых плоскостей можно выбирать свою оптимальную конфигурацию окна сканирования. Из табл. 1 получаем табл. 2 оптимальных конфигураций окна для различных битовых плоскостей.

Таблица 2

Зависимость оптимальной конфигурации окна от номера битовой плоскости

Битовая плоскость	Оптимальная конфигурация окна
1, 2, 3, 4, 5, 6	4×5
7	4×6
8	6×5

Показанные в работе степени сжатия для битовых плоскостей вовсе не являются предельными. Они могут быть значительно улучшены применением к однобитовым видеопотокам индивидуальных дополнительных методов сжатия. Один из способов повышения степени сжатия при кодировании битовых плоскостей рассмотрен далее.

3. Использование кодов Грея для повышения степени сжатия

Ранее уже было показано, что младшие битовые плоскости сильно зашумлены. Шум является случайным плохо сжимаемым сигналом. Это приводит к плохой сжимаемости всего видеопотока в младших плоскостях. Борьба с этим можно, пытаясь выделить из видеопотоков осмысленный сигнал. Одним из способов добиться этого является преобразование яркости пикселей в коды Грея.

Довольно очевидным недостатком алгоритма кодирования битовых плоскостей является эффект многократного переноса разрядов при незначительном изменении яркости. Например, при изменении яркости со 127 на 128 произойдет изменение значений всех двоичных разрядов (0111111 → 1000000), что вызовет изменение всех битовых плоскостей.

Чтобы снизить негативные последствия от многократных переносов, на практике часто используются специальные коды, например коды Грея, в которых два соседних элемента различаются только в одном разряде. Для перевода числа в код Грея необходимо выполнить операцию побитового исключающего ИЛИ с этим же числом, сдвинутым на один бит вправо. Обратное преобразование из кода Грея можно осуществить, выполняя побитовую операцию исключающего ИЛИ для всех сдвигов исходного числа, не равных нулю.

Легко убедиться, что после преобразования в код Грея при смене яркости со 127 на 128 меняется только один двоичный разряд (табл. 3).

Таблица 3

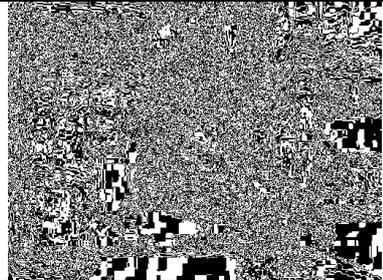
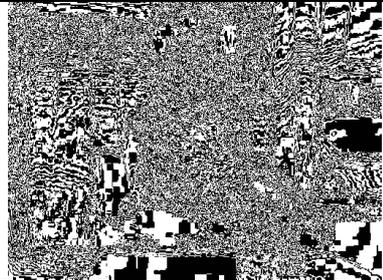
Пример кодирования кодами Грея

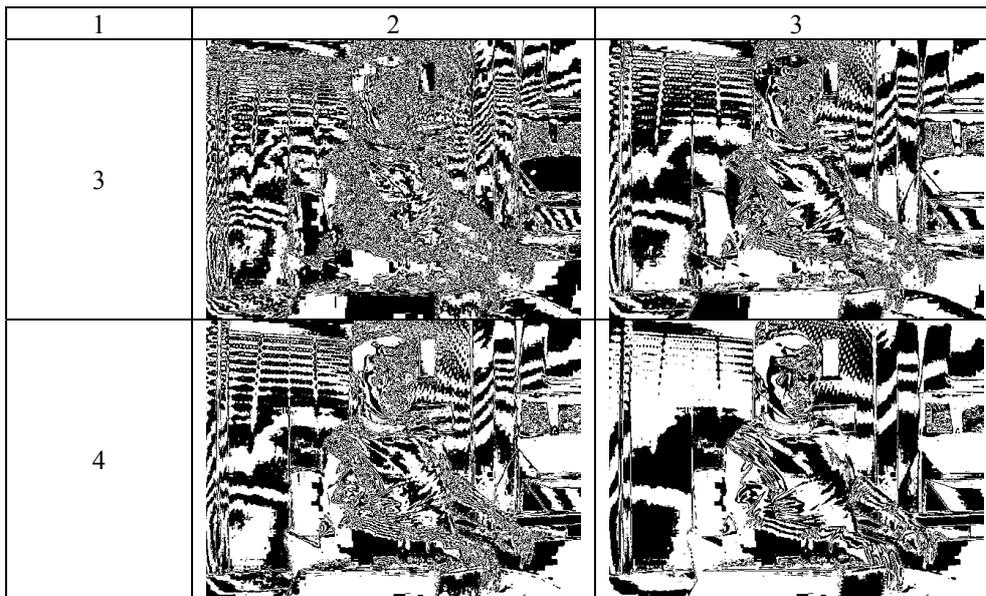
Уровень яркости	Двоичный код	Код Грея
127	01111111	01000000
128	10000000	11000000

Битовые плоскости, полученные с помощью кода Грея, более монотонны и в общем случае лучше поддаются сжатию. В табл. 4 показаны некоторые битовые плоскости, полученные из исходного изображения и изображения, преобразованного в коды Грея. Преобразование яркости в коды Грея позволяет существенно улучшить степень сжатия метода фрагментарного кодирования видеопотока.

Таблица 4

Сравнение битовых плоскостей исходного изображения и изображения в кодах Грея

Битовая плоскость	Исходное изображение	Изображение в кодах Грея
1	2	3
1		
2		



На рис. 3 показан прирост коэффициента сжатия для логических разностей, а на рис. 4 показан прирост коэффициента сжатия для фрагментов. Из приведенных графиков очевидно, что использование предварительного кодирования с помощью кодов Грея позволяет добиться существенного улучшения сжатия во всех битовых плоскостях, а значит, и общей степени сжатия.

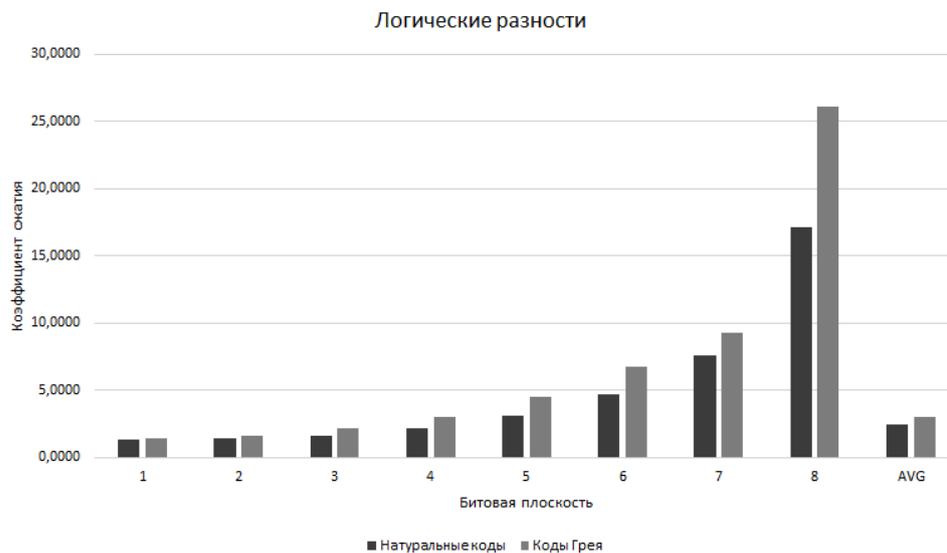


Рис. 3. Прирост коэффициента сжатия для логических разностей

Заключение

В работе представлен предложенный авторами метод фрагментарного сжатия видеопотока.

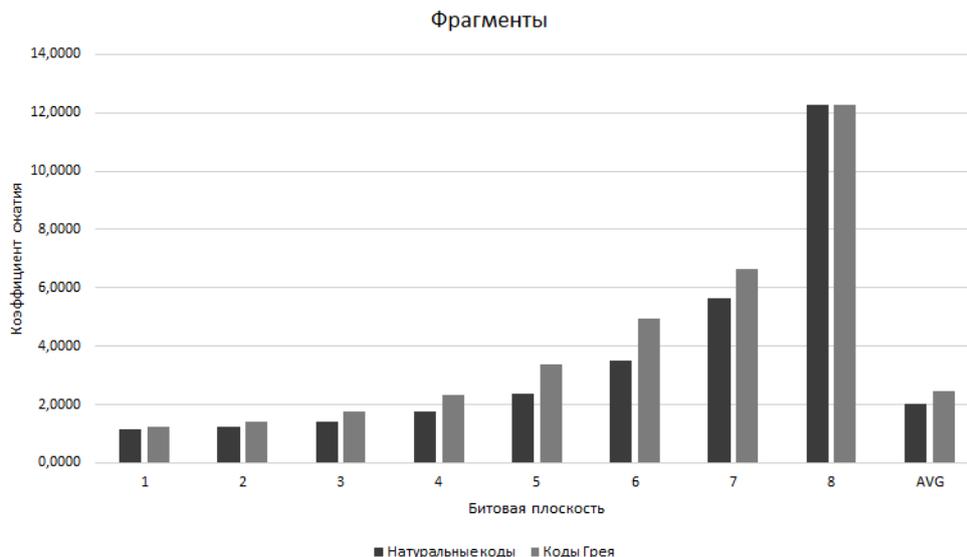


Рис. 4. Прирост коэффициента сжатия для фрагментов

Предложен способ совместного использования метода фрагментарного сжатия видеопотока и метода кодирования битовых плоскостей. Для каждой битовой плоскости сделан и обоснован выбор оптимальной конфигурации окна сканирования.

Исследована и показана эффективность предварительного преобразования яркостей пиксела в коды Грея и последующее применение метода фрагментарного сжатия битовых плоскостей видеопотока.

Показана высокая эффективность данного метода для повышения эффективности сжатия.

Список литературы

1. **Огнев, И. В.** Предварительная обработка кадров видеопотока для алгоритма фрагментарного сжатия видеопотока / И. В. Огнев, А. И. Огнев, А. Г. Горьков // Информационные средства и технологии : материалы междунар. науч.-техн. конф. (Москва, 19–21 ноября 2013 г.). – М., 2013. – С. 47–52.
2. **Огнев, И. В.** Оптимизация конфигурации окна сканирования в фрагментарном методе сжатия видеопотока без потерь / И. В. Огнев, А. И. Огнев, А. Г. Горьков // Информационные средства и технологии : материалы междунар. науч.-техн. конф. (Москва, 20–22 ноября 2012). – М., 2012. – С. 78–85.
3. **Огнев, И. В.** Алгоритм формирования базы данных для фрагментарного метода сжатия видеопотока без потерь / И. В. Огнев, А. И. Огнев, А. Г. Горьков // Информационные средства и технологии : материалы междунар. науч.-техн. конф. (Москва, 20–22 ноября 2012). – М., 2012. – С. 67–77.
4. **Гонсалес, Р.** Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М. : Техносфера, 2005.

References

1. Ognev I. V., Ognev A. I., Gor'kov A. G. *Informatsionnye sredstva i tekhnologii: materialy mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (Moskva, 19–21 noyabrya 2013 g.)* [Information means and technologies: proceedings of the International scientific and technical conference (Moscow, 19–21 November 2013)]. Moscow, 2013, pp. 47–52.

2. Ognev I. V., Ognev A. I., Gor'kov A. G. *Informatsionnye sredstva i tekhnologii: materialy mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (Moskva, 20–22 noyabrya 2012)* [Information means and technologies: proceedings of the International scientific and technical conference (Moscow, 20–22 November 2012)]. Moscow, 2012, pp. 78–85.
3. Ognev I. V., Ognev A. I., Gor'kov A. G. *Informatsionnye sredstva i tekhnologii: materialy mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (Moskva, 20–22 noyabrya 2012)* [Information means and technologies: proceedings of the International scientific and technical conference (Moscow, 20–22 November 2012)]. Moscow, 2012, pp. 67–77.
4. Gonsales R., Vuds R. *Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy* [Digital image processing]. Moscow: Tekhnosfera, 2005.

Огнев Иван Васильевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра вычислительной техники,
Национальный исследовательский
университет «Московский
энергетический институт» (Россия,
г. Москва, ул. Красноказарменная, 14)

E-mail: OgnevIV@mpei.ru

Ognev Ivan Vasil'evich

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of computing technology,
National Research University "Moscow
Power Engineering University"
(14 Krasnokazarmennaya street, Moscow,
Russia)

Огнев Артем Иванович

генеральный директор научно-
производственного общества
«МедИнформ» (Россия, Московская
область, Раменский р-н, 57/3)

E-mail: OgnevIV@mpei.ru

Ognev Artem Ivanovich

General Director of SPA "Medinform"
(57/3, Ramenskoe district, Moscow region,
Russia)

Горьков Алексей Геннадьевич

аспирант, Национальный
исследовательский университет
«Московский энергетический институт»
(Россия, г. Москва,
ул. Красноказарменная, 14)

E-mail: gorkoff@gmail.com

Gor'kov Aleksey Gennad'evich

Postgraduate student, National Research
University "Moscow Power Engineering
Institute" (14 Krasnokazarmennaya
street, Moscow, Russia)

УДК 681.3

Огнев, И. В.

Метод фрагментарного сжатия битовых плоскостей, преобразованных в коды Грея / И. В. Огнев, А. И. Огнев, А. Г. Горьков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 4 (28). – С. 74–85.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ С МНОГОУРОВНЕВЫМИ КВАНТОВАТЕЛЯМИ В ТЕХНОЛОГИИ БИОМЕТРИКО-НЕЙРОСЕТЕВОЙ АУТЕНТИФИКАЦИИ

Аннотация. *Актуальность и цели.* В настоящее время вопросы аутентификации личности с использованием биометрических данных становятся актуальными. Преимущество искусственных нейронных сетей большого размера над классическими кодами с обнаружением и исправлением ошибок обусловлено тем, что они в момент обучения способны учитывать реальные распределения многомерных вероятностей биометрических данных, тогда как все классические коды с обнаружением и исправлением ошибок строились в гипотезе равномерного распределения ошибок. Целью данной работы является изменение парадигмы нейросетевой обработки; предложено от бинарных нейронов (персептронов) перейти к использованию нейронов с многоуровневыми квантователями. *Материалы и методы.* Сравнение проведено с использованием комплексного показателя качества кодов – энтропии (близости их к «белому шуму»). Для кодов длиной порядка 20 бит расчет энтропии может быть проведен по Шеннону. Для более длинных кодов ресурсов современных машин недостаточно. Предложено анализировать только начальный участок кодовых последовательностей возрастающей длины. Далее строится экстраполирующий полином и предсказывается ожидаемое значение энтропии длинных кодов. *Результаты.* Результирующее значение 256-мерной энтропии кодов нейросетевого преобразователя оказалось выше, чем 51-мерная энтропия кодов «нечеткого экстрактора». Выигрыш обусловлен увеличением длины биокода несмотря на то, что длинные коды имеют более высокий уровень корреляции их разрядов. Переход от бинарных нейронов к нейронам с многоуровневыми квантователями увеличивает выигрыш примерно в миллион раз. *Выводы.* При переходе от бинарных нейронов к троичным нейронам длина выходного кода увеличивается в два раза, а их энтропия увеличивается примерно в полтора раза. Выигрыш, связанный с ростом энтропии биокодов, растет с числом уровней квантования в каждом нейроне. При этом проблемы обучения нейронных сетей усиливаются. Необходимо модифицировать стандартный алгоритм обучения ГОСТ Р 52633.5–2011 под сети, состоящие из смеси обычных бинарных нейронов и троичных нейронов.

Ключевые слова: искусственные нейронные сети, преобразование биометрии в код, бинарные квантователи, многоуровневые квантователи, нейроны с большим числом квантовых состояний.

V. I. Volchikhin, A. I. Ivanov, V. A. Funtikov, E. A. Malygina

PERSPECTIVES OF USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS WITH MULTILAYER QUANTIZER IN TECHNOLOGY OF BIOMETRIC-NEURAL-NETWORK AUTHENTICANTION

Abstract. *Background.* At the present time the problems of personality authentication using biometric data are becoming topical. The advantage of artificial neural networks of large size over classical codes with error detection and correction lies in

the fact that in the moment of learning the networks are capable of taking into account real distributions of multidimensional probabilities of biometric data, whereas all the classical codes of error detection and correction are based on the hypothesis of probable distribution of errors. The article is aimed at changing the paradigm of neural network processing; the authors suggest to switch from binary neurons (perceptron) to using neurons with multilayer quantizers. *Materials and methods.* The comparison is conducted using a complex code quality index - entropy (proximity to "the white noise"). For codes of about 20 bits in length the entropy may be calculated according to Shannon. For longer codes the resources modern machines are insufficient. It is suggested to analyze only the initial part of the code sequence of the increasing length. After that it is necessary to build an extrapolating polynomial and predict the expected long code's entropy value. *Results.* The resulting value of 256 bit entropy of codes of the neural network converter turned to be higher than 51-bit entropy of codes of "the fuzzy extractor". The gain is conditioned by the length of the bio-code despite the fact that long codes have a higher level of correlation of their positions. The transition from binary neurons to neurons with multilevel quantizers increases the gain to up to million times. *Conclusions.* In the course of transition from binary neurons to ternary neurons the length of the output code increases two times, and their entropy increases approximately 1,5 times. The gain relating to the increase of biocode entropy increases with the number of quantization levels in each neuron. At the same time the problems of neural network learning also become complicated. It is necessary to modify the standard algorithm of learning ГОСТ Р 52633.5–2011 for networks consisting of the combination of regular binary neurons and ternary neurons.

Key words: artificial neural networks, transition of biometry into code, binary quantizers, multilevel quantizers, neurons with high number of quantum conditions.

Введение

Все преобразователи биометрии в код делятся на «нечеткие экстракторы» [1–12] и нейросетевые преобразователи биометрии в код [13–17]. Основной вклад в развитие технологии «нечетких экстракторов» внесли исследователи США, Канады, стран Евросоюза и Южной Кореи. Нейросетевые преобразователи биометрия–код разрабатываются усилиями исследователей России, Белоруссии и Казахстана. Отличие между этими двумя технологиями только в положении квантователя непрерывных биометрических данных. В «нечетких экстракторах» квантователь преобразует в код «сырые» биометрические данные, а далее эти данные правятся самокорректирующимся кодом.

В нейросетевых преобразователях «сырые» биометрические данные первоначально обогащаются сумматорами искусственных нейронов, а далее уже обогащенные сигналы на выходах сумматоров квантуются выходным нелинейным элементом. Структурные схемы, отражающие положение квантователей в преобразователях биометрия–код, отображены на рис. 1.

В «нечетких экстракторах» может быть использован любой классический код, способный обнаруживать и исправлять ошибки. Обычно используются коды БЧХ (Боуза – Чоухуры – Хоквингема) примерно с 10-кратной избыточностью, способные править до 15 % ошибок. То есть при 512 контролируемых биометрических параметрах длина выходного кода «нечеткого экстрактора» составит 51 бит.

Нейронные сети осуществляют обогащение данных в непрерывной форме, и обычно для корректировки всех входных ошибок оказывается до-

статочной двукратной избыточности, т.е. 512 входных биопараметров нейронная сеть преобразует в 256 бит выходного кода практически без ошибок.

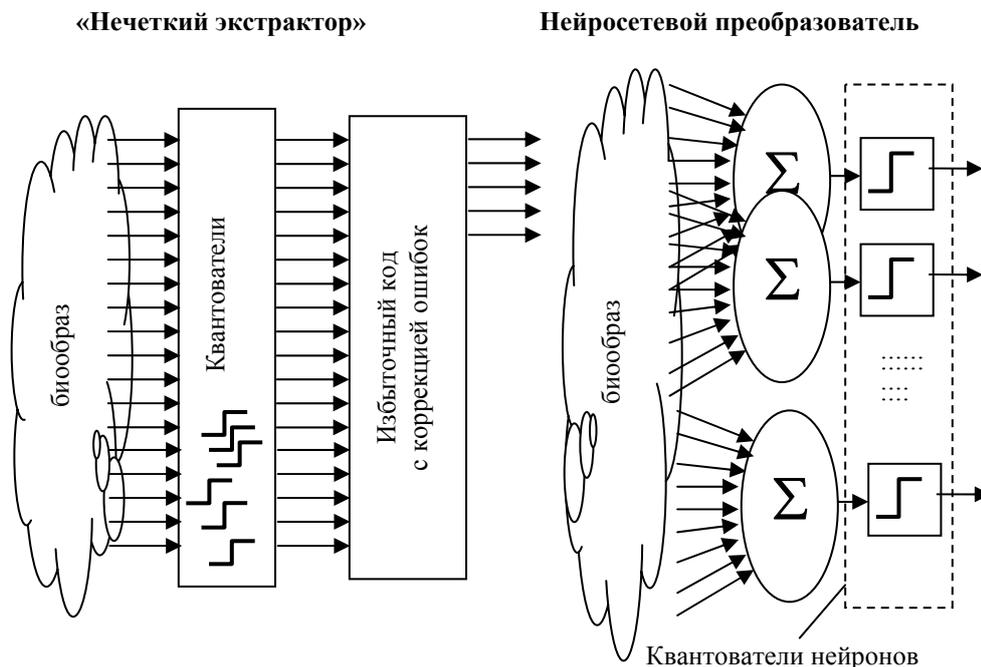


Рис. 1. «Нечеткие экстракторы» и нейросетевые преобразователи отличаются положением нелинейных элементов квантующих непрерывные данные в код с конечным числом состояний

С точки зрения получения биометрических свойств нейросетевые преобразователи биометрия–код всегда лучше «нечетких экстракторов». Это легко продемонстрировать на примере плохих биометрических данных, дающих ошибки в 50 % и более в разрядах биокода. Классические самокорректирующиеся коды не способны править более 50 % ошибок. Нейронные сети с этой проблемой справляются, если избыточность их становится хотя бы трехкратной (входов в три раза больше, чем выходов).

Преимущество искусственных нейронных сетей над классическими кодами с обнаружением и исправлением ошибок обусловлено тем, что они в момент обучения способны учитывать реальные распределения многомерных вероятностей биометрических данных, тогда как все классические коды с обнаружением и исправлением ошибок строились в гипотезе равномерного распределения ошибок.

Практика показывает, что разряды выходных биокодов «Свой» имеют разную стабильность, т.е. гипотеза равномерности ошибок в биометрии не работает. Под каждое конкретное распределение ошибок кодов «Свой» нужно синтезировать свой особый код, оптимально корректирующий ошибки, или применять нейросетевой обогатитель «сырых» биометрических данных, обучаемый по одному из известных алгоритмов [15].

2. Сравнительная оценка характеристик двух технологий через вычисление энтропии длинных зависимых кодов

Комплексным показателем качества кодов (близости их «белому шуму») является энтропия. Если имеется выборка из множества кодов со случайными состояниями разрядов « x_i », то можно последовательно начать вычисление среднего значения энтропии по одному разряду $E(H("x_i"))$, среднего значения энтропии по паре случайно выбранных разрядов $E(H("x_i, x_j"))$. Далее можно продолжить эту процедуру для троек, четверок, пятерок случайно выбранных разрядов. Если приходится иметь дело с «белым шумом», то энтропия будет линейно увеличиваться по мере увеличения числа учитываемых разрядов:

$$\begin{cases} E(H("x_i")) = 1, \\ E(H("x_i, x_j")) = 2, \\ \dots \\ H("x_1, x_2, \dots, x_n") = n. \end{cases} \quad (1)$$

Идеальных преобразователей биометрии в код со свойством (1) не существует. Реальное значение n -мерной энтропии всегда много меньше, чем энтропия n -мерного «белого шума»:

$$H("x_1, x_2, \dots, x_n") < n. \quad (2)$$

Расчет энтропии по Шеннону технически выполним для кодов длиной порядка 20 бит, далее возможности обычных вычислительных машин в настоящее время не хватает. То есть на анализируемой кодовой последовательности следует оценивать только начальный участок последовательности возрастающих значений энтропии низкого порядка. Далее следует строить полином по полученным данным и предсказывать по нему ожидаемое значение энтропии длинных кодов. На рис. 2 приведены примеры использования полиномов 13 порядка для предсказания значений энтропии 51-битных кодов энтропии и 256-битных кодов.

Из данных рис. 2 видно, что кривая роста энтропии выходных кодов «нечетких экстракторов» находится ближе к идеальной линии роста энтропии кодов типа «белый шум». Коды на выходе «нечеткого экстрактора» менее коррелированы (менее зависимы), чем коды на выходе нейросетевого преобразователя биометрия–код. Тем не менее результирующее значение 256-мерной энтропии кодов нейросетевого преобразователя оказывается выше, чем 51-мерной энтропии кодов «нечеткого экстрактора». Этот факт является численным подтверждением преимуществ нейросетевых обогатителей данных в сравнении с классическими кодами, обнаруживающими и исправляющими ошибки.

3. Естественное ограничение числа нейронов сети преобразователя биометрия–код

Следует отметить, что увеличение длины выходного кода нейросетевых преобразователей за счет увеличения числа нейронов может приводить к со-

ответствующему росту энтропии только до некоторого предела. Технически можно сделать число выходов у нейронной сети как угодно большим, однако этот простой прием наращивания длины кода неэффективен. Каждый биометрический образ «Свой» имеет свою уникальную информативность. Если образ «Свой» нестабилен или близок к среднестатистическому, его информативность низка. И наоборот, биометрический образ «Свой» обладает высокой информативностью, если он стабилен и уникален. Существующие ограничения на длину выходного кода (числа нейронов сети) иллюстрируются рис. 3.

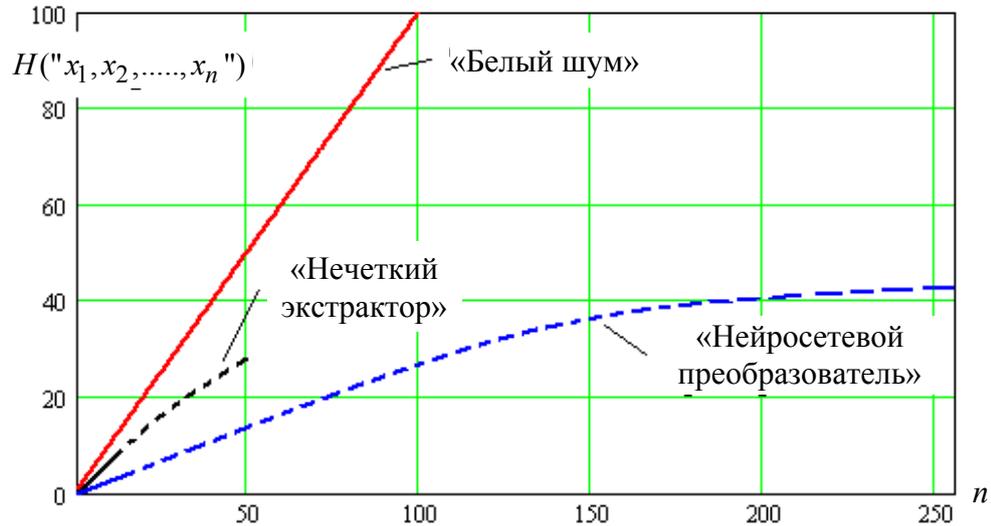


Рис. 2. Прогнозирование значений энтропии длинных кодов

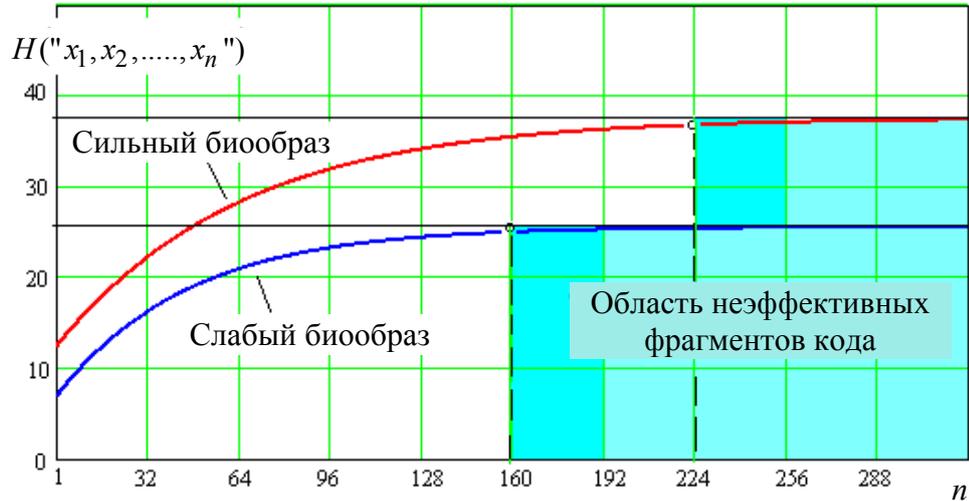


Рис. 3. Рост энтропии выходного биокода нейросети как функция от его длины

Из данных рис. 3 видно, что часть разрядов выходного биокода является лишней, учет этих разрядов не увеличивает энтропию кода. Это происходит из-за существенных корреляционных связей между решениями, принимае-

мыми искусственными нейронами. Из-за этого эффекта слишком сильно увеличивать число нейронов в выходном слое нейронной сети нецелесообразно.

Для слабого биометрического образа (он нестабилен или имеет низкую уникальность) искусственная нейронная сеть могла бы иметь 160 выходов. Для более сильного (более информативного) биометрического образа оптимальным будет код ключа 224 бита. Если нейросетевой преобразователь биометрия–код будет иметь 256 выходов, то часть разрядов и в первом, и во втором случае оказывается избыточной.

4. Биометрические параметры с нулевым математическим ожиданием

Маленькие нейронные сети (с малым числом входов и выходов, с малым числом внутренних связей) хорошо учатся, но никому не нужны из-за того, что их решения оказываются много хуже решений, принимаемых людьми. Большие нейронные сети могут принимать решения, сопоставимые с качеством решений, принимаемых людьми – экспертами. Сверхбольшие искусственные нейронные сети способны принимать решения более высокого качества, чем решения людей. Казалось бы, нужно увеличивать размерность искусственного интеллекта, однако при этом большие и сверхбольшие искусственные нейронные сети перестают обучаться. Так, корпорация Google, для того чтобы организовать поиск картинок, вынуждена для их классификации использовать большие нейронные сети, которые должны предварительно обучаться на 20 000 примерах распознаваемого образа. Обучение ведется методом обратного распространения ошибок, модифицированным Дж. Хинтоном в 2007 г. При этом отмечаем, что процесс обучения длится в течение нескольких суток с привлечением большого числа мощных серверов корпорации Google.

Очевидно, что технологии Google неприменимы для биометрии. Большие нейронные сети преобразователей биометрия–код должны учиться на 20 примерах образа «Свой» за время порядка 1 с на обычной вычислительной машине. Затем данные, использованные при обучении, должны быть удалены. Таковы требования информационной безопасности и национального стандарта ГОСТ Р 52633.0–2006 «Защита информации. Техника защиты информации. Требования к средствам высоконадежной биометрической аутентификации».

Для того чтобы удовлетворить столь жестким требованиям в Пензенском государственном университете и Пензенском научно-исследовательском электротехническом институте в 2002 г. [14] были созданы специальные алгоритмы быстрого обучения больших искусственных нейронных сетей, которые позднее легли в основу национального стандарта ГОСТ Р 52633.5–2011 «Защита информации. Техника защиты информации. Автоматическое обучение нейросетевых преобразователей биометрия–код доступа». Именно благодаря наличию нового стандартизованного алгоритма автоматического обучения удастся поднять эффективную длину ключа до 43 бит для некоторого биометрического образа, в сравнении с 28 битами, полученными «нечетким экстрактором» для того же биометрического образа (см. рис. 2).

Можно говорить о том, что в основу национального стандарта ГОСТ Р 52633.5–2011 положен наиболее эффективный алгоритм обучения из всех существующих на сегодня алгоритмов обучения сетей искусственных бинарных нейронов (персептронов). Однако нет предела совершенствованию технологии, и это хорошо понимает коллектив исследователей, создавший algo-

ритм ГОСТ Р 52633.5–2011 с рекордными показателями скорости обучения и рекордными показателями устойчивости процесса обучения.

Одним из серьезных недостатков ГОСТ Р 52633.5–2011 является то, что он ориентирован только на обучение сетей из бинарных нейронов (персептронов). К сожалению, бинарные нейроны оказались неспособны эффективно обогащать биометрические данные с нулевым и близким к нулевому математическим ожиданием. Если у i -го биометрического параметра v_i образа «Свой» и у i -х биометрических параметров ξ_i образов «Все Чужие» математические ожидания близки

$$E(v_i) \approx E(\xi_i), \quad (3)$$

то весовые коэффициенты у связей таких данных оказываются нулевые. Более того, проведенные исследования показали, что выполнить жесткие требования информационной безопасности и снять ограничения вида (3) невозможно, если оставаться в парадигме использования бинарных нейронов (персептронов).

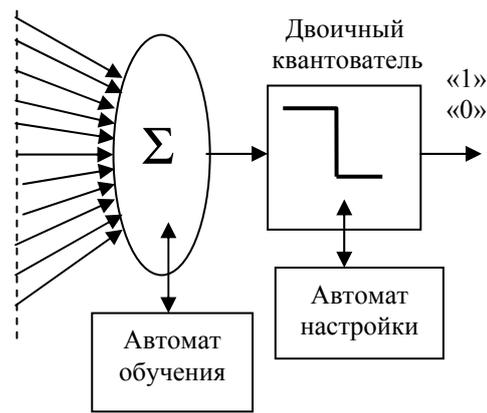
5. Новая парадигма использования нейронов с многоуровневыми квантователями

В обычных двоичных нейронах на выходе сумматора подключен бинарный квантователь с одним порогом сравнения. У троичных нейронов на выходе сумматора подключен квантователь с двумя порогами сравнения и тремя выходными состояниями, как это показано на рис. 4.

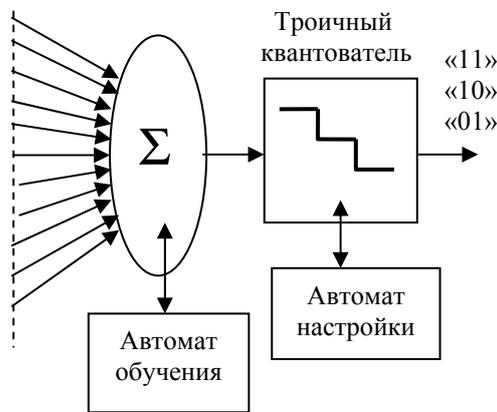
Как правило, выполнение примитивных арифметико-логических операций на современных компьютерах может выполняться в любой системе счисления. Выполнение обычной арифметики в двоичной, троичной, четверичной и т.д. системах счисления не дает какого-либо выигрыша (нет преимуществ). Совершенно не так получается при нейросетевых континуально-квантовых преобразованиях. При переходе к использованию трит-нейронов проблема данных с нулевым математическим ожиданием решается. На рис. 5 приведены варианты выполнения троичных квантователей, позволяющих с выхода каждого из трит-нейронов получать 2 разряда биокода.

При переходе от бинарных нейронов к троичным прогнозируемая длина выходного кода увеличивается в два раза, а длина эффективного кода увеличивается примерно в полтора раза. То есть, переходя от бинарных нейронов, дающих энтропию кодов 43 бита, к троичным нейронам, увеличивается энтропия кодов примерно до 64 бит. Выигрыш составляет 21 бит, или 10^6 раз по значению вероятности ошибок второго рода. Выигрыш в миллион раз по значению вероятности ошибок дорогого стоит, он возникает не на пустом месте. Оказывается, трит-нейроны могут выполнять то, что в принципе не способны делать обычные нейроны (персептроны). В частности, трит-нейроны оказались способны эффективно выполнять функцию хэширования данных, если использовать немонотонные квантователи (правый нижний и левый верхний углы рис. 5).

Если же использовать монотонные квантователи (правый верхний угол и нижний левый угол), то хэширующие свойства трит-нейронов значительно ослабевают.



а)



б)

Рис. 4. Двоичный нейрон (а) и троичный нейрон (б)

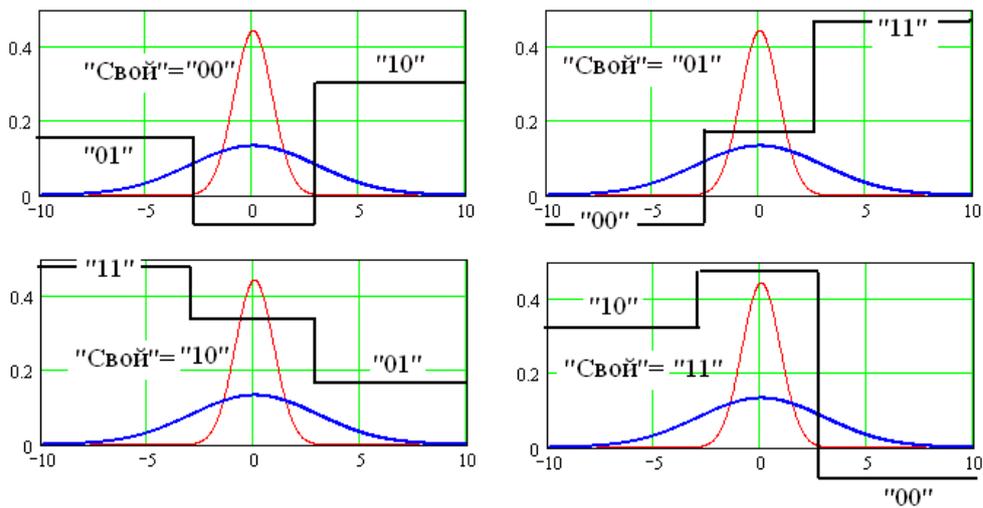


Рис. 5. Примеры использования разных вариантов троичных квантователей

Заключение

Следует отметить, что выигрыш, связанный с ростом энтропии биокодов, растет с усложнением квантователей. Чем больше уровней квантования обеспечивает квантователь, тем выше энтропия выходных биокодов и тем сложнее обучать такие нейроны. Поэтому в настоящее время начата работа по модификации алгоритмов обучения ГОСТ Р 52633.5–2011 под сети, состоящие из смеси обычных нейронов и трит-нейронов.

Список литературы

1. **Juels, A.** A Fuzzy Commitment Scheme / A. Juels, M. Wattenberg // Proc. ACM Conf. Computer and Communications Security, 1999. – P. 28–36
2. **Monrose, F.** Cryptographic key generation from voice / F. Monrose, M. Reiter, Q. Li, S. Wetzel // In Proc. IEEE Symp. on Security and Privacy, 2001.
3. **Juels, A.** A Fuzzy Vault Scheme / A. Juels, M. Sudan // IEEE International Symposium on Information Theory, 2002.
4. **Dodis, Y.** Fuzzy Extractors: How to Generate Strong Keys from Biometrics and Other Noisy / Y. Dodis, L. Reyzin, A. Smith // In EUROCRYPT, Data April 13, 2004. – P. 523–540.
5. **Yang, S.** Automatic Secure Fingerprint Verification System Based on Fuzzy Vault Scheme / S. Yang, I. Verbauwhede // Proc. IEEE ICASSP, 2005. – P. 609–612.
6. **Cauchie, S.** From features extraction to strong security in mobile environment: A new hybrid system / S. Cauchie, T. Brouard, H. Cardot // On the Move to Meaningful Internet Systems 2006: OTM 2006 Workshops, Springer, 2006. – P. 489–498,
7. **Ramírez-Ruiz, J.** Cryptographic Keys Generation Using FingerCodes / J. Ramírez-Ruiz, C. Pfeiffer, J. Nolasco-Flores // Advances in Artificial Intelligence – IBERAMIA-SBIA, 2006. – P. 178–187.
8. **Arakala, A.** Fuzzy Extractors for Minutiae-Based Fingerprint Authentication / A. Arakala, J. Jeffers, K. J. Horadam // Advances in Biometrics (LNCS 4642), Springer, 2007. – P. 760–769.
9. **Lee, Y. J.** Biometric Key Binding: Fuzzy Vault Based on Iris Images / Y. J. Lee, K. Bae, S. J. Lee, K. R. Park, J. Kim // Proceedings of 2nd International Conference on Biometrics. – Seoul, South Korea, 2007, August. – P. 800–808.
10. **Nandakumar, K.** Fingerprint-Based Fuzzy Vault: Implementation and Performance / K. Nandakumar, A. K. Jain, S. Pankanti // IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2007. – Vol. 2(4). – P. 744–757.
11. **Balakirsky, V. B.** Constructing Passwords from Biometrical Data / V. B. Balakirsky, A. R. Ghazaryan, A. J. Han Vinck // Advances in Biometrics (LNCS 5558), Springer, 2009. – P. 889–898.
12. **Kanade, S.** Multi-Biometrics Based Cryptographic Key Regeneration Scheme / S. Kanade, D. Petrovska-Delacretaz, B. Dorizzi // Proceedings of the 3rd IEEE international conference on Biometrics: Theory, applications and systems, 2009. – P. 333–339.
13. **Иванов, А. И.** Биометрическая идентификация личности по динамике подсознательных движений : моногр. / А. И. Иванов. – Пенза : Изд-во ПензГУ, 2000. – 156 с.
14. **Волчихин, В. И.** Быстрые алгоритмы обучения нейросетевых механизмов биометрико-криптографической защиты информации. : моногр. / В. И. Волчихин, А. И. Иванов, В. А. Фунтиков. – Пенза : Изд-во ПензГУ, 2005. – 273 с.
15. **Язов, Ю. К.** Нейросетевая защита персональных биометрических данных / Ю. К. Язов, В. И. Волчихин, А. И. Иванов, В. А. Фунтиков, И. Г. Назаров ; ред. Ю. К. Язов. – М. : Радиотехника, 2012. – 157 с.

16. **Ахметов, Б. С.** Алгоритмы тестирования биометрико-нейросетевых механизмов защиты информации : моногр. / Б. С. Ахметов, В. И. Волчихин, А. И. Иванов, А. Ю. Малыгин. – Алматы, Республика Казахстан : Изд-во КазНТУ им. Сатпаева, 2013. – 152 с.
17. **Akhmetov, B.** Biometric Technology in Securing the Internet Using Large Neural Network Technology / B. Akhmetov, A. Doszhanova, A. Ivanov, T. Kartbaev and A. Malygin // World Academy of Science, Engineering and Technology. Singapore. – 2013, July. – Issue 79. – P. 129–138.

References

1. Juels A. A, Wattenberg M. *Proc. ACM Conf. Computer and Communications Security*, 1999, pp. 28–36
2. Monrose F., Reiter M., Li Q., Wetzels S. *In Proc. IEEE Symp. on Security and Privacy*, 2001.
3. Juels A. A, Sudan M. *IEEE International Symposium on Information Theory*, 2002.
4. Dodis Y., Reyzin L., Smith A. *In EUROCRYPT*, Data April 13, 2004, pp. 523–540.
5. Yang S., Verbauwhede I. *Proc. IEEE ICASSP*, 2005, pp. 609–612.
6. Cauchie S., Brouard T., Cardot H. *On the Move to Meaningful Internet Systems 2006: OTM 2006 Workshops*, Springer, 2006, pp. 489–498,
7. Ramírez-Ruiz J., Pfeiffer C., Nolasco-Flores J. *Advances in Artificial Intelligence – IBERAMIA-SBIA*, 2006, pp. 178–187.
8. Arakala A., Jeffers J., Horadam K. J. *Advances in Biometrics (LNCS 4642)*, Springer, 2007, pp. 760–769.
9. Lee Y. J., Bae K., Lee S. J., Park K. R., Kim J. *Proceedings of 2nd International Conference on Biometrics*, Seoul, South Korea, August, 2007, pp. 800–808.
10. Nandakumar K., Jain A. K., Pankanti S. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2007, vol. 2(4), pp. 744–757.
11. Balakirsky V. B., Ghazaryan A. R., A. J. Han Vinck *Advances in Biometrics (LNCS 5558)*, Springer, 2009, pp. 889–898.
12. Kanade S., Petrovska-Delacretaz D., Dorizzi B. *Proceedings of the 3rd IEEE international conference on Biometrics: Theory, applications and systems*, 2009, pp. 333–339.
13. Ivanov A. I. *Biometricheskaya identifikatsiya lichnosti po dinamike podsoznatel'nykh dvizheniy: monogr.* [Biometric identification of personality by dynamics of subconscious movements: monograph]. Penza: Izd-vo PenzGU, 2000, 156 p.
14. Volchikhin V. I., Ivanov A. I., Funtikov V. A. *Bystrye algoritmy obucheniya neyrosetevykh mekhanizmov biometriko-kriptograficheskoy zashchity informatsii: monogr.* [Fast algorithms of learning of neural network mechanisms in biometric-cryptographic data security: monograph]. Penza: Izd-vo PenzGU, 2005, 273 p.
15. Yazov Yu. K., Volchikhin V. I., Ivanov A. I., Funtikov V. A., Nazarov I. G. *Neyrosetevaya zashchita personal'nykh biometricheskikh dannykh* [Neural network security of personal biometric data]. Moscow: Radiotekhnika, 2012, 157 p.
16. Akhmetov B. S., Volchikhin V. I., Ivanov A. I., Malygin A. Yu. *Algoritmy testirovaniya biometriko-neyrosetevykh mekhanizmov zashchity informatsii: monogr.* [Testing algorithms of biometric-neural-network mechanisms of information security: monograph]. Almaty, Respublika Kazakhstan: Izd-vo KazNTU im. Satpaeva, 2013, 152 p.
17. Akhmetov B., Doszhanova A., Ivanov A., Kartbaev T. and Malygin A. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. Singapore. 2013, July, issue 79, pp. 129–138.

Волчихин Владимир Иванович

доктор технических наук, профессор,
президент Пензенского государственного
университета (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: president@pnzgu.ru

Volchikhin Vladimir Ivanovich

Doctor of engineering sciences, professor,
president of Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Иванов Александр Иванович

доктор технических наук, доцент,
начальник лаборатории биометрических
и нейросетевых технологий, Пензенский
научно-исследовательский
электротехнический институт
(Россия, г. Пенза, ул. Советская, 9)

E-mail: ivan_pniei@penza.ru

Ivanov Aleksandr Ivanovich

Doctor of engineering sciences, associate
professor, head of the laboratory
of biometric and neural network
technologies, Penza Research Institute
of Electrical Engineering (9 Sovetskaya
street, Penza, Russia)

Фунтиков Вячеслав Александрович

кандидат технических наук, генеральный
директор Пензенского научно-
исследовательского электротехнического
института (Россия, г. Пенза,
ул. Советская, 9)

E-mail: pnici@penza.ru

Funtikov Vyacheslav Aleksandrovich

Candidate of engineering sciences, general
director of Penza Research Institute
of Electrical Engineering (9 Sovetskaya
street, Penza, Russia)

Малыгина Елена Александровна

аспирант, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: mal890@yandex.ru

Malygina Elena Aleksandrovna

Postgraduate student, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

УДК 612.087.1; 519.7; 519.66

Волчихин, В. И.

Перспективы использования искусственных нейронных сетей с многоуровневыми квантователями в технологии биометрико-нейросетевой аутентификации / В. И. Волчихин, А. И. Иванов, В. А. Фунтиков, Е. А. Малыгина // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 4 (28). – С. 86–96.

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

УДК 517.958.52

*А. В. Григорьев, Н. К. Юрков,
А. В. Затылкин, Е. А. Данилова, А. Л. Држевецкий*

СТРУКТУРНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ И РАЗЛИЧЕНИЕ ВЫРЫВОВ ПРОВОДЯЩЕГО РИСУНКА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ¹

Аннотация. *Актуальность и цели.* Вырывы проводящего рисунка печатных плат и аналогичные им выступы являются скрытыми (латентными) дефектами печатных плат. Интерес технологов к такого рода дефектам определяется тем, что знание плотности и расположения таких дефектов (при условии различения их подклассов) позволяет выявить отклонения от заданных параметров технологического процесса на ранних стадиях их возникновения. Наиболее эффективными методами выявления латентных технологических дефектов фотошаблонов и печатных плат являются методы неразрушающего визуального (оптического) контроля. Целью данной работы является разработка методологических основ автоматического обнаружения и различения широких, длинных и средних вырывов проводящего рисунка печатных плат, аналогичных выступов такого рисунка, которые, по сути, являются такими же вырывами основы печатной платы. *Материалы и методы.* Известны две задачи контроля фотошаблонов и печатных плат: контроль правильности соединений и допусковый контроль. Контроль правильности соединений выявляет такие явные дефекты печатных плат, как обрыв и короткое замыкание печатных проводников. Допусковый контроль выявляет не только явные, но и скрытые (латентные) дефекты печатных плат. Задача допускового контроля фотошаблонов и печатных плат – выявить фрагменты проводящего рисунка и основания печатной платы, в которых ширина печатных проводников меньше минимально допустимой, и в которых расстояние между печатными проводниками меньше минимально допустимого. *Результаты.* Разработаны методологические основы обнаружения и различения широких, средних и длинных вырывов проводящего рисунка печатной платы. На базе этих методологических основ разрабатываются алгоритмы и определяется место этих алгоритмов в автоматизированной системе визуального допускового контроля печатных плат. *Выводы.* Изложенные принципы положены в основу разрабатываемых алгоритмов выявления латентных дефектов печатных плат следующих видов: средний вырыв, длинный вырыв, широкий вырыв. Реализация этих алгоритмов не требует

¹ Статья подготовлена в рамках реализации НИР «Создание методологических основ обнаружения и локализации латентных технологических дефектов бортовой радиоаппаратуры космических аппаратов методами неразрушающего контроля и диагностики на этапах производства» (ГК № 14.514.11.4078 от 10.03.2013) в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007–2013 годы».

ни эталона, ни таблицы связности контактов слоя печатной платы. Все контролируемые параметры задаются в виде числовых констант. Система абсолютно инвариантна к масштабу, сдвигу и углу поворота контролируемой печатной платы.

Ключевые слова: печатная плата, латентный дефект, оптический контроль, проводящий рисунок, диэлектрическая основа, выступ, вырыв, раковина, вращение, перемычка.

*A. V. Grigor'ev, N. K. Yurkov,
A. V. Zatylnkin, E. A. Danilova, A. L. Drzhevetskiy*

STRUCTURAL DETECTION AND DISTINCTION OF TEAR-OUTS OF CONDUCTIVE PATTERNS OF CIRCUIT BOARDS

Abstract. *Background.* Tear-outs of conductive patterns of circuit boards and ledges similar to them are the latent (latent) defects of printed-circuit boards. Interest of technologists to such defects is defined by that the knowledge of density and an arrangement of such defects, on condition of distinction of their subclasses, allows to reveal deviations from the set parameters of technological process at early stages of their emergence. The most effective methods of detection of latent technological defects of photo masks and printed-circuit boards are methods of nondestructive visual (optical) control. The purpose of this work is to develop methodological bases of automatic detection and distinction of wide, long and average tear-outs of conductive patterns of circuit boards and similar ledges of such patterns which, in fact, are the same tear-outs of the printed-circuit board base. *Materials and methods.* Two problems of control of photo masks and printed-circuit boards are known: control of correctness of connections and access control. Control of correctness of connections reveals such obvious defects of printed-circuit boards, as break and short circuit of printing conductors. Access control reveals not only obvious, but also the latent (latent) defects of printed-circuit boards. The problem of access control of photo masks and printed-circuit boards is to reveal fragments of conductive patterns and the basis of the printed-circuit board in which width of printing conductors is less minimum admissible and in which the distance between printing conductors is less than the minimum admissible. *Results.* Methodological bases of detection and distinction of wide, average and long tear-outs of conductive patterns of circuit boards are developed. On the basis of these methodological bases algorithms are developed and the place of these algorithms in the automated system of visual access control of printed-circuit boards is defined. *Conclusions.* The stated principles are based on the developed algorithms of detection of latent defects of printed-circuit boards of the following types: average tear-out, long tear-out, wide tear-out. Realization of these algorithms doesn't demand neither the standard, nor the table of connectivity of contacts of a layer of the printed-circuit board. All controlled parameters are set in the form of numerical constants. The system is absolutely invariant to the scale, shift and angle of rotation of the controlled printed-circuit board.

Key words: printed-circuit board, latent defect, optical control, conductive pattern, dielectric base, ledge, tear-out, cavity, rotation, link.

Введение

Отечественная радиоэлектронная промышленность, ориентированная на космическую отрасль, вынуждена конкурировать с зарубежными производителями, обеспечивая высокое качество изделий. При изготовлении радио-

аппаратуры (РЭА) невозможно избежать появления технологических дефектов, которые подразделяются на явные и скрытые (латентные).

Явные дефекты приводят к немедленному отказу изделия. Скрытые (латентные) дефекты к немедленному отказу не приводят, но снижают надежность и качество радиоэлектронных средств. Они могут привести к отказу РЭА на этапе ввода в эксплуатацию и, что еще хуже, в ходе эксплуатации аппаратуры.

Для эффективного выявления технологических дефектов необходимо проводить активный контроль и диагностирование РЭА на всех технологических этапах производства. Наиболее ответственными являются этапы изготовления печатной платы, печатных узлов и аппаратуры в целом.

Анализ выпуска отечественных печатных плат указывает на настоятельную необходимость повышения их надежности и качества за счет введения активного контроля технологических процессов изготовления. Следует отметить, что на 30–40 % качество РЭА определяется наличием дефектов печатных плат, причина возникновения которых кроется в несоблюдении технологических требований государственных стандартов и технических условий. Для печатных плат – это трещины в печатных проводниках, перемычки между печатными проводниками, отсутствие металлизации в переходных и контактных отверстиях и др. [1–4].

На этапе изготовления печатных плат к латентным дефектам относятся выступы и сужения, разрывы печатных проводников, вкрапления металлизации на поверхности диэлектрической основы печатной платы и раковины в печатных проводниках. Кроме того, латентными дефектами являются нарушения формы переходных, контактных и крепежных отверстий, смещения центров отверстий относительно их запланированных координат, а также дефекты металлизации отверстий.

Наиболее эффективными методами выявления латентных технологических дефектов фотошаблонов и печатных плат являются методы неразрушающего визуального (оптического) контроля [5, 6].

В ходе оптической инспекции изображения как фотошаблонов, так и печатных плат являются полутоновыми и, как правило, имеют большую неравномерность фона. Для снижения уровня ошибок при выявлении дефектов необходимо преобразование таких изображений в двухградационные. В работах [7–10] обоснованы и интенсивно совершенствуются принципы структурно-разностной сегментации и бинаризации полутоновых изображений. Эти принципы легли в основу предлагаемого метода оптического контроля латентных дефектов печатных плат.

Известны две задачи контроля фотошаблонов и печатных плат: контроль правильности соединений и допусковый контроль. Контроль правильности соединений выявляет такие явные дефекты печатных плат, как обрыв и короткое замыкание печатных проводников [11]. Допусковый контроль выявляет не только явные, но и скрытые (латентные) дефекты печатных плат. Общие принципы оптического допускового контроля фотошаблонов и печатных плат, применяемые в автоматизированных комплексах, изложены в работе [12]. Задача допускового контроля фотошаблонов и печатных плат – выявить фрагменты проводящего рисунка и основания печатной платы, в которых ширина печатных проводников меньше минимально допустимой, и в которых расстояние между печатными проводниками меньше минимально допустимого.

Классификация дефектов фотошаблонов и печатных плат

Классификация дефектов фотошаблонов и печатных плат, эффективная с точки зрения их автоматического обнаружения и распознавания, становится возможной, если рассматривать совместно два изображения: *изображение проводника*, т.е. поверхности печатных проводников и других электропроводных фрагментов, и *изображение фона*, т.е. поверхности основания печатной платы, не закрытой электропроводящим материалом.

Примем следующие определения. Область связанных элементов изображения с общими характеристическими признаками будем называть **объектом**. Область связанных элементов проводника будем называть **сегментом проводника**. Область связанных элементов фона будем называть **сегментом фона**.

Процесс формирования в сегментах областей, представляющих интерес в смысле поиска дефектов, будем называть **индикаторной кластеризацией** сегментов.

Введем понятие **различительного сечения**. Так будем называть отрезок прямой линии, длина которого служит пороговой константой при индикаторной кластеризации сегмента.

Область связанных элементов сегмента, через любую точку которой можно провести хотя бы одно прямолинейное сечение этого сегмента, длина которого будет меньше длины различительного сечения, будем называть **индикаторным кластером** (ИК).

Область связанных элементов сегмента, ни через одну из точек которой нельзя провести ни одного прямолинейного сечения этого сегмента, длина которого была бы меньше длины различительного сечения, будем называть **стабильным кластером** (СК).

Далее, если другое не будет оговорено специально, в качестве различительного сечения для сегментов проводника будем принимать минимально допустимую ширину печатного проводника $d_{\text{пр min}}$, а для сегментов фона – минимально допустимое расстояние между печатными проводниками $d_{\text{ф min}}$.

Введем понятие границы объекта (кластера или сегмента). Объект, который граничит с другим объектом, будем называть **граничащим**. Объект, с которым граничит граничащий объект, будем называть **основным**.

Под **границей** объекта будем понимать область связанных элементов граничащего объекта, каждый из которых имеет в основном объекте хотя бы один соседний по хотя бы одному из восьми направлений элемент.

В основном объекте также формируется граница. В результате оба объекта могут рассматриваться как граничащие между собой.

Множество граничащих между собой ИК будем называть **областью интереса**. Если в области интереса будет обнаружен хотя бы один дефект, то такую область интереса будем называть **дефектной областью**. Область интереса может рассматриваться как единый объект, имеющий границы.

Границу ИК с индикаторным кластером другого сегмента будем называть **смежностью** этого ИК. ИК, имеющие смежности друг с другом, будем называть **смежными** по отношению друг к другу.

Примыканием ИК будем называть его границу с СК того же сегмента, которому принадлежит этот ИК. Граничащий по примыканию ИК будем называть **примыкающим**.

Введем понятие **связности** ИК. Связность ИК определяется количеством его примыканий.

ИК, не имеющий ни одного примыкания, будем называть **несвязным**. ИК, имеющий только одно примыкание, будем называть **односвязным**. ИК, имеющий более одного примыкания, будем называть **многосвязным**.

Многосвязный ИК – это безусловный дефект печатной платы. Такие дефекты будем называть **многосвязными дефектами**.

Несвязные и односвязные ИК являются условными дефектами.

Условия определения индикаторного кластера как дефекта

Для того чтобы индикаторный кластер определился как дефект, необходимо выполнение хотя бы одного из двух условий:

1) если этот ИК является причиной появления фрагментов, в пределах которых ширина печатного проводника, либо расстояние между печатными проводниками становится меньше минимально допустимого размера. Обнаружение таких дефектов осуществляется путем анализа смежности ИК: если односвязный или несвязный ИК имеет хотя бы один смежный многосвязный ИК, то он определяется как дефект. Возможны ситуации, когда односвязный ИК имеет смежный многосвязный ИК, но определение этого односвязного ИК, как дефекта, блокируется;

2) если площадь или периметр ИК превышает соответственно площадь или периметр квадрата со стороной d_{\min} (проводника $d_{\min} = d_{\text{прmin}}$ либо фона $d_{\min} = d_{\text{фmin}}$).

В работах [13, 14] предложены способы непосредственного определения площадей, периметров и координат центров тяжести объектов в процессе считывания и распознавания изображений. Согласно [13, 14] введем понятие характеристического прямоугольника объекта (под объектом понимается кластер или сегмент). Характеристическим прямоугольником объекта будем называть прямоугольник, ограничивающий область выполнения условия H_1 :

$$H_1 = (x \geq x_{\min}) \cap (x \leq x_{\max}) \cap (y \geq y_{\min}) \cap (y \leq y_{\max}), \quad (1)$$

где x и y – абсцисса и ордината точки, соответственно; x_{\min} и x_{\max} – наименьшая и наибольшая абсцисса точки, принадлежащей объекту соответственно; y_{\min} и y_{\max} – наименьшая и наибольшая ордината точки, принадлежащей объекту соответственно.

Для формирования индикаторных кластеров применяется метод, основанный на том, что исходное изображение подвергают операциям сжатия и расфокусировки с последующим вычитанием полученного изображения из исходного. Операции дилатации и эрозии изображений объектов в процессе их считывания и распознавания осуществляются способом, предложенным в работе [15]. Для определения связности ИК производится их маркировка с последующим подсчетом количества примыканий в каждом ИК.

Анализ структурных определений среднего вырыва

Проанализируем структурные определения среднего вырыва (рис. 1).

Ни через одну из точек фрагментов фона l и b нельзя провести ни одного сечения сегмента фона, длина которого была бы меньше $d_{\text{ф min}}$. Поэтому фрагменты фона l и b определяются как СК фона.

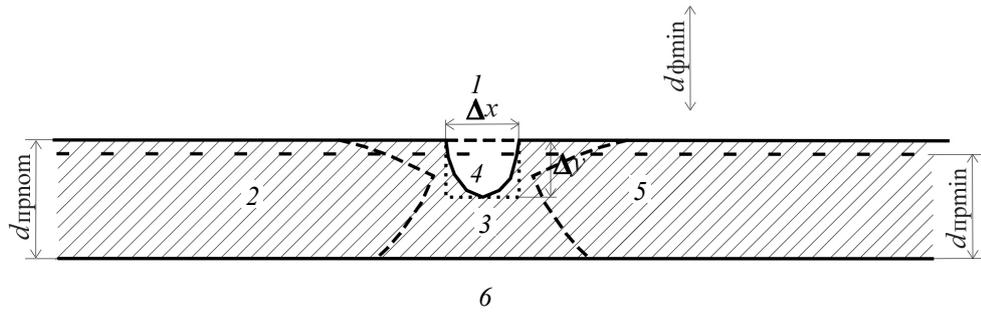


Рис. 1. Структурные определения среднего вырыва

Ни через одну из точек фрагментов проводника 2 и 5 нельзя провести ни одного сечения сегмента проводника, длина которого была бы меньше $d_{\text{пр min}}$. Поэтому фрагменты проводника 2 и 5 определяются как СК проводника.

Через любую точку фрагмента проводника 3 можно провести хотя бы одно сечение сегмента проводника, длина которого будет меньше $d_{\text{пр min}}$. Поэтому фрагмент проводника 3 определится как ИК проводника.

Через любую точку фрагмента фона 4 можно провести хотя бы одно сечение сегмента фона, длина которого будет меньше $d_{\text{ф min}}$. Поэтому фрагмент фона 4 определится как ИК фона.

ИК проводника 3 имеет два примыкания: одно к СК проводника 2, другое – к СК проводника 5. Поэтому ИК проводника 3 определится как безусловный многосвязный дефект проводника. Безусловная дефектность этого фрагмента объясняется тем, что в его пределах ширина печатного проводника меньше минимально допустимого значения.

ИК фона 4 имеет одно примыкание: к СК фона 1. Поэтому ИК фона 4 определится как односвязный. Этот односвязный ИК фона имеет смежный многосвязный ИК: ИК проводника 3. Поэтому ИК фона 4 определится как односвязный дефект фона.

Строятся характеристические прямоугольники односвязных дефектов фона. Односвязный дефект фона определится как средний вырыв при выполнении условия H_2 :

$$H_2 = \left(\frac{\Delta y}{\Delta x} \leq \varepsilon_1 \right) \cap \left(\frac{\Delta x}{\Delta y} \leq \varepsilon_1 \right) \cap \left(S_{\text{ИК}} \geq \frac{S_{\text{ХП}}}{\varepsilon_2} \right), \quad (2)$$

где ε_1 и ε_2 – некоторые задаваемые пороговые значения; $S_{\text{ИК}}$ и $S_{\text{ХП}}$ – соответственно площади ИК и его характеристического прямоугольника.

Для односвязного дефекта фона 4 $\Delta y \approx \Delta x$. Поэтому условие $\left(\frac{\Delta y}{\Delta x} \leq \varepsilon_1 \right) \cap \left(\frac{\Delta x}{\Delta y} \leq \varepsilon_1 \right)$ будет выполняться. Площадь ИК не намного меньше площади характеристического прямоугольника. Поэтому условие $S_{\text{ИК}} \geq S_{\text{ХП}} / \varepsilon_2$ также будет выполняться. В результате и условие H_2 будет выполняться. Односвязный дефект фона 4 определится как средний вырыв.

Таким образом, область интереса, состоящая из многосвязного ИК проводника 3 и односвязного ИК фона 4, определится как дефектная со средним вырывом и недопустимо малой шириной печатного проводника.

Анализ структурных определений длинного вырыва (трещины)

Проанализируем структурные определения длинного вырыва (трещины) (рис. 2).

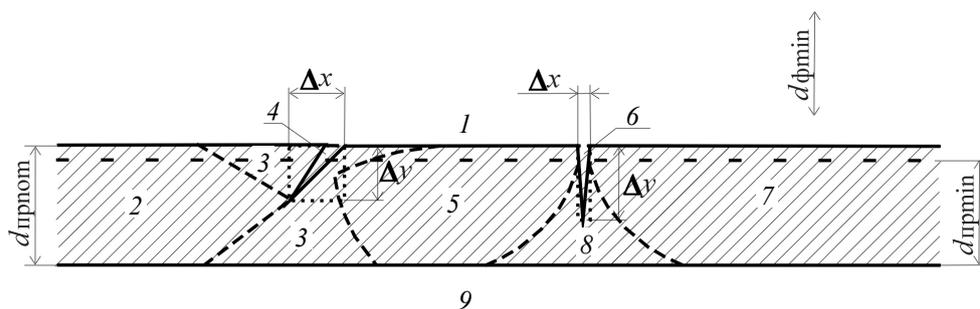


Рис. 2. Структурные определения длинного вырыва (трещины)

Ни через одну из точек фрагментов фона 1 и 9 нельзя провести ни одного сечения сегмента фона, длина которого была бы меньше $d_{\phi min}$. Поэтому фрагменты фона 1 и 9 определяются как СК фона.

Ни через одну из точек фрагментов проводника 2, 5 и 7 нельзя провести ни одного сечения сегмента проводника, длина которого была бы меньше $d_{пр min}$. Поэтому фрагменты проводника 2, 5 и 7 определяются как СК проводника.

Через любую точку фрагментов проводника 3 и 8 можно провести хотя бы одно сечение сегмента проводника, длина которого будет меньше $d_{пр min}$. Поэтому фрагменты проводника 3 и 8 определяются, как ИК проводника.

ИК проводника 3 состоит из двух областей, имеющих общую точку. Поэтому он весь определится как одна область связанных элементов, через любую точку которой можно провести хотя бы одно сечение сегмента проводника, длина которого будет меньше $d_{пр min}$, т.е. как один ИК проводника.

Через любую точку фрагментов фона 4 и 6 можно провести хотя бы одно сечение сегмента фона, длина которого будет меньше $d_{\phi min}$. Поэтому фрагменты фона 4 и 6 определяются как ИК фона.

ИК проводника 3 и 8 имеют по два примыкания: ИК проводника 3 к СК проводника 2 и 5, ИК проводника 8 к СК проводника 5 и 7. Поэтому ИК проводника 3 и 8 определяются как безусловные многосвязные дефекты проводника. Безусловная дефектность этих фрагментов объясняется тем, что в их пределах ширина печатного проводника меньше минимально допустимого значения.

ИК фона 4 и 6 имеют по одному примыканию: к СК фона 1. Поэтому ИК фона 4 и 6 определяются как односвязные. Эти односвязные ИК фона имеют смежные многосвязные ИК: ИК фона 4 имеет смежный многосвязный ИК проводника 3, а ИК фона 6 имеет смежный многосвязный ИК проводника 8. Поэтому ИК фона 4 и 6 определяются как односвязные дефекты фона.

Строятся характеристические прямоугольники односвязных дефектов фона. Односвязный дефект фона определится как длинный вырыв (трещина) при невыполнении условия $H_2(2)$.

Для односвязного дефекта фона 4 $\Delta y \approx \Delta x$. Поэтому условие $\left(\frac{\Delta y}{\Delta x} \leq \varepsilon_1\right) \cap \left(\frac{\Delta x}{\Delta y} \leq \varepsilon_1\right)$ будет выполняться. Зато площадь ИК намного меньше площади характеристического прямоугольника. Поэтому условие $S_{ИК} \geq \frac{S_{ХП}}{\varepsilon_2}$ выполняться не будет. В результате и условие H_2 не будет выполняться. Односвязный дефект фона 4 определится как длинный вырыв (трещина).

Для односвязного дефекта фона 6 $\Delta y \gg \Delta x$. Поэтому условие $\left(\frac{\Delta y}{\Delta x} \leq \varepsilon_1\right) \cap \left(\frac{\Delta x}{\Delta y} \leq \varepsilon_1\right)$ выполняться не будет. Зато площадь ИК не намного меньше площади характеристического прямоугольника. Поэтому условие $S_{ИК} \geq \frac{S_{ХП}}{\varepsilon_2}$ будет выполняться. В результате условие H_2 не будет выполняться. Односвязный дефект фона 6 определится как длинный вырыв (трещина).

Область интереса, состоящая из многосвязного ИК проводника 3 и односвязного ИК фона 4, определится как дефектная с длинным вырывом (трещиной) и недопустимо малой шириной печатного проводника. Область интереса, состоящая из многосвязного ИК проводника 8 и односвязного ИК фона 6, определится как дефектная с длинным вырывом (трещиной) и недопустимо малой шириной печатного проводника.

5. Анализ структурных определений широкого вырыва

Проанализируем структурные определения широкого вырыва (рис. 3).

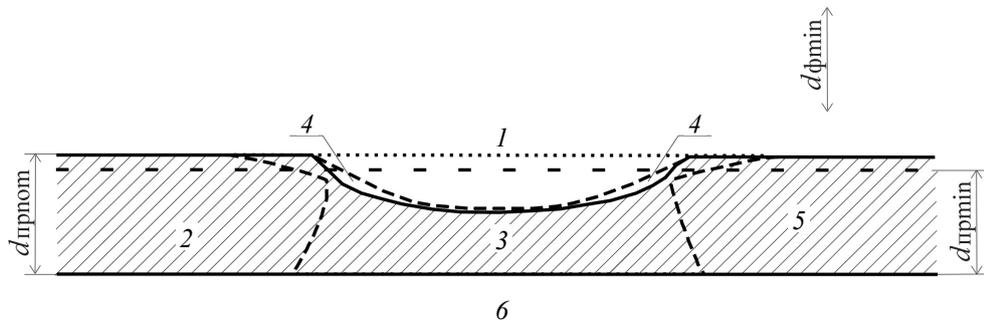


Рис. 3. Структурные определения широкого вырыва

Особенностью этого дефекта является то, что протяженность вогнутого участка печатного проводника, по причине которого его ширина становится меньше минимально допустимого значения, превышает $d_{пр\ min}$. Согласно [13] «отдельные протравы (не более пяти на 1 дм² площади ПП) не должны превышать по длине ширину печатного проводника, при этом оставшаяся ширина печатного проводника (суммарная) должна быть не менее минимально допустимой по КД».

Ни через одну из точек фрагментов фона 1 и 6 нельзя провести ни одного сечения сегмента фона, длина которого была бы меньше $d_{\phi \min}$. Поэтому фрагменты фона 1 и 6 определяются как СК фона.

Ни через одну из точек фрагментов проводника 2 и 5 нельзя провести ни одного сечения сегмента проводника, длина которого была бы меньше $d_{\text{пр} \min}$. Поэтому фрагменты проводника 2 и 5 определяются как СК проводника.

Через любую точку фрагмента проводника 3 можно провести хотя бы одно сечение сегмента проводника, длина которого будет меньше $d_{\text{пр} \min}$. Поэтому фрагмент проводника 3 определится как ИК проводника.

Через любую точку фрагмента фона 4 можно провести хотя бы одно сечение сегмента фона, длина которого будет меньше $d_{\phi \min}$. Поэтому фрагмент фона 4 определится как ИК фона.

ИК проводника 3 имеет два примыкания: одно к СК проводника 2, другое – к СК проводника 5. Поэтому ИК проводника 3 определится как безусловный многосвязный дефект проводника. Безусловная дефектность этого фрагмента объясняется тем, что в его пределах ширина печатного проводника меньше минимально допустимого значения.

ИК фона 4 имеет одно примыкание: к СК фона 1. Поэтому ИК фона 4 определится как односвязный.

Широкий вырыв отличается от других дефектов тем, что его область интереса имеет вогнутый участок. Поэтому длина границы области интереса широкого вырыва с СК фона всегда будет превышать расстояние между началом и концом этой границы. Это и есть характеристический признак широкого вырыва.

Рассматриваемая область интереса состоит из двух ИК: многосвязного ИК проводника 3 и односвязного ИК фона 4. Длина границы этой области с СК фона 1 превышает расстояние между ее началом и концом.

Таким образом, область интереса, состоящая из многосвязного ИК проводника 3 и односвязного ИК фона 4, определится как дефектная с широким вырывом и недопустимо малой шириной печатного проводника.

Широкий вырыв блокирует определение как дефектов всех смежных по отношению к нему ИК. Поэтому определение односвязного ИК фона 4 как дефекта будет заблокировано.

Заключение

Изложенные принципы положены в основу разрабатываемых алгоритмов выявления латентных дефектов печатных плат следующих видов: средний вырыв, длинный вырыв, широкий вырыв. Реализация этих алгоритмов не требует ни эталона, ни таблицы связности контактов слоя печатной платы. Все контролируемые параметры задаются в виде числовых констант. Система абсолютно инвариантна к масштабу, сдвигу и углу поворота контролируемой печатной платы.

Список литературы

1. **Юрков, Н. К.** Технология радиоэлектронных средств : учебник / Н. К. Юрков. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – 640 с.
2. **Юрков, Н. К.** Обзор систем сквозного проектирования печатных плат радиоэлектронных средств / Н. К. Юрков, И. М. Трифоненко, Н. В. Горячев, И. И. Ко-

- чегаров // Надежность и качество : тр. Междунар. симпоз. : в 2-х т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – Т. 1. – С. 396–400.
3. **Юрков, Н. К.** Типовой маршрут проектирования печатной платы и структура проекта в САПР электроники Altium Design / Н. К. Юрков, Н. В. Горячев // Надежность и качество : тр. Междунар. симпоз. : в 2-х т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2011. – Т. 2. – С. 120–122.
 4. **Юрков, Н. К.** Инструментальная среда повышения надежности РЭС / Н. К. Юрков, Б. К. Кемалов, В. П. Перевертов // Надежность и качество : тр. Междунар. симпоз. : в 2-х т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2011. – Т. 2. – С. 192–194.
 5. ГОСТ 27.003–90. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности. Введ. 1992-01-01. – М. : Стандартиформ, 2007. – 20 с.
 6. **Острейковский, В. А.** Теория надежности : учеб. для вузов / В. А. Острейковский. – М. : Высш. шк., 2003. – 463 с.
 7. Патент 1837335 РФ, МПК G06K9/00. Устройство для селекции изображений / Држевецкий А. Л., Григорьев А. В., Царев А. Г., Контисhev В. Н. – № 4912250 ; заявл. 19.02.1991 ; опубл. 30.08.1993, Бюл. № 32.
 8. **Григорьев, А. В.** Критерий обнаружения объектных фрагментов штрихового изображения в полутоновом / А. В. Григорьев, А. Л. Држевецкий // Надежность и качество – 2011 : тр. Междунар. симпоз. : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2011. – С. 310–312.
 9. **Григорьев, А. В.** Критерий обнаружения вершинных сегментов растровых поверхностей / А. В. Григорьев, М. К. Рачковская // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий : материалы Междунар. науч.-практ. конф. – М. : МИЭМ НИУ ВШЭ, 2012. – С. 162–165.
 10. Выявление скрытых точечных изображений на убывающем фоне / А. В. Григорьев, А. Л. Држевецкий, В. А. Трусов, В. Я. Баннов, А. Г. Белов // Молодежь и наука. Модернизация и инновационное развитие страны : материалы II Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – С. 457–462.
 11. **Инютин, А. В.** Алгоритм поиска и классификации дефектов топологии печатных плат / А. В. Инютин // Искусственный интеллект. – 2011. – № 3. – С. 228–237.
 12. **Држевецкий, А. Л.** Автоматизированная система оптического допускового контроля печатных плат и фотосаблонов / А. Л. Држевецкий, А. В. Григорьев // Метрология (Приложение к журналу «Измерительная техника»). – 1995. – № 4. – С. 11–18.
 13. Патент 1837335 РФ, МПК G06K9/00. Устройство для селекции изображений / Држевецкий А. Л., Григорьев А. В., Царев А. Г., Контисhev В. Н. – № 4912250 ; заявл. 19.02.1991 ; опубл. 30.08.1993, Бюл. № 32.
 14. А. с. 1608710 СССР, МПК G06K9/00. Устройство для селекции изображений объектов / Држевецкий А. Л., Абульханов Р. А. – № 4367848 ; заявл. 02.12.1987 ; опубл. 23.11.1990, Бюл. № 43.
 15. ГОСТ 23752–79. Платы печатные. Общие технические условия. – М. Стандартиформ, 1979.

References

1. Yurkov N. K. *Tekhnologiya radioelektronnykh sredstv: uchebnyk* [Technology of radio electronic devices: textbook]. Penza: Izd-vo PGU, 2012, 640 p.
2. Yurkov N. K., Trifonenko I. M., Goryachev N. V., Kochegarov I. I. *Nadezhnost' i kachestvo: tr. Mezhdunar. simpoz.: v 2-kh t.* [Reliability and quality: proceedings of the International symposium: in 2 volumes]. Penza: Izd-vo PGU, 2012, vol. 1, pp. 396–400.

3. Yurkov N. K., Goryachev N. V. *Nadezhnost' i kachestvo: tr. Mezhdunar. simpoz.: v 2-kh t.* [Reliability and quality: proceedings of the International symposium: in 2 volumes]. Penza: Izd-vo PGU, 2011, vol. 2, pp. 120–122.
4. Yurkov N. K., Kemalov B. K., Perevertov V. P. *Nadezhnost' i kachestvo: tr. Mezhdunar. simpoz.: v 2-kh t.* [Reliability and quality: proceedings of the International symposium: in 2 volumes]. Penza: Izd-vo PGU, 2011, vol. 2, pp. 192–194.
5. GOST 27.003–90. *Nadezhnost' v tekhnike. Sostav i obshchie pravila zadaniya trebovaniy po nadezhnosti. Vved. 1992-01-01* [Reliability in equipment. Contents and general notions of the requirements to reliability. Introduction. 1992.01.01]. Moscow: Standartinform, 2007, 20 p.
6. Ostreykovskiy V. A. *Teoriya nadezhnosti: ucheb. dlya vuzov* [Reliability requirements: textbook for universities]. Moscow: Vyssh. shk., 2003, 463 p.
7. Patent 1837335 RF, MPK G06K9/00. *Device for image selection*. Drzhevetskiy A. L., Grigor'ev A. V., Tsarev A. G., Kontishev V. N. no. 4912250; submitted on 19.02.1991; published on 30.08.1993, Bul. no. 32.
8. Grigor'ev A. V., Drzhevetskiy A. L. *Nadezhnost' i kachestvo – 2011: tr. Mezhdunar. simpoz.: v 2 t.* [Reliability and quality – 2011: proceedings of the International symposium: in 2 volumes]. Penza: Izd-vo PGU, 2011, pp. 310–312.
9. Grigor'ev A. V., Rachkovskaya M. K. *Innovatsii na osnove informatsionnykh i kommunikatsionnykh tekhnologiy: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Innovations on the basis of information and communication technologies: proceedings of the International scientific and practical conference]. Moscow: MIEM NIU VShE, 2012, pp. 162–165.
10. Grigor'ev A. V., Drzhevetskiy A. L., Trusov V. A., Bannov V. Ya., Belov A. G. *Molodezh' i nauka. Modernizatsiya i innovatsionnoe razvitie strany: materialy II Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Youth and science. Modernization and innovative development of the country: proceedings of II International scientific and practical conference]. Penza: Izd-vo PGU, 2012, pp. 457–462.
11. Inyutin A. V. *Iskusstvennyy intellekt* [Artificial intelligence]. 2011, no. 3, pp. 228–237.
12. Drzhevetskiy A. L., Grigor'ev A. V. *Metrologiya (Prilozhenie k zhurnalu «Izmeritel'naya tekhnika»)* [Metrology (Appendix to the journal "Measuring equipment")]. 1995, no. 4, pp. 11–18.
13. Patent 1837335 RF, MPK G06K9/00. *Device for image selection*. Drzhevetskiy A. L., Grigor'ev A. V., Tsarev A. G., Kontishev V. N. no. 4912250; submitted on 19.02.1991; published on 30.08.1993, Bul. no. 32.
14. Certificate of authorship 1608710 USSR, MPK G06K9/00. *Device for object image selection*. Drzhevetskiy A. L., Abul'khanov R. A. no. 4367848; submitted on 02.12.1987; published on 23.11.1990, Bul. no. 43.
15. GOST 23752–79. *Platy pechatnye. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [Printed boards. General technical specifications]. Moscow: Standartinform, 1979.

Григорьев Алексей Валерьевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: a_grigorev@mail.ru

Grigor'ev Aleksey Valer'evich

Candidate of engineering sciences, associate
professor, sub-department of radio
equipment design and production,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Юрков Николай Кондратьевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: yurkov_nk@mail.ru

Yurkov Nikolay Kondrat'evich

Doctor of engineering sciences, professor,
head of sub-department of radio equipment
design and production, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Затылкин Александр Валентинович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: al.zatytkin@yandex.ru

Zatytkin Aleksandr Valentinovich

Candidate of engineering sciences,
associate professor, sub-department
of radio equipment design and production,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Данилова Евгения Анатольевна

старший преподаватель, кафедра
конструирования и производства
радиоаппаратуры, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: siori@list.ru

Danilova Evgeniya Anatol'evna

Senior lecturer, sub-department of radio
equipment design and production,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Држевецкий Алексей Львович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: kipra@pnzgu.ru

Drzhevetskiy Aleksey L'vovich

Candidate of engineering sciences, associate
professor, sub-department of radio
equipment design and production,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

УДК 517.958.52

Структурное обнаружение и различение вырывов проводящего рисунка печатных плат / А. В. Григорьев, Н. К. Юрков, А. В. Затылкин, Е. А. Данилова, А. Л. Држевецкий // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 4 (28). – С. 97–108.

С. У. Увайсов, С. П. Сулейманов, Н. К. Юрков

МЕТОД ТЕПЛОВОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЛАТЕНТНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ И ЕЕ ТЕПЛОВАЯ ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ¹

Аннотация. *Актуальность и цели.* У нас в стране и за рубежом непрерывно ведется поиск методов и средств повышения качества и надежности бортовой радиоэлектронной аппаратуры (БРЭА). На значение характеристик надежности влияет множество параметров, одним из которых является значение температуры. Изменение температуры приводит к изменению не только показателей надежности, но и электрических, механических характеристик. Так как нарушение теплового режима в устройстве может быть вызвано наличием дефектов, то их можно выявлять по значению температуры. В связи с этим создание новых методов теплового диагностирования технологических дефектов является актуальной задачей. *Материалы и методы.* Метод теплового диагностирования основан на сравнении измеренных температур с множеством температур «базы неисправностей» – электронного справочника, который формируется заранее перед диагностированием при решении задач обеспечения тепловых режимов проектируемого БРЭА, включает принципы системного подхода, топологического моделирования и теории технической диагностики, а также учитывает особенности конструкторско-технологических решений, используемых разработчиками БРЭА. *Результаты.* Разработан метод теплового диагностирования латентных технологических дефектов радиоэлектронной аппаратуры, основанный на сравнении измеренных температур с множеством температур «базы неисправностей» – электронного справочника, который формируется заранее перед диагностированием при решении задач обеспечения тепловых режимов проектируемого БРЭА. Основной отличительной особенностью является использование моделирования тепловых процессов для накопления содержимого базы неисправностей вместо проведения экспериментов. Для проведения анализа была разработана тепловая диагностическая модель. *Выводы.* Предложенный метод теплового диагностирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов с длительным сроком активного существования по температурам его электрорадиоэлементов позволяет выявить явные и латентные дефекты БРЭА на основе взаимодействия диагностической модели со средствами теплового моделирования.

Ключевые слова: диагностирование, тепловая модель, латентный дефект, термограмма, радиоэлектронная аппаратура, тепловая модель.

S. U. Uvaisov, S. P. Suleymanov, N. K. Yurkov

METHOD OF THERMAL DIAGNOSING OF LATENT TECHNOLOGICAL DEFECTS OF RADIO-ELECTRONIC EQUIPMENT AND THERMAL DIAGNOSTIC MODEL THEREOF

¹ Статья подготовлена в рамках реализации НИР «Создание методологических основ обнаружения и локализации латентных технологических дефектов бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов методами неразрушающего контроля и диагностики на этапах производства» (ГК № 14.514.11.4078) в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007–2013 годы».

Abstract. *Background.* The scientists in Russia and abroad are continuously searching for ways and means to improve the quality and reliability of on-board radio electronics (BREA). The values of reliability characteristics are influenced by many parameters, one of which is temperature. The change in temperature causes the changes not only in reliability but also in electric and mechanical characteristics. Since the heat mode disturbance in the device may be caused by defects, they can be identified by the value of temperature. In this regard, the creation of new methods of diagnosing thermal technology defects is a topical task. *Materials and methods.* The method of thermal diagnosis is based on a comparison of the measured temperatures with plenty of temperatures from "the faults base" – electronic directory, which is formed in advance of the diagnosis in the course of solving the problems of thermal control of the projected BREA. It incorporates the principles of a systems approach, the theory of topological modeling and technical diagnostics, and takes into account the design technology solutions that are used by developers of BREA. *Results.* The authors developed a method of diagnosing latent thermal technological defects of electronic equipment based on comparison of the measured temperatures with plenty of temperatures from "the faults base" - electronic directory, which is formed in advance of the diagnosis in the course of solving the problems of thermal control of the projected BREA. The main distinguishing feature is the use of modeling of thermal processes for the accumulation of faults instead of the contents of the base of the experiments. For the analysis the researchers developed a thermal diagnostic model. *Conclusions.* The suggested method of thermal diagnostics of onboard radio electronic equipment for spacecrafts with long operating life by the temperatures its radio electronic elements allows revealing the overt and latent defects of BREA on the basis of interaction between the diagnostic model and the means of thermal simulation.

Key words: diagnosis, thermal model, latent defect, thermogram, electronic equipment, thermal model.

Введение

Для радиотехнических устройств характерно большое разнообразие дефектов. По мере возрастания сложности бортовой радиоэлектронной аппаратуры (БРЭА) космических аппаратов с длительным сроком активного существования функции диагностирования также значительно усложняются. Зачастую из-за трудоемкости и дороговизны диагностирования производители ограничиваются лишь контролем работоспособности и проверкой соответствия основных выходных характеристик БРЭА требованиям технического задания, что чревато пропуском в эксплуатацию несовершенных, потенциально ненадежных радиотехнических устройств.

При изготовлении БРЭА невозможно избежать появления технологических дефектов, которые не выявляются известными методами. Такие дефекты называют скрытыми (латентными). Их выявление контролем работоспособности сложно, что приводит к их пропуску. Сложности связаны с тем, что первое время на работу БРЭА латентные дефекты (ЛД) могут не влиять, а проявить себя спустя какое-то время, когда изделие уже находится в эксплуатации [1–3].

Метод теплового диагностирования

Метод теплового диагностирования БРЭА по температурам электрорадиоэлементов включает принципы системного подхода, топологического мо-

делирования и теории технической диагностики. Метод также учитывает особенности конструкторско-технологических решений, используемых разработчиками БРЭА.

Любое радиотехническое устройство (рис. 1), имея входные воздействия $X(t)$ с влиянием внешних факторов $Z(t)$, преобразует их в выход $Y(t)$. Преобразование осуществляется с помощью функции преобразования $f(X(t), q_i \in Q) = Y(t)$, где q_i – параметр устройства со своими верхним q_i^B и нижним q_i^H допусками из множества $Q_{\text{норм}}$ – электрических, геометрических, теплофизических, физических и других параметров, причем $q[Z(t)] = \text{var}$. Если параметр $q_i \notin [q_i^H, q_i^B]$, то БРЭА неисправно.

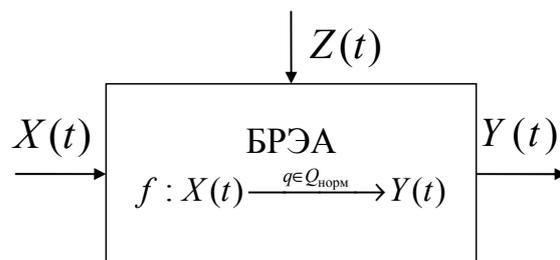


Рис. 1. Модель бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов с длительным сроком активного существования

Для выявления дефектов используются разнообразные методы диагностирования (электрический, функциональный, визуальный, рентгеноскопический и др.), но имеются такие производственные дефекты $Q_{\text{пр}}$, которые известными методами не выявляются. Эти дефекты, как правило, оказывают влияние на температуру элементов БРЭА, следовательно, их можно выявлять по значению температуры [4].

На рис. 2 приведена структурная схема метода теплового диагностирования БРЭА. Метод теплового диагностирования основан на сравнении измеренных температур с множеством температур «базы неисправностей» – электронного справочника, который формируется заранее перед диагностированием при решении задач обеспечения тепловых режимов проектируемого БРЭА. Судя по тому, какой термограмме справочника соответствует измеренная термограмма, ставится диагноз радиотехническому устройству.

Основной отличительной особенностью, которой обладает метод теплового диагностирования относительно других, – это использование моделирования тепловых процессов для накопления содержимого базы неисправностей вместо проведения экспериментов.

Список контрольных точек $G_{\text{КТ}}$ (рис. 2, блок 3) формируется исходя из требований по ограничению временных затрат на диагностирование $t_{\text{огр}}$, а также количества контрольных точек $n_{\text{КТ}}$. Для проектируемого БРЭА формируется свой список возможных дефектов $Q'_{\text{пр}}$, принадлежащих множеству $Q_{\text{пр}}$ (рис. 2, блок 5).

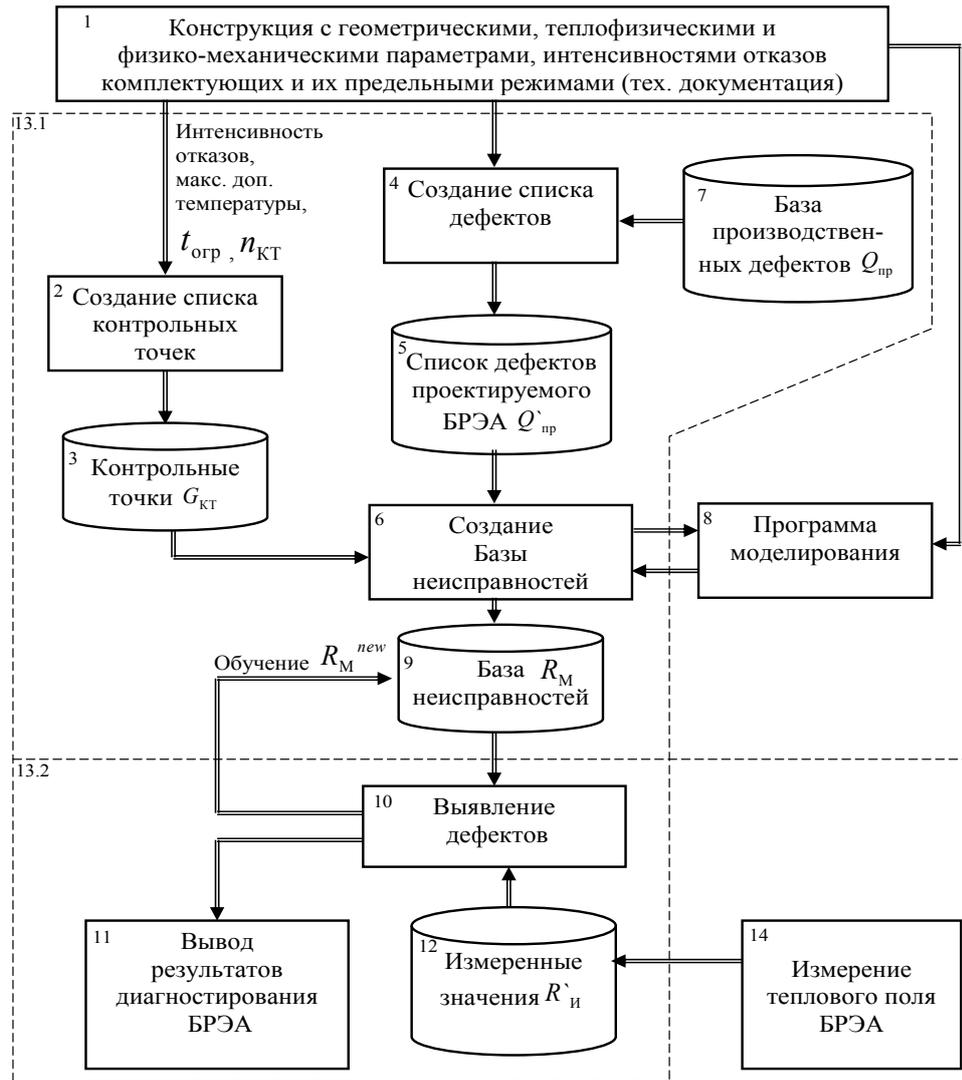


Рис. 2. Структурная схема теплового метода диагностирования БРЭА по температурным характеристикам

В методе теплового диагностирования важной задачей является проводимый анализ (рис. 2, блок 10) данных, так как от точности и эффективности анализа будет зависеть полученный результат, следовательно, и результат диагностирования. Для проведения анализа была разработана тепловая диагностическая модель [5, 6].

Тепловая диагностическая модель

Задача тепловой диагностической модели заключается в определении соответствия измеренной термограммы с одной из термограмм базы неисправностей или ее несоответствия [7, 8].

На входе тепловой диагностической модели (ТДМ) (рис. 3) – измеренная термограмма $R'_И$ диагностируемого БРЭА и база неисправностей

$R_M = (R_M^{\partial 1}, \dots, R_M^{\partial n}, R_M^{\text{норм}})$, состоящая из n термограмм, каждая из которых отражает производственный дефект с соответствующей $q_{\text{пр}} \in Q$.

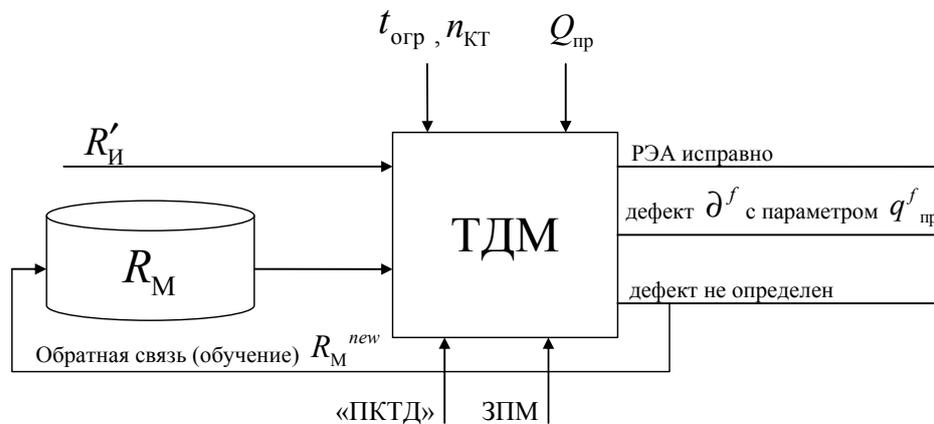


Рис. 3. Структурная схема взаимодействия диагностической модели со средствами теплового моделирования и измерения программного комплекса теплового диагностирования

Выделяют ограничения ТДМ на временные затраты $t_{\text{огр}}$ по диагностированию или по количеству используемых контрольных точек $n_{\text{КТ}}$. Ресурсами ТДМ является ЗПМ – заимствованная программа моделирования и ПКТД – программный комплекс теплового диагностирования подсистемы «АСОНИКА-Д». На выходе ТДМ может быть один из результатов диагноза:

- БРЭА исправно;
- наличие в БРЭА дефекта ∂^f с параметром $q^f_{\text{пр}}$;
- диагностируемое БРЭА неисправно, дефект не определен из-за отсутствия текущего случая в справочнике неисправностей R_M . В этом случае проводится обучение ТДМ путем внесения в R_M новой термограммы R_M^{new} .

На структуре ТДМ (рис. 4) показан процесс определения множества контрольных точек $G_{\text{КТ}} = (G_1 \dots G_B)$, которое представляет собой B контрольных точек и их соответствующие координаты.

В заданных контрольных точках $G_{\text{КТ}}$ определяются значения температур для всех термограмм базы неисправностей $R_M = (R_M^{\partial 1}, \dots, R_M^{\partial n}, R_M^{\text{норм}}) \Rightarrow T_M = (T_M^{\partial 1}, \dots, T_M^{\partial n}, T_M^{\text{норм}})$ и измеренные значения температур из экспериментальной термограммы $R'_И \Rightarrow T'_И$. В блоке 3 реализуется сравнение измеренных и накопленных при моделировании термограмм. Геометрической интерпретацией термограмм являются круговые диаграммы (рис. 5).

На диаграмме (рис. 5,а) с числом осей (лучей), равным числу контрольных точек измерения температур, откладываются значения рассчитанных температур.

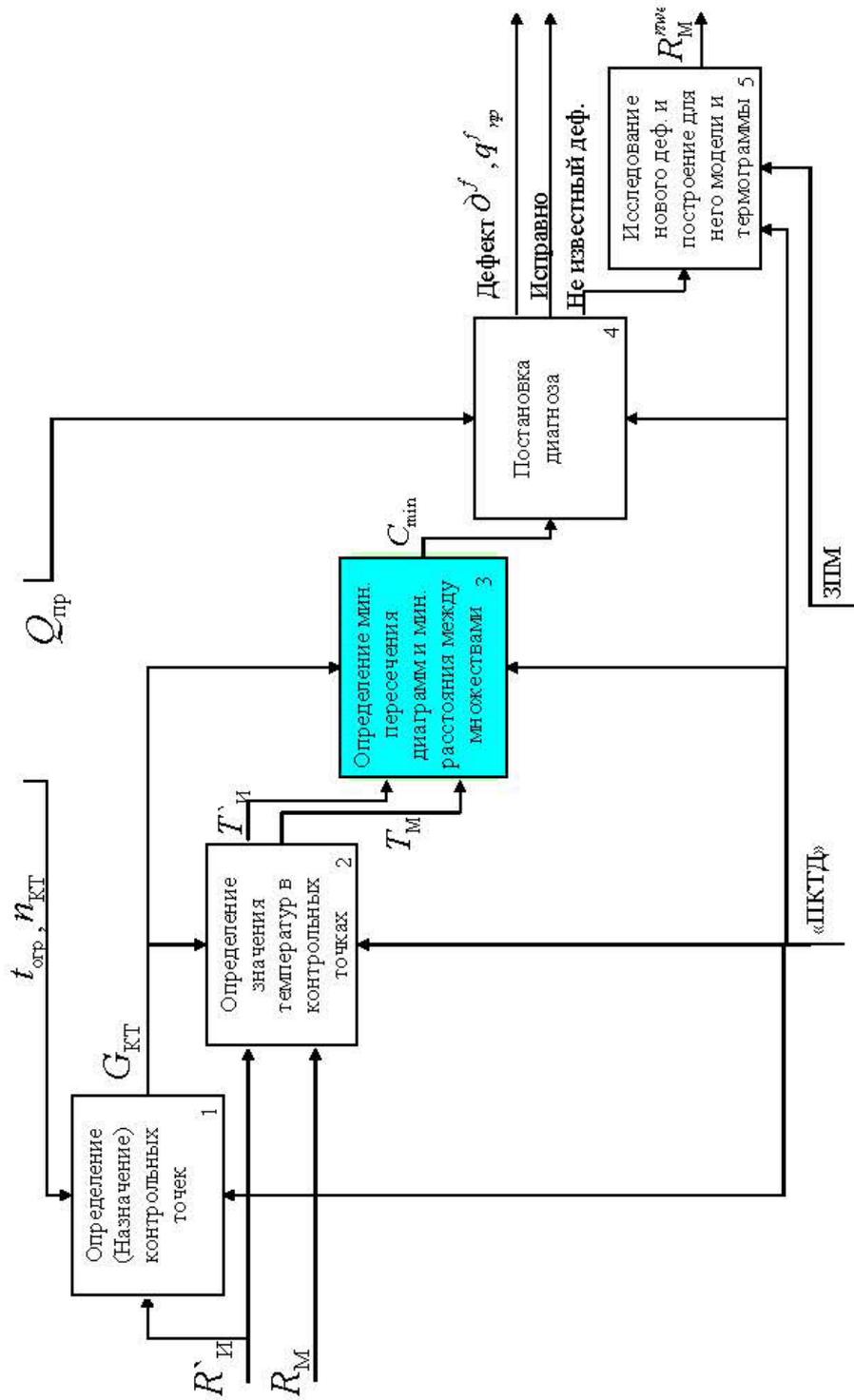


Рис. 4. Структура тепловой диагностической модели

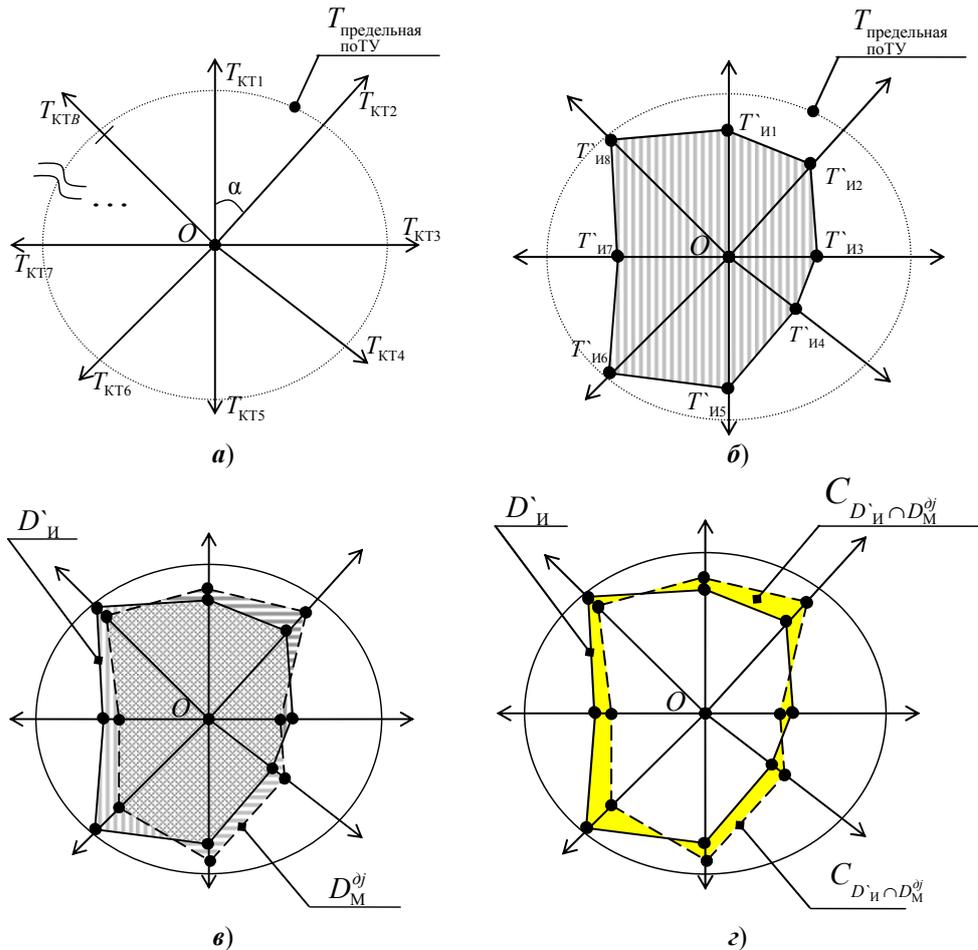


Рис. 5. Диаграммы формирования термограмм: *а* – круговая диаграмма, B – количество контрольных точек, $\alpha = 360/B$, $T_{КТ1}$ – ось первой контрольной точки; *б* – n -угольник измеренной термограммы, количество контрольных точек равно восьми; *в* – наложение n -угольника измеренной термограммы ($D'_И$) на n -угольника j моделированной термограммы (D_M^{dj}); *г* – разница площадей между n -угольником измеренной термограммы и n -угольником j моделированной термограммы

Расчетные температуры получаются тепловым моделированием устройства при всем многообразии возможных дефектов. Таким образом, формируется электронная база характерных неисправностей, геометрической интерпретацией которой является набор n -угольников (рис. 5, б).

Каждому n -угольнику соответствует тот или иной вид производственного дефекта [4].

Полученный в результате измерения в тех же контрольных точках n -угольник сравнивается с набором диаграмм из электронной базы.

По парным сравнениям измеренной диаграммы с расчетными диаграммами решается задача распознавания дефектного устройства по критерию $C_{D'_И \cap D_M^{dj}}$ минимальной разности площадей диаграмм (в, г).

В блоке 4 проводится анализ характеристик C_{\min} . В блоке 5 проводится исследование диагностируемого образца, нахождение соответствующего параметра или параметров $q_{\text{пр}}$, отражающих новый дефект. Далее проводится построение модели с новыми параметрами $q_{\text{пр}}^{\text{new}}$ и моделируется термограмма, которая добавляется в справочник неисправностей

Заключение

Таким образом, предложенный метод теплового диагностирования бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов с длительным сроком активного существования по температурам его ЭРЭ позволяет выявить явные и латентные дефекты БРЭА на основе взаимодействия диагностической модели со средствами теплового моделирования.

Список литературы

1. Сулейманов, С. П. Тепловой метод диагностирования радиоэлектронных средств / С. П. Сулейманов, Н. М. Чернов, А. А. Подкопаев, А. В. Долматов // Системные проблемы качества, математического моделирования, информационных, электронных и лазерных технологий : сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. и Рос. науч. шк. – М. : ГНПО «Агат», 2001. – Ч. 2. – С. 36–43.
2. Сулейманов, С. П. Характерные дефекты печатных узлов, приводящие к нарушению тепловых режимов комплектующих элементов / С. П. Сулейманов, А. В. Долматов, С. У. Увайсов // Информационные технологии в проектировании, производстве и образовании : сб. тр. Рос. науч.-техн. конф. – Ковров : Изд-во КГТА, 2002. – С. 84–90.
3. Сулейманов, С. П. Теплое диагностирование радиоэлектронных устройств / С. П. Сулейманов, А. В. Долматов, С. У. Увайсов // Радиовысотометрия–2004 : тр. Первой Всерос. науч. конф. / под ред. А. А. Иофина, Л. И. Пономарева. – Екатеринбург : Изд-во АМБ, 2004. – С. 55–59.
4. Юрков, Н. К. Использование метода интерполяции при обработке экспериментальных характеристик / Н. К. Юрков, С. А. Бростилов, Д. А. Голушко, С. У. Увайсов // Испытания–2011 : сб. материалов науч.-техн. конф. в рамках Всерос. науч. школы «Методики, техника и аппаратура внешних испытаний» / под ред. проф. Т. И. Мурашкиной. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2011. – С. 79–82.
5. Юрков, Н. К. Результаты разработки тепловой модели датчика линейных перемещений / Н. К. Юрков, А. А. Трофимов, Д. А. Скаморин // Надежность и качество : тр. Междунар. симпоз. : в 2-х т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Инф.-изд. центр ПГУ, 2007. – Т. 1. – С. 371–373.
6. Программный комплекс по расчету нестационарных тепловых полей радиоэлементов (информационная карта) / А. В. Авдеев, В. Б. Алмаметов, Г. В. Таньков, А. В. Затылкин, Н. К. Юрков // Свидетельство о регистрации электронного ресурса № 15814 от 07.06.2010, Инв. номер ВНИЦ № 50201000987 от 16.06.2010.
7. Юрков, Н. К. Информационно-измерительный лабораторный комплекс исследования теплоотводов электрорадиоэлементов / Н. К. Юрков, Н. В. Горячев, А. В. Лысенко, И. Д. Граб // Надежность и качество : тр. Междунар. симпоз. : в 2-х т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – Т. 2. – С. 239–241.
8. Юрков, Н. К. Программа инженерного расчета температуры перегрева кристалла электрорадиокомпонента и его теплоотвода / Н. К. Юрков, Н. В. Горячев, А. В. Лысенко, И. Д. Граб // Надежность и качество : тр. Междунар. симпоз. : в 2-х т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – Т. 1. – С. 340–341.

References

1. Suleymanov S. P., Chernov N. M., Podkopaev A. A., Dolmatov A. V. *Sistemnye problemy kachestva, matematicheskogo modelirovaniya, informatsionnykh, elektronnykh i lazernykh tekhnologiy: sb. tr. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. i Ros. nauch. shk.* [System problems of quality, mathematical modeling, information, electronic and laser technologies: proceedings of the International scientific and technical conference and the Russian scientific school]. Moscow: GNPO "Agat", 2001, part 2, pp. 36–43.
2. Suleymanov S. P., Dolmatov A. V., Uvaysov S. U. *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii, proizvodstve i obrazovanii: sb. tr. Ros. nauch.-tekhn. konf.* [Information technologies in design, production and education: proceedings of the Russian scientific and technical conference]. Kovrov: Izd-vo KGTA, 2002, pp. 84–90.
3. Suleymanov S. P., Dolmatov A. V., Uvaysov S. U. *Radiovysotometriya–2004: tr. Per-voy Vseros. nauch. konf.* [Radio altimetry – 2004: proceedings of the First All-Russian scientific conference]. Ekaterinburg: Izd-vo AMB, 2004, pp. 55–59.
4. Yurkov N. K., Brostilov S. A., Golushko D. A., Uvaysov S. U. *Ispytaniya–2011: sb. materialov nauch.-tekhn. konf. v ramkakh Vseros. nauch. shkoly «Metodiki, tekhnika i apparatura vneshnikh ispytaniy»* [Testing – 2011: proceedings of the Scientific and technical conferences in the framework of the Russian scientific school "Methods, technology and equipment of external testing"]. Penza: Izd-vo PGU, 2011, pp. 79–82.
5. Yurkov N. K., Trofimov A. A., Skamorin D. A. *Nadezhnost' i kachestvo: tr. Mezhdunar. simpoz.: v 2-kh t.* [Reliability and quality: proceedings of the International symposium: in 2 volumes]. Penza: Inf.-izd. tsentr PGU, 2007, vol. 1, pp. 371–373.
6. Avdeev A. V., Almametov V. B., Tan'kov G. V., Zatylnkin A. V., Yurkov N. K. *Svidetel'stvo o registratsii elektronnoho resursa* [Certificate of the electronic resource registration]. No. 15814, 07.06.2010, *Inv.nomer VNTITs* [Inventory number]. No. 50201000987, 16.06.2010.
7. Yurkov N. K., Goryachev N. V., Lysenko A. V., Grab I. D. *Nadezhnost' i kachestvo: tr. Mezhdunar. simpoz.: v 2-kh t.* [Reliability and quality: proceedings of the International symposium: in 2 volumes]. Penza: Izd-vo PGU, 2012, vol. 2, pp. 239–241.
8. Yurkov N. K., Goryachev N. V., Lysenko A. V., Grab I. D. *Nadezhnost' i kachestvo: tr. Mezhdunar. simpoz.: v 2-kh t.* [Reliability and quality: proceedings of the International symposium: in 2 volumes]. Penza: Izd-vo PGU, 2012, vol. 1, pp. 340–341.

Увайсов Сайгид Увайсович

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой радиоэлектроники
и телекоммуникаций, Московский
институт электроники и математики,
Национальный исследовательский
университет «Высшая школа экономики»
(Россия, г. Москва, ул. Мясницкая, 20)

E-mail: s.uvaysov@hse.ru

Uvaysov Saygid Uvaysovich

Doctor of engineering sciences, professor,
head of sub-department of radio electronics
and remote control, Moscow Institute
of Electronics and Mathematics
of the National Research University
"Higher School of Economy"
(20 Myasnitskaya, Moscow, Russia)

Сулейманов Сергей Павлович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра радиоэлектроники
и телекоммуникаций, Московский
институт электроники и математики,
Национальный исследовательский
университет «Высшая школа экономики»
(Россия, г. Москва, ул. Мясницкая, 20)

E-mail: fdp@hse.ru

Suleymanov Sergey Pavlovich

Candidate of engineering sciences, associate
professor, sub-department of radio
electronics and remote control, Moscow
Institute of Electronics and Mathematics
of the National Research University
"Higher School of Economy"
(20 Myasnitskaya, Moscow, Russia)

Юрков Николай Кондратьевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: yurkov_nk@mail.ru

Yurkov Nikolay Kondrat'evich

Doctor of engineering sciences, professor,
head of sub-department of radio equipment
design and production, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

УДК 517.354.62

Увайсов, С. У.

Метод теплового диагностирования латентных технологических дефектов радиоэлектронной аппаратуры и ее тепловая диагностическая модель / С. У. Увайсов, С. П. Сулейманов, Н. К. Юрков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 4 (28). – С. 109–118.

О. В. Абросимова, А. Ю. Тычков, П. П. Чураков

РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА РЕГИСТРАЦИИ АРТЕРИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАНЖЕТЫ С АВТОМАТИЧЕСКИМ ЗАПЯСТНЫМ КОНТУРОМ

Аннотация. *Актуальность и цели.* Предметом настоящего исследования являются информационно-измерительные устройства регистрации артериального давления, способные повысить быстродействие и точность измерения артериального давления посредством применения новых методов и модулей устройств. *Материалы и методы.* В работе предложена новая схема реализации информационно-измерительного устройства регистрации артериального давления с использованием манжеты с автоматическим запястным контуром, способного повысить оперативность и эффективность регистрации артериального давления, в том числе в условиях свободной двигательной активности пациента. *Результаты.* Проведены экспериментальные исследования работы устройства и доказана перспективность его реализации в медицинских учреждениях различного профиля. Разработанное информационно-измерительное устройство регистрации артериального давления может применяться в медицинских учреждениях в качестве самостоятельного устройства и в комплексе, осуществляющем полный контроль и диагностику состояния пациента. *Выводы.* В ходе выполнения работы и проведения эксперимента выявлено новое решение реализации информационно-измерительных устройств регистрации артериального давления, позволяющее эффективным образом оценивать и анализировать уровень точности, надежности и стабильности воспроизводимых результатов измерений.

Ключевые слова: информационно-измерительное устройство регистрации артериального давления, манжета с автоматическим запястным контуром, система обработки информации.

О. В. Abrosimova, A. Yu. Tychkov, P. P. Churakov

DEVELOPMENT OF AN INFORMATION-MEASURING DEVICE OF BLOOD PRESSURE REGISTRATION USING CUFFS WITH AUTOMATIC CARPAL CIRCUIT

Abstract. *Background.* The subject of this research is the information-measuring devices registering blood pressure, capable of improving the speed and accuracy of blood pressure measurement due to application of new techniques and devices' modules. *Materials and methods.* The authors suggest a new scheme of implementation of the information-measuring device of blood pressure registration using the cuffs with automatic carpal circuits capable of improving the speed and efficiency of registration of blood pressure, including the conditions of free moving activity of a patient. *Results.* The researchers conducted experimental studies of the device and proved the perspectives of its implementation in medical institutions in various fields. The developed information-measuring device of blood pressure registration can be applied in health care institutions, as an independent unit and in the complex realizing complete monitoring and diagnosis of a patient. *Conclusions.* In the course of works and the experiment the authors found a new solution of implementation of the information-measuring devices of blood pressure registration, allowing effective as-

assessment and analysis of the level of accuracy, reliability and stability reproducible measurement results.

Key words: information-measuring device of blood pressure registration, cuff with automatic carpal circuit, system of information processing.

Введение

Быстрые темпы развития электроники, средств персональной связи, вычислительной техники, пассивных детекторов физиологического состояния, а также активных средств самолечения способствуют развитию информационно-измерительных устройств контроля состояния здоровья [1].

Одно из важных направлений развития устройств регистрации физиологических сигналов является изменение подхода к обеспечению здоровья путем проведения мониторинга человеком собственной физиологии и измерение важнейших показателей жизнедеятельности.

Среди важнейших показателей состояния здоровья наиболее значимым остается артериальное кровяное давление человека (АД). АД – величина, показывающая значение силы и давления крови в сердце [2].

Известно, что работа информационно-измерительных устройств регистрации АД протекает в 4 этапа (рис. 1) [2]. Перед подачей воздуха в манжету срабатывает звуковой сигнализатор и выполняется закачка воздуха в манжету до момента возникновения акустических колебаний. При этом давление в артерии становится немного выше давления в манжете (рис. 1, этап 2). Последующее снижение давления в манжете приводит к усилению потока крови через сжатый участок артерии. При усилении колебаний стенки артерии звуки становятся громче и добавляются шумы и артефакты, обусловленные вихревым движением крови. Дальнейшее снижение давления в манжете и уменьшение степени сужения артерии приводит к исчезновению шумов. На третьем этапе измерения АД осуществляется постепенное ступенчатое стравливание воздуха в манжете до момента нарастания звуковых явлений. В эту фазу давление остается выше диастолического. На этом этапе определяется систолическое АД. Когда давление в манжете становится равным диастолическому, препятствия для кровотока прекращаются. Таким образом, на четвертом этапе определяется значение диастолического АД.

Из описанного процесса работы информационно-измерительных устройств регистрации АД следует, что эффективность их работы зависит от технико-метрологических характеристик, отвечающих за взаимосвязь субъекта и объекта измерения, и наилучшего варианта аппаратной конфигурации.

Цели данной работы: проведение критического анализа работы известных информационно-измерительных устройств регистрации АД; разработка новой схемы реализации устройства с использованием манжеты с автоматическим запястным контуром; проведение экспериментальных исследований их работы.

1. Аналитический обзор известных устройств регистрации АД

Современные устройства измерения АД используются для контроля и диагностики состояния человека в медицинских или спортивных целях или для предупреждения о физических или эмоциональных перегрузках организма человека в различных условиях его жизнедеятельности.

На сегодня существует большое количество разнообразных устройств, позволяющих проводить регистрацию АД.

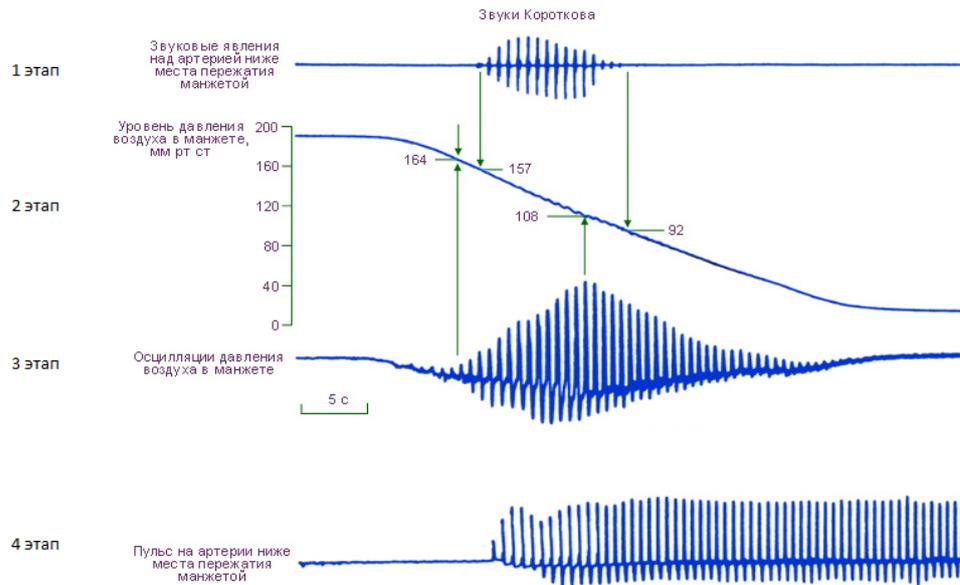


Рис. 1. Этапы измерения артериального давления

Известно устройство измерения АД [3], структурная схема которого приведена на рис. 2.

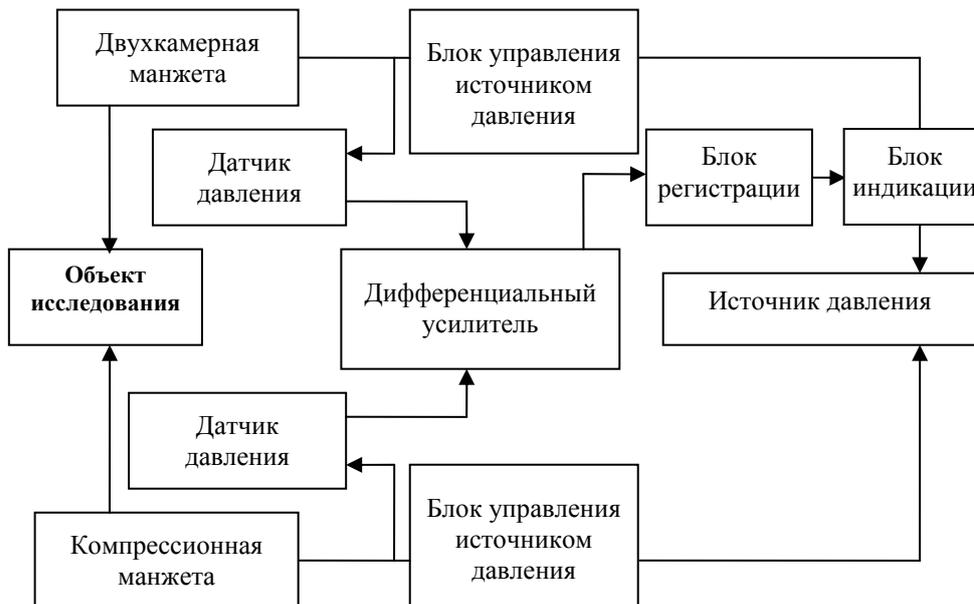


Рис. 2. Структурная схема аналога

Устройство включает в себя двухкамерную и компрессионную манжеты, выходы которых напрямую связаны со входами датчиков давления, под-

ключенными выходами к источнику давления. Выходы датчиков давления связаны со входами дифференциального усилителя, выход которого соединен через блок регистрации с блоком индикации. Источник давления пульса содержит резервуар с заданным объемом жидкости и грушу для подачи давления.

Авторы предлагаемого устройства [3], доказывают высокую точность измерения артериального давления за счет:

- оценки максимальных амплитуд осцилляции и фиксации значения давления, соответствующего наступлению момента декомпрессии и зависимости вычисления систолического и диастолического давлений от алгоритма обработки сигналов;

- исключения искажения характера регистрации колебаний поверхности манжеты и показаний датчика давления, обусловленного сжимаемостью жидкости, и искажения передачи значения давления на датчик;

- ликвидации шумов, вызываемых работой сердца, легких, движением суставов и внешних акустических шумов.

Основными недостатками данного устройства являются:

- использование в качестве компрессорной манжеты рабочего тела, наполненного жидкостью (водой). Данный недостаток связан с отсутствием полностью сформулированных химико-биологических требований использования жидкости в качестве наполнителя манжеты;

- использование резервуара с водой, который увеличивает габаритные размеры устройства, его массу и ухудшает потребительские свойства;

- сложность реализации устройства, заключающаяся в полном обездвижении объекта обследования, большие погрешности измерений.

Структурная схема другого устройства, нашедшего широкое применение для измерения АД [4], приведена на рис. 3.



Рис. 3. Структурная схема прототипа

Манжета, содержащая воздушный мешок, с помощью резиновых трубок соединена с входами датчика давления, насоса и клапана. Выход датчика давления соединен с колебательным контуром. Выход насоса связан с цепью привода насоса, а выход клапана – с клапаном управляющей схемы. Колебательный контур, цепь привода насоса и клапан управляющей схемы напрямую связаны с микроконтроллером. К соответствующим выходам микроконтроллера подключены таймер, блок индикации (дисплей), запоминающее

устройство и консоль, связанные с блоком питания. Блок питания также подключен к одному из выходов микроконтроллера.

После установления манжеты на руке пациента, включения монитора артериального давления переключатель блока управления устанавливают в режим измерения и начинают измерение. Далее производят нагнетание воздуха в манжету с помощью встроенного в устройство насоса, который управляется по цепи привода. Затем постепенно, ступенчато давление стравливают, используя клапан, контролируемый управляющей схемой клапана, в результате чего определяются систолическое и диастолическое давление. При этом колебания пульсовой волны и изменение давления в манжете фиксируют с помощью датчика давления со встроенным колебательным контуром, информация с которого поступает на микроконтроллер (компрессор), а затем отображается на дисплее и передается на запоминающее устройство.

Устройство измерения АД содержит таймер времени, подключенный к одному из выводов микроконтроллера, с помощью которого легко контролировать время процесса измерения [4].

Недостатками данного устройства являются:

–используемая манжета с воздушным мешком, не позволяющая «адаптироваться» под индивидуальные особенности руки пациента, что может вызывать неудобства при ее эксплуатации;

–отсутствие звукового сигнализатора, позволяющего отслеживать критические (аварийные) состояния работы устройства, сигнализировать о начале и конце процесса измерения, а также осуществлять контроль за критическими состояниями пациентов при измерении давления и вовремя сигнализировать об возникающих опасностях окружающим людям;

–отсутствие портов для подключения внешних периферийных устройств (Flash-памяти, USB-порта для соединения с ПК, печатающего устройства), обеспечивающих долгосрочное хранение и обработку полученных результатов измерений и иной информации, а также возможности ее передачи на другие устройства или носители информации;

–невозможность беспроводной передачи данных и информации на внешние периферийные устройства;

–отсутствие внешнего источника питания, обеспечивающего бесперебойную работу устройства.

2. Разработка устройства измерения АД с использованием манжеты с автоматическим запястным контуром

Задача, стоящая перед изобретателями, заключается в разработке многофункционального устройства, использующего при работе манжету с автоматическим запястным контуром и позволяющего преодолеть указанные выше недостатки.

Идея авторов основана на предложении наиболее оптимальной структурной схемы устройства измерения АД (рис. 4) с использованием манжеты с автоматическим запястным контуром.

Устройство измерения АД включает в себя манжету с автоматическим запястным контуром, датчик давления, миниатюрный электронасос с клапаном, микроконтроллер, а также встроенный звуковой сигнализатор. Вход манжеты связан с миниатюрным электронасосом и клапаном, входы которых

подключены к одному из выводов микроконтроллера, а выход – с датчиком давления, выход которого соединен с выводом микроконтроллера. К микроконтроллеру также подключен встроенный звуковой сигнализатор, дисплей и клавиатура.

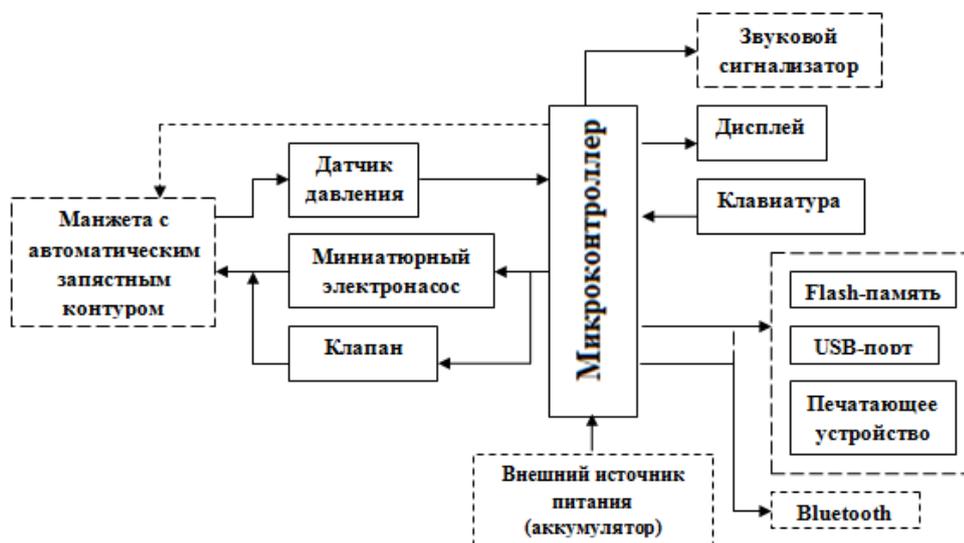


Рис. 4. Структурная схема предлагаемого устройства

Работа устройства осуществляется следующим образом. С помощью клавиатуры, встроенной или подключенной непосредственно к устройству, вносят во внутреннюю память всю требующуюся информацию о пациенте (например: ФИО, пол, возраст, заболевание и т.п.), которая одновременно будет отображаться на цифровом дисплее прибора.

Далее проводят процесс измерения АД с нажатия кнопки на блоке управления, отвечающей за начало измерения артериального давления («Измерение»), и затем осуществляется накачка воздуха в манжету с помощью электронасоса до достижения в ней давления, выше измеряемого систолического давления (согласно методу Короткова). Затем с помощью клапана оно автоматически регулируется таким образом, чтобы максимально точно определить систолическое (с момента появления первых акустических колебаний после постепенного стравливания воздуха в манжете) и диастолическое артериальное давление (после исчезновения колебаний и пульсаций) (3 и 4 фаза по Короткову). Процесс измерения заканчивают, как только манжета снова станет пустой и сработает звуковой сигнализатор.

Для количественной оценки величины АД предложено использовать величину среднеарифметического значения АД [2], определяемую по формуле

$$AD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i, \tag{1}$$

где АД – значение давления; P_i – значение давления при i -м измерении; N – общее число измерений.

Среднее арифметическое значение динамически изменяющихся величин дает объективную оценку среднего по времени или среднеинтегрального значения только при одинаковых интервалах между измерениями. С учетом этого в последнее время в ряде программ обработки стали использовать [2] модификацию приведенной формулы для учета разности в интервалах между измерениями АД:

$$АД = \frac{\sum_{i=1}^N P_i \Delta t_i}{\sum_{i=1}^N \Delta t_i} . \quad (2)$$

Манжета с автоматическим запястным контуром, используемая в устройстве, «адаптируется» под руку пациента, что позволяет осуществлять равномерное накачивание и стравливание воздуха в ней, тем самым обеспечивается высокая точность и надежность проводимых измерений артериального давления, а также обеспечивается комфортное и безопасное использование ее пациентами при эксплуатации.

Впервые применяемая манжета с автоматическим запястным контуром обладает рядом преимуществ, что позволяет обеспечивать:

- высокую точность подбора и определения диаметра манжеты по индивидуальным особенностям строения и размера руки для каждого пользователя;
- высокую точностью быстрого и правильного наложение манжеты на руку пациента (поверхностный материала и/или конусообразная форма воздушных мешков);
- плотное прилегание манжеты к руке пациента (преимущественно конусообразная форма воздушных мешков);
- повышенную скорость и высокую точность измерения с более комфортными условиями измерения АД пациентам.

Накачка и откачка воздуха в манжету производится через резиновые соединительные трубки или другие специальные встроенные в прибор средства.

Все пульсации и изменения давления фиксирует датчик давления, являющийся первичным преобразователем, информация с которого уже непосредственно поступает на микроконтроллер и затем отображается на цифровом дисплее. Полученную информацию можно также записать на Flash-память, передать на ПК посредством USB-порта и сделать распечатку результата на печатающее устройство.

Устройство оснащено звуковым сигнализатором, который позволяет контролировать критические (аварийные) состояния работы устройства, сигнализирует о начале и конце процесса измерения.

За счет встроенного звукового гида (речевой «навигатор») устройство позволяет упростить работу с ним при самостоятельной эксплуатации и делает его доступным для пациентов с ограниченными возможностями (слабовидящих). Также звуковая сигнализация дает дополнительную возможность диагностики и контроля за критическими состояниями здоровья пациентов, что позволяет обезопасить их от различных несчастных случаев и вовремя про-

информировать о возникающей опасности окружающих людей или специалиста (врача).

Встроенная память устройства позволяет запоминать и хранить данные о нескольких последовательно проведенных измерениях и высчитанном среднем нормальном давлении пациента, причем при последующих измерениях давления и изменении его значений в худшую сторону устройство посредством звукового сигнализатора оповещает об опасности, угрожающей состоянию здоровья пациента.

Разработанное информационно-измерительное устройство регистрации артериального давления может применяться в медицинских учреждениях, в качестве самостоятельного устройства и в комплексе, осуществляющем полный контроль и диагностику состояния пациента.

Заключение

Таким образом, в ходе проведенных исследований и в процессе разработки нового конструктивного решения устройства были достигнуты следующие результаты:

– в качестве **научного результата** можно принять разработанную структурную схему устройства регистрации АД с использованием манжеты с автоматическим запястным контуром, позволяющую при практической реализации повысить быстродействие и точность работы устройств регистрации артериального давления;

– **практический результат** позволяет оценивать и анализировать уровень точности, надежности и стабильности воспроизводимых результатов измерений АД за счет применения манжеты с автоматическим запястным контуром.

Приведенные результаты работы доказывают высокую степень достоверности работы информационно-измерительных устройств регистрации информации о состоянии исследуемого объекта.

Список литературы

1. **Абросимова, О. В.** Устройство регистрации артериального давления с использованием манжеты с автоматическим запястным контуром / О. В. Абросимова, А. Ю. Тычков, П. П. Чураков // Перспективные информационные технологии ПИТ – 2013 : сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. – Самара : Изд-во СГАУ, 2013. – С. 56–58.
2. **Иванов, С. Ю.** Точность измерения артериального давления по тонам Короткова / С. Ю. Иванов, Н. И. Лившиц // Вестник аритмологии. – 2005. – № 40. – С. 45–62.
3. Патент РФ № 104437. Тонометр Геращенко / Геращенко М. С. – 20.05.2011.
4. Патент США № 7699786. Электронный монитор артериального давления / Кохи Такеока, Джим Июнь Ли. – 20.04.2010.

References

1. Abrosimova O. V., Tychkov A. Yu., Churakov P. P. *Perspektivnye informatsionnye tekhnologii PIT – 2013: sb. tr. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Perspective information technologies PIT – 2013: proceedings of the International scientific and technical conference]. Samara: Izd-vo SGAU, 2013, pp. 56–58.
2. Ivanov S. Yu., Livshits N. I. *Vestnik aritmologii* [Bulletin of arrhythmology]. 2005, no. 40, pp. 45–62.

3. Patent RF № 104437. Gerashchenko tonometer. Gerashchenko M. S. 20.05.2011.
4. Patent USA № 7699786. Electronic monitor of arterial pressure. Kokhi Takeoka, Dzhim Iyun' Li. 20.04.2010.

Абросимова Олеся Валерьевна

студент, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: Lesia10.09.1992@mail.ru

Abrosimova Olesya Valer'evna

Student, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Тычков Александр Юрьевич

кандидат технических наук, доцент, кафедра информационно-измерительной техники, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: tychkov-a@mail.ru

Tychkov Aleksandr Yur'evich

Candidate of engineering sciences, associate professor, sub-department of information-measuring technology, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Чураков Петр Павлович

доктор технических наук, профессор, кафедра информационно-измерительной техники, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: iit@pnzgu.ru

Churakov Petr Pavlovich

Doctor of engineering sciences, professor, sub-department of information-measuring technology, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 621.3.087.47

Абросимова, О. В.

Разработка информационно-измерительного устройства регистрации артериального давления с использованием манжеты с автоматическим запястным контуром / О. В. Абросимова, А. Ю. Тычков, П. П. Чураков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 4 (28). – С. 119–127.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 662.753; 377.3.630.1

М. Я. Кордон, В. М. Ананьев, Н. Н. Вершинин, А. А. Заонегин

МЕТОД КОМПЛЕКСНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ПРЯМОГО ОКИСЛЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ КИСЛОРОДОМ ВОЗДУХА

Аннотация. *Актуальность и цели.* Потребность в создании малотоннажных установок для получения метанола, отвечающего требованиям технического, технологического, экологического и экономического характера с учетом современного уровня теоретических исследований и практических результатов, ряд вопросов технологического характера требуют дополнительных исследований, направленных на совершенствование технологического процесса окисления метаносодержащих газов кислородом воздуха. Целью работы является разработка и обоснование возможности применения методики гармоничного состояния системы, соответствующей классической «золотой пропорции», на основе системного анализа технологического процесса. *Материалы и методы.* Метод комплексной оптимизации процесса прямого окисления углеводородов кислородом воздуха основан на применении свойств «золотой» геометрической прогрессии и «золотой пропорции» чисел ряда Фибоначчи путем представления геометрических характеристик реактора и параметров технологического процесса в виде комплексов (симплексов) иерархической структуры, обладающей динамической симметрией, которой свойственно увеличение или уменьшение симплексов, выраженных «золотой пропорцией». *Результаты.* Проверка теоретической разработки проводилась на реакторе, геометрические характеристики которого соответствовали «золотой пропорции». В качестве рабочей смеси использовался метан и воздух. Давление в реакторе составляло 5 МПа, а температура в зоне реакции 450 °С. Максимальный выход метанола 669 г/м³ получен за счет пропущенного через реактор метана при составе смеси $\frac{\overline{\text{CH}_4}}{\text{O}_2}$ в об. %, равном 0,397, что не-

значительно отличается от «золотой пропорции», равной 0,382. Отношение давления и температуры соответствует оптимальным значениям.

Ключевые слова: «золотая пропорция», метан (метанол), селективность, реактор, «гармония математики», конверсия.

M. Ya. Kordon, V. M. Anan'ev, N. N. Vershinin, A. A. Zaonegin

METHOD OF COMPLEX OPTIMIZATION OF THE PROCESS OF DIRECT OXIDATION OF HYDROCARBONS BY ATMOSPHERIC OXYGEN

Abstract. *Background.* Need for creation of low-tonnage installations for receiving the methanol which is meeting technical, technological, ecological and economic

requirements taking into account the modern level of theoretical research and practical results, a number of technological problems demand additional research directed towards the improvement of technological process of oxidation of methane-containing gases by atmospheric oxygen. The purpose of the work is to develop and justify the possibility of application of the technique of harmonious condition of the system corresponding to the classical "gold proportion", on the basis of the system analysis of the technological process. *Materials and methods.* The method of complex optimization of process of direct oxidation of hydrocarbons by atmospheric oxygen is based on the use of properties of a "gold" geometrical progression and "a gold proportion" numbers of Fibonacci series by submission of geometrical characteristics of the reactor and parameters of the technological process in the form of complexes (simplexes) of hierarchical structure possessing dynamic symmetry which pertain the increase or reduction simplexes, expressed by "a gold proportion". *Results.* Checking of theoretical development was carried out on the reactor which geometrical characteristics corresponded to "a gold proportion". Methane and air were used as a working mix. Pressure in the reactor was 5 MPa, and temperature in a zone of reaction – 450 °C. The maximum exit of methanol of 669 g/m³ was obtained as the methane passed through the methanol reactor with $\frac{\overline{\text{CH}_4}}{\overline{\text{O}_2}}$ structure, with % of 0,397, that slightly differs from "a gold proportion" equaling to 0,382. The relations of pressure and temperature correspond to optimum values.

Key words: "Golden proportion", methane (methanol), selectivity, reactor, harmony of mathematics, conversion.

Введение

В настоящее время рядом российских и зарубежных ученых проведены глубокие исследования физико-химических процессов, протекающих в реакторе окисления углеводородов кислородом, в том числе и кислородом воздуха.

При решении такой задачи возникают определенные трудности даже при наличии исчерпывающих сведений об условиях протекания физико-химических процессов и условий функционирования технологической системы.

Это подтверждает принципиальную возможность и необходимость системного комплексного подхода к решению задачи оптимизации, в частности, технологии окисления углеводородов (метана) кислородом воздуха.

Эффективность оптимизации процесса прямого окисления метана кислородом воздуха связана с математической сложностью рассматриваемой задачи и соответствием математической модели возможной точности конечных результатов.

Причем такая модель в целом может стать настолько сложной и громоздкой, что потребует неоправданно больших затрат машинного времени. Предлагаемый метод комплексной оптимизации позволяет на стадии проектирования существенно сократить математические операции расчета параметров и характеристик реактора, обеспечивающих оптимальный режим функционирования технологического процесса окисления метана кислородом воздуха, а также упростить процедуру планирования и проведения экспериментов, которые в любом случае необходимы для подтверждения достоверности результатов исследования.

1. Актуальность и цель решаемой задачи

На протяжении многих лет ряд авторов [1–9] указывал на потенциальную возможность получения метанола путем прямого окисления метана и его гомологов кислородом воздуха.

Возврат к этой технологии обусловлен необходимостью решения ряда проблем технического, технологического, экономического и экологического характера, основные из которых связаны с условиями добычи газообразных и жидких углеводородов, их переработкой и доставкой потребителям, а также с совершенствованием процессов оптимизации технологической системы окисления углеводородов кислородом воздуха.

Во-первых, необходимость решения проблемы заключается в том, что основная добыча газообразных и жидких углеводородов существенно перемещается в отдаленные регионы с суровыми климатическими условиями, где экологически наиболее выгодно и экономически целесообразно получение метанола прямым окислением метана кислородом воздуха.

Во-вторых, перспективы и особенности практического применения прямого окисления углеводородов, по данным В. С. Арутюнова [1], обладают неоспоримым преимуществом с позиции технологической простоты, а также «...возможности высокой степени автоматизации и эффективного использования источников углеводородных газов практически любого состава и объема», что подтверждается результатами, полученными опытным путем.

В-третьих, несмотря на большой вклад российских и зарубежных ученых в разработку процессов прямого окисления метана кислородом воздуха, ряд вопросов, связанных с «нелинейным характером процесса окисления, в том числе и температурный гистерезис скорости реакции, требуют дальнейшего глубокого изучения» [1].

В-четвертых, при определенных условиях протекания разветвленно-цепной реакции в реакторе появляется возможность создания стационарного технологического процесса. В работе [1] показано, что повышение давления переводит реакцию из медленного цепного в значительно быстрый, но тем не менее почти стационарный разветвленно-цепной режим.

Для решения этих вопросов необходимо проведение экспериментальных исследований с минимальными техническими и экономическими затратами.

Целью исследования является разработка комплексной оптимизации процесса прямого окисления метана кислородом воздуха на основе системного анализа известных теоретических и экспериментальных работ и «закона структурной гармонии системы» [10, 11], путем установления связей между натуральными числовыми соотношениями геометрических, технологических и параметрических компонент, соответствующих гармонии всей системы и «золотого сечения» компонент в виде иррациональных чисел Фибоначчи – Люка, на основе следующих соотношений золотой p -пропорции, обладающей свойствами:

– мультипликативным свойством, выраженным в виде

$$\Phi_p^n = \Phi_p \times \Phi_p^{n-1}; \quad (1)$$

– аддитивным свойством:

$$\Phi_p^n = \Phi_p^{n-1} + \Phi_p^{n-p-1}, \quad (2)$$

где $n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$; $p = 0; 1; 2; 3$; Φ_p – золотая p -пропорция; $p = 1$ соответствует обобщенному золотому сечению.

«Гармония технологических систем представляет соразмерность частей и целого, слияние различных компонентов объекта в единое органическое целое» [12].

Применение методологии гармонии технологических систем и классической «золотой» пропорции характеристик и параметров представляет возможность реализации ее элементов для решения вопросов оптимизации процессов окисления углеводородов.

2. Постановка и метод решения задачи

Решение поставленной задачи основано на системном анализе внутренней структуры исследуемой системы, составе ее компонентов и характере связей между внутренними и внешними компонентами с доминантной компонентой и ее связи с экономической компонентой.

На основе системного анализа установлены основные геометрические характеристики, технологические и параметрические элементы технологического процесса, необходимые для оптимизации системы.

Функциональную зависимость технологического процесса прямого окисления углеводородов (метана) кислородом воздуха можно представить в виде

$$B_M = f(S/W, p_p, p_{\text{вых}}, T_{\text{вх}}, T_p, T_{\text{вых}}, \tau_p, \nu_r, Q_{\text{см}}), \quad (3)$$

где B_M – выход метанола с одного метра кубического метана, пропущенного через реактор за один проход, г/м³; S – внутренняя поверхность реактора, м²; W – внутренний объем реактора, м³; S/W – геометрическая характеристика реактора; p_p – давление в реакторе, при котором обеспечивается максимальный выход метанола [4, 12], остается постоянным и в любой точке объема реактора составляет 5 МПа; $p_{\text{вых}}$ – давление на выходе реактора, МПа; $T_{\text{вх}}$, T_p , $T_{\text{вых}}$ – температуры на входе, в рабочей зоне и на выходе реактора соответственно, К; τ_p – время протекания реакции окисления, с; $Q_{\text{см}}$ – расход газовой смеси через реактор, м³/с.

Связь между целыми числами параметров технологического процесса и иррациональными числами Фибоначчи – Люка найдем в виде следующих технологических и параметрических компонент в виде безразмерных комплексов (симплексов).

Комплекс, определяющий связь геометрических (S/W) характеристик реактора с кинетическими параметрами процесса в реакторе (ν_r, τ_p) и технологической компонентой на входе в реактор $\overline{\text{СН}_4} / \overline{\text{O}_2}$.

Воспользуемся удельными выходами метанола в расчете на единицу объема W_p и внутренней поверхности реактора S_p в виде отношений, выраженных через технологические характеристики:

$$\bar{b}_p = b_W / b_S = \frac{S_p}{W_p} \ell_{p3} = \left(\frac{4}{d} + \frac{2}{\ell} \right) \ell_{p3} = \frac{S_p}{W_p} = \left(\frac{4}{d} + \frac{2}{\ell} \right), \quad (4)$$

где $\ell_{p3} = 1$ см – линейный определяющий размер.

Расчет по зависимости (4) представлен на рис. 1 в виде $\ell = f(\ell/d)$.

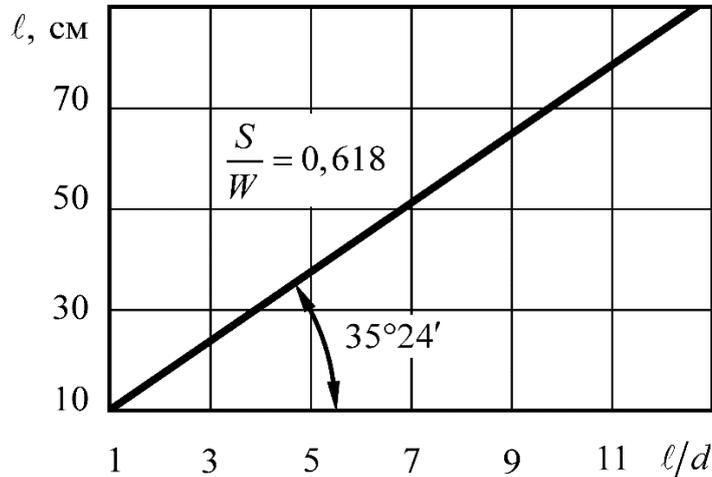


Рис. 1. Зависимость $\ell = f(\ell/d)$

Выразим технологические и параметрические компоненты в виде

$$S_{\text{CH}_3\text{OH}} = f \left(\frac{S_p}{W_p} \cdot \frac{\tau_p}{\tau_r} \cdot \frac{\overline{\text{CH}_4}}{\overline{\text{O}_2}} \cdot \frac{p_p}{p_{\text{вых}}} \cdot \frac{T_{\text{вх}}}{T_p} \cdot \frac{T_p}{T_{\text{вых}}} \right), \quad (5)$$

где $S_{\text{CH}_3\text{OH}}$ – доминантная компонента. Определяется в эксперименте с учетом, что в отношении $(B_M)_{\text{оп}} / (B_M)_{\text{max}}$ знаменатель представляет теоретически возможное значение выхода метанола; $(B_M)_{\text{max}} = 1428 \text{ г} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^3 \text{ CH}_4$; $\frac{\overline{\text{CH}_4}}{\overline{\text{O}_2}}$ – объемное относительное содержание метана и кислорода в исходной

смеси (технологический симплекс второго типа); $S_{\text{CH}_3\text{OH}} = \frac{(B_M)}{(B_M)_{\text{max}}}$ – селек-

тивность окисления метана в метанол, представляет отношение действительного выхода метанола к максимальному – теоретически возможной величине.

Гармония технологического процесса основана на внешних и внутренних компонентах с учетом иерархии их связи и влияния каждого компонента на ускорение или замедление процессов, протекающих в реакторе.

Технологический процесс окисления метана кислородом воздуха (в виде иерархической структуры) обладает динамической симметрией, которой свойственно увеличение или уменьшение компонентов, выраженных «золотой пропорцией», соответствующей возрастающему или убывающему ряду геометрической прогрессии, в виде чисел Фибоначчи – Люка [8].

В частности, имеют место «золотые пропорции»:

– для убывающего ряда геометрической прогрессии:

$$F_{-1} = 1 \text{ и } \Phi^{-1} = 0,618, \text{ а } F_{-2} = \Phi^{-2} = 0,382, \text{ } n = 0, -1, -2, -3, \dots,$$

– для возрастающего ряда:

$$F_1 = 1 \text{ и } \Phi^1 = 1,618, \text{ а } F_2 = \Phi^2 = 2,618, \text{ } n = 0, 1, 2, 3, \dots,$$

причем

$$1/\Phi^2 = 1/2,618 = 0,382; (\Phi^{-1})^2 = 0,618^2 = 0,382.$$

Используя мультипликативное свойство «золотых пропорций», выразим компоненты функциональной зависимости (4) через парные «золотые пропорции» в следующей иерархической последовательности:

1. Между входной компонентой и комплексной компонентой гармония выражается в виде

$$(\Phi^{-1})^2 = \left(\frac{4}{d} + \frac{2}{\ell} \right) \cdot \frac{\tau_p}{\tau_r} = 0,618 \cdot 0,618 = 0,382 = \overline{\text{CH}_4/\text{O}_2}. \quad (6)$$

2. Между входной и выходной $p_p/p_{\text{ВЫХ}}$ компонентами гармония выражается в виде $\Phi = \Phi^{-2} \times \Phi^1$ или

$$\Phi_{\overline{\text{CH}_4/\text{O}_2}} = (\overline{\text{CH}_4/\text{O}_2}) \cdot p_p/p_{\text{ВЫХ}} = 0,382 \cdot 1,618 = 0,618. \quad (7)$$

3. Между компонентами $p_p/p_{\text{ВЫХ}}$ и $T_{\text{ВХ}}/T_p = 0,618$:

$$\Phi_{\overline{\text{CH}_4/\text{O}_2}} = (\overline{\text{CH}_4/\text{O}_2}) \cdot p_p/p_{\text{ВЫХ}} \cdot T_{\text{ВХ}}/T_p = 0,618 \cdot 0,618 = 0,382. \quad (8)$$

4. Между входной $T_{\text{ВХ}}/T_p$ и выходной $T_{\text{ВЫХ}}/T_p$ компонентами, определяющими селективность окисления метана в метанол:

$$\begin{aligned} \Phi_{\overline{\text{CH}_4/\text{O}_2}} &= (\overline{\text{CH}_4/\text{O}_2}) \cdot p_p/p_{\text{ВЫХ}} \cdot T_{\text{ВХ}}/T_p = \\ &= 0,382 \cdot T_p/T_{\text{ВЫХ}} = 0,382 \cdot 1,618 = 0,618. \end{aligned} \quad (9)$$

Выражения (6)–(9) можно записать в виде

$$S_{\text{CH}_3\text{OH}} = (0,618)^2 \cdot 1,618 = 0,618 \cdot 0,618 = 0,382 \cdot 1,618 = 0,618. \quad (10)$$

Выражение (10) является необходимым условием оптимизации технологического процесса прямого окисления метана кислородом воздуха.

В выражении (6) определяются отношение τ_p/τ_r , скорость газов v_r при известных (заданных) геометрических характеристиках реактора (диаметре d и длине ℓ), расходе газовой смеси, давлении и температуре в реакторе по формуле

$$v_r = \frac{4 \cdot Q \cdot (T_p / T_0)}{\pi \cdot d^2 \cdot (p_p / p_0)} \quad (11)$$

Время движения элемента газовой смеси τ_r и время реакции τ_p в реакторе определяется из выражения

$$\tau_r = 0,618\tau_p \quad (12)$$

Выражение (5) представляет собой «математическую гармонию» «золотых пропорций», технологических и параметрических компонент, выраженных в иррациональных числах Фибоначчи – Люка.

Множество факторов (компонент), определяющих работу реактора, можно представить в виде структурного объекта экспериментального исследования (рис. 2).

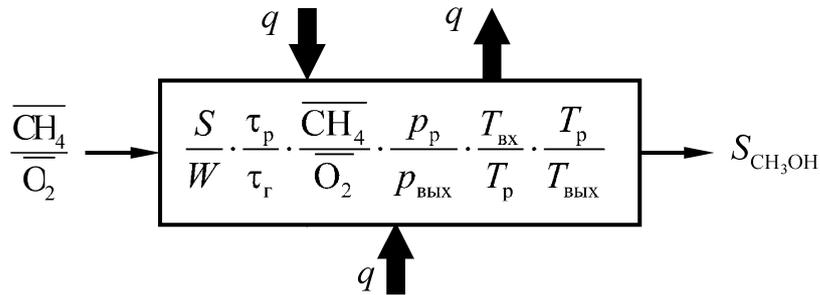


Рис. 2. Структурное представление объекта исследования

Представленная структурная схема объекта исследования (рис. 2) позволяет проводить процедуру планирования эксперимента путем выбора числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для решения задачи оптимизации технологического процесса прямого окисления метана кислородом воздуха.

Основными управляемыми переменными компонентами, которые можно считать взаимно независимыми и контролируруемыми, являются: соотношение метана и кислорода воздуха в смеси $\overline{CH_4}/\overline{O_2}$ и ее расход; параметрические компоненты $T_{вх}/T_p$, $T_p/T_{вых}$ и $p_p/p_{вых}$.

В качестве неуправляемой компоненты выступает комплекс характеристик и параметров $\frac{S}{W} \cdot v_r \cdot \tau_p$.

Выходной целевой функцией является доминантная компонента S_{CH_3OH} .

Неконтролируемые возмущения ε_i – независимые величины подчиняются нормальному распределению с параметрами $M(\varepsilon) = 0$ и $\sigma_\varepsilon^r = \text{const}$ для каждой фиксированной комбинации уровней.

Проверка достоверности применения методологии «математики гармонии» и «золотого сечения» апробирована на экспериментальных данных, проведенных авторами на реакторе, с геометрическими характеристиками:

$\ell = 82$ см, $d = 6,7$ см, и основными параметрами: $T_p = 450$ °С, $p_p = 5$ МПа, $Q_{см} = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м³/с.

Результаты экспериментов, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты обработки опытных данных

C_M	350	343	342	240	221	418	387	392	391	396	432
$\overline{CH_4}$ %, об.	85,2	83,3	76,2	69,0	62,2	40,0	35,2	30,5	16,2	11,4	7,1
$\overline{O_2}$ %, об.	3,7	4,2	5,3	7,5	8,2	9,0	10,0	10,3	14,0	15,8	17,9
$\frac{\overline{CH_4}}{\overline{O_2}}$	23,03	19,83	14,38	9,20	7,59	4,44	3,52	3,42	1,157	0,722	0,397
$V_M, \text{ г/м}^3$	20	23	31	35	37	85	95	101	211	323	669

Анализ результатов показывает, что при $\frac{\overline{CH_4}}{\overline{O_2}} = 7,1/17,9 = 0,397$ получилась величина, близкая к «золотому соотношению», которое равно 0,382.

Оптимальное давление на выходе реактора при $p_p = 5$ МПа в оптимальном режиме должно быть 3МПа. Оптимальная температура на выходе реактора при $T_p = 450$ °С составляет

$$T_{\text{вых}} = T_p / 1,618 = 450 / 1,618 = 278 \text{ °С.}$$

Это косвенно подтверждает, что при малых значениях конверсии метана, удельный выход метанола возрастает за счет возрастания концентрации метилпероксидных радикалов CH_3OO^* при «температурах ниже 600 °С, образующихся путем окисления метильных радикалов CH_3^* с O_2 » [1]:



При температурах ниже 600 °С, особенно при повышенных давлениях (например, 5 МПа), равновесие в реакции (13) сильно смещается вправо, что дает начало к значительному образованию метанола по реакции [1]:



Эта реакция по времени кратковременна из-за взаимодействия их между собой и интенсивного обрыва цепей.

Представленные реакции (13) и (14) характерны для условий большого содержания метана в исходной смеси относительно кислорода.

При малом содержании CH_4 в исходной смеси требуется проведение дополнительных экспериментальных исследований, подтверждающих полученные результаты (табл. 1).

Отсутствие единого, общепризнанного критерия оптимальности (эффективности) предопределяет проблему если не в плане разработки нового, то в плане выбора среди множества критериев наиболее подходящего для данной установки [13].

Идея комплексной оптимизации всей технологической системы заключается в совместном допустимом изменении первоначальной совокупности значений комплекса взаимосвязанных компонент в направлении, которое дает снижение значения критерия экономической эффективности до минимума.

В частности, сумма доминантной компоненты и экономической (критерия экономической эффективности) равна единице, т.е.

$$S_{\text{CH}_3\text{OH}^-} + K_3 = 1, \quad (15)$$

где $S_{\text{CH}_3\text{OH}^-} = 0,618$ – критерий выхода целевого продукта; K_3 – критерий экономической эффективности, равный 0,382.

Выражение (15) является достаточным условием оптимизации технологической системы прямого окисления метана кислородом воздуха.

Заключение

Выражение технологических характеристик и параметров технологического процесса в виде «золотых пропорций», объединенных на принципах «гармонии» и «золотого сечения», позволяет решить задачу оптимизации технологического процесса окисления метана кислородом воздуха на стадии разработки проектных решений, включающих технологические характеристики, связанные с расходом газохимической смеси, энергетическими характеристиками технологической схемы, физико-химическими характеристиками процесса, обусловленных выбором наиболее эффективного соотношения компонентов $\frac{\text{CH}_4}{\text{O}_2}$, давления, температуры, скорости и теплоты.

Результаты теоретической разработки подтверждены экспериментальными данными авторов, а также исследованиями отечественных и зарубежных ученых.

Разработанный метод, включающий методологию формирования комплексного подхода известных авторов [13–15] с целью реализации модели в любом технологическом процессе, в сочетании с методологией гармоничного состояния системы, соответствующей классической «золотой пропорции», является простым по содержанию и универсальным по практическому решению различных задач оптимизации технологических процессов, в частности, при выполнении процедуры планирования эксперимента.

Список литературы

1. **Арутюнов, В. С.** Перспективные технологии на основе парциального окисления углеводородных газов / В. С. Арутюнов ; Институт химической физики им. Н. Н. Семенова. – М., 2009. – 30 с.
2. **Арутюнов, В. С.** Окислительная конверсия метана / В. С. Арутюнов, О. В. Крылов. – М. : Наука, 1998. – 361 с.
3. **Арутюнов, В. С.** Окислительная конверсия метана / В. С. Арутюнов, О. В. Крылов // Успехи химии. – 2005. – Т. 74, № 12. – С. 1216–1245.
4. Homogeneous Gas – Phase Oxidation of Methane Using Oxidene as Oxidant in an Annular Reactor / Gary A. Foulds, Brian F Gray, Sarah A. Miller, and G Stewart Walker // Ind. Eng. Chem. Res. – 1993. – Vol. 32. – P. 780–787.

5. **Arperntinier, Ph.** The Contribution of homogeneous reactions in catalytic oxidation process: Safety and Selectivity aspects / Ph. Arperntinier, F. Cavani, F. Trifiro // *Catal. Today*. – 2005. – Vol. 99. – P. 15–22.
6. **Zamansky, V. M.** Gas phase reactors of hydrogen peroxide and hydrogen peroxide/methanol mixtures with air pollutants / V. M. Zamansky, Ho Los, P. M. Maly, W. R. Seeker // *26-th Symposium International On Combustion*. – Combustion Institute, 1996. – P. 125–132.
7. **Lunsford, J. H.** Methane conversion / J. H. Lunsford. – Amsterdam : Elsevier, 1988. – p. 339.
8. **Gesser, H. D.** Proc. Sump. On Methane Activation Intern. Cheam / H. D. Gesser, N. R. Hunter, L. A. Morton // *Congress on Pacific Basis Soc.* – Honolulu, 1989. – P. 23.
9. **Кордон, М. Я.** Концепция оптимизации прямого окисления метаносодержащих газов кислородом воздуха / М. Я. Кордон, В. М. Ананьев, Е. О. Гравшенкова, В. В. Кустиневич, Т. К. Семченко, И. А. Ивлева // *Надежность и качество : тр. Междунар. симпоз.* – Пенза : Изд-во ПГУ, 2011. – Т. 2. – С. 177–179.
10. **Стахов, А. П.** Роль «золотого сечения» и «математики гармонии» в преодолении «стратегических ошибок» в развитии математики / Стахов А. П. ; Академия Тринитаризма. – М., 2008. – Эл № 77-6567, публ. 14688, 12.01.2008.
11. **Ясинский, С. Л.** Основы унификации элементарной математики для инженеров-исследователей и место в ней «золотого сечения» / С. Л. Ясинский. – СПб., 2006. – 124 с.
12. **Коновалов, А. А.** Оптимальные соотношения компонентов экогеосистем и их характеристик / А. А. Коновалов ; ИПОС СО РАН. – Тюмень, 2010. – 65 с.
13. **Лукин, В. Д.** Циклические адсорбционные процессы. Теория и расчеты / В. Д. Лукин, А. В. Новосельский. – Л. : Химия, 1989 – 215 с.
14. **Кашеев, П. А.** Формирование комплексного подхода к разработке прецизионных аналого-цифровых преобразователей для информационно-измерительных систем ракетно-космической техники / П. А. Кашеев, Ю. Л. Кузнецов, К. Ю. Пискаев, Ю. А. Цуриков // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки.* – 2012. – № 1 (21). – С. 151–160.
15. **Тарасов, Е. А.** Математическая модель как основа компьютерного эксперимента для технологического агрегата с рекуперативным гидроприводом / Е. А. Тарасов // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки.* – 2011. – № 2 (18). – С. 120–131.

References

1. Arutyunov V. S. *Perspektivnye tekhnologii na osnove partial'nogo okisleniya uglevodородnykh gazov* [Perspective technologies on the basis of partial oxidation of hydrocarbon gases]. Institut khimicheskoy fiziki im. N. N. Semenova. Moscow, 2009, 30 p.
2. Arutyunov V. S., Krylov O. V. *Okislitel'naya konversiya metana* [Oxidative converse of methanol]. Moscow: Nauka, 1998, 361 p.
3. Arutyunov V. S., Krylov O. V. *Uspekhi khimii* [Progress of chemistry]. 2005, vol. 74, no. 12, pp. 1216–1245.
4. Gary A. Foulds, Brian F Gray, Sarah A. Miller, and G. Stewart Walker *Jnd. Eng. Chem. Res.* 1993, vol. 32, pp. 780–787.
5. Arperntinier Ph., Cavani F., Trifiro F. *Catal. Today*. 2005, vol. 99, pp. 15–22.
6. Zamansky V. M., Ho Los, Maly P. M., Seeker W. R. *26-th Symposium International On Combustion*. Combustion Institute, 1996, pp. 125–132.
7. Lunsford J. H. *Methane conversion*. Amsterdam: Elsevier, 1988, p. 339.
8. Gesser, H. D., Hunter N. R., Morton L. A. *Congress on Pacific Basis Soc.* Honolulu, 1989, p. 23.

9. Kordon M. Ya., Anan'ev V. M., Gravshenkova E. O., Kustinevich V. V., Semchenko T. K., Ivleva I. A. *Nadezhnost' i kachestvo: tr. Mezhdunar. simpoz.* [Reliability and quality: proceedings of the International symposium]. Penza: Izd-vo PGU, 2011, vol. 2, pp. 177–179.
10. Stakhov A. P. *Rol' «zolotogo secheniya» i «matematiki garmonii» v preodolenii «strategicheskikh oshibok» v razvitii matematiki* [The importance of “the golden proportion” and “mathematical harmony” in overcoming “strategic errors” in development of mathematics]. Akademiya Trinitarizma. Moscow, 2008, El № 77-6567, published on 14688, 12.01.2008.
11. Yasinskiy S. L. *Osnovy unifikatsii elementarnoy matematiki dlya inzhenerov-issledovateley i mesto v ney «zolotogo secheniya»* [Fundamentals of unification of elementary mathematics for engineers-researchers and the part of “the golden proportion” in it]. Saint Petersburg, 2006, 124 p.
12. Kononov A. A. *Optimal'nye sootnosheniya komponentov ekogeosistem i ikh kharakteristik* [Optimall correlation of ecogeosystem components and characteristics thereof]. IPOS SO RAN. Tyumen, 2010, 65 p.
13. Lukin V. D., Novosel'skiy A. V. *Tsiklicheskie adsorbtsionnye protsessy. Teoriya i raschety* [Cyclic adsorptive processes. Theory and calculations]. Leningrad: Khimiya, 1989, 215 p.
14. Kashcheev P. A., Kuznetsov Yu. L., Piskaev K. Yu., Tsurikov Yu. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences], 2012, no. 1 (21), pp. 151–160.
15. Tarasov E. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2011, no. 2 (18), pp. 120–131.

Kordon Mikhail Yakovlevich

кандидат технических наук, профессор,
кафедра техносферной безопасности,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: ot@pnzgu.ru

Kordon Mikhail Yakovlevich

Candidate of engineering sciences,
professor, sub-department of technosphere
safety, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Anan'ev Vladimir Mikhailovich

кандидат технических наук, старший
научный сотрудник, кафедра
техносферной безопасности, Пензенский
государственный университет (Россия,
г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: ot@pnzgu.ru

Anan'ev Vladimir Mikhailovich

Candidate of engineering sciences,
senior staff scientist, sub-department
of technosphere safety, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Vershinin Nikolay Nikolaevich

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой техносферной
безопасности, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: ot@pnzgu.ru

Vershinin Nikolay Nikolaevich

Doctor of engineering sciences, professor,
head of sub-department of technosphere
safety, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Заонегин Антон Александрович

ведущий инженер, кафедра техносферной безопасности, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: ot@pnzgu.ru

Zaonegin Anton Aleksandrovich

Leading engineer, sub-department of technosphere safety, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 662.753; 377.3.630.1

Кордон, М. Я.

Метод комплексной оптимизации процесса прямого окисления углеводов кислородом воздуха / М. Я. Кордон, В. М. Ананьев, Н. Н. Вершинин, А. А. Заонегин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 4 (28). – С. 128–139.

УДК 65.015.13+678.86

Р. С. Зиновьев, В. Я. Савицкий, Ю. А. Мережко, В. С. Ивановский

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АРМИРОВАННЫХ РЕАКТОПЛАСТОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОЙ НАМОТКИ

Аннотация. *Актуальность и цели.* Сочетание высоких прочностных и упругих характеристик полимерных композиционных материалов (ПКМ) с высокими триботехническими параметрами обуславливает изготовление из них высокоресурсных подшипников скольжения. В то же время для современного состояния серийного производства намоточных конструкций из ПКМ характерно изготовление значительной части изделий, содержащих недопустимые макродефекты. В этой связи актуальным представляется создание и внедрение бездефектной технологии изготовления подшипников скольжения, основанной на формировании определенного напряженно-деформированного состояния ПКМ, обеспечивающего сжимающие напряжения массива армированного реактопласта в трансверсальном направлении. Цель данной работы заключается в сравнительной экспериментальной оценке межслоевой прочности кольцевых образцов при трансверсальном растяжении и при межслоевом сдвиге, изготовленных методом послойной намотки. *Материалы и методы.* Технико-экономическая эффективность исследуемого метода оценивалась на кольцевых образцах из стеклопластика шириной 32...35 мм, вырезанных из технологического припуска трубчатой заготовки серийно изготавливаемого подшипника скольжения внутренним диаметром 120 мм, наружным – 155 мм ($m = 1,29$). Трубчатая заготовка изготовлена на основе стеклоткани ТС-11-78 (толщина слоя 0,27 мм) и эпоксифенолоформальдегидного связующего ФФЭ-70. Намотка велась «сухим» способом на неподогреваемую оправку, препрег при намотке не подогревался. Каждый пакет отверждался по режиму 80 °С/1 час + 120 °С/3 часа. Окончательное отверждение велось по режиму 80/1 + 120/3 + 160/5 + 170/3. Охлаждение происходило вместе с термошкафом со скоростью 0,25 °С/мин. Испытания проводились растяжением образцов с четырьмя надрезами вместо двух стандартных, что позволило определить прочность при межслойном сдвиге в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Определение на одном образце двух характеристик повышает информативность исследований, достоверность результатов и дает возможность в два раза сократить количество необходимых образцов. *Результаты.* Применение предлагаемого образца эффективно не только при испытаниях материала трубчатых заготовок, но и тогда, когда из-за конструктивных особенностей изделия невозможно вырезать образец для определения сдвиговой прочности в осевом направлении, например, в стыковочном шпангоуте межступенчатого отсека. Предложено рациональное число этапов послойного отверждения и таких режимов намотки, которые позволили бы уменьшить радиальные остаточные напряжения, добиться их более равномерного распределения по толщине и создавать трубчатую заготовку без остаточных радиальных напряжений. На основании проведенных исследований наряду с достоинствами метода послойного отверждения выявлены недостатки, заключающиеся в том, что многократное отверждение последовательно наматываемых пакетов удлиняет технологический процесс изготовления, причем каждый предшествующий пакет слоев подвергается многократной термообработке. Намотка очередного пакета на ранее отвержденный ухудшает условия формирования адгезионной связи на поверхностях контакта этих пакетов, протекания диффузионных процессов.

Выводы. Метод намотки с послойным отверждением позволяет эффективно влиять на поле остаточных напряжений в материале и добиться исключения дефектов в толстостенной трубчатой заготовке подшипника скольжения.

Ключевые слова: метод послойной намотки, режимы технологического процесса, новые виды образцов, эффективность предложенных лабораторных испытаний.

R. S. Zinov'ev, V. Ya. Savitskiy, Yu. A. Merezko, V. S. Ivanovskiy

RESEARCH OF ARMORED THERMOSETTING MATERIAL CHARACTERISTICS IN MANUFACTURING FRICTION BEARING BY THE METHOD OF FIBER REELING

Abstract. *Background.* Combination of high strength and elasticity characteristics of polymeric composite materials (PCM) with high tribotechnical parameters determine the production of long-life friction bearing on basis thereof. At the same time for the modern condition of series production of fiber reeling from PCM it is typical have a significant part of the product containing inadmissible macrodefects. In this connection it is found topical to develop and implement a technology of defect-free production of friction bearing based on formation of the mode of deformation of PCM providing the compressive stress of the mass of the armoured thermosetting material in transversal direction. The study is aimed at comparative experimental evaluation of the interlayer strength of the annular sample at transversal stretch and at interlayer shift, produced by the method of fiber reeling. *Materials and methods.* Technical economic effectiveness of the researched method was estimated on annular samples made of glass-fibre plastic of 32...35 mm in width, cut from tubular stock workpiece of the serially produced friction bearing with internal diameter of 120 mm, external diameter of 155 mm ($m = 1,29$). Tubular workpiece is made of glass cloth TC-11-78 (layer thickness of 0,27 mm) and epoxy-phenol-formaldehyde binding ФФЭ-70. Reeling was carried out by the "dry" method on the heated arbor, prepreg during reeling was not heated. Every package was hardened at the mode of 80 °C/1 hour ++ 120 °C/3 hours. Final hardening was conducted at the mode 80/1 + 120/3 ++ 160/5 + 170/3. Cooling was carried out with the oven at the rate of 0,25 °C/min. Testing was carried out through stretching the samples with 4 notches instead of 2, that allowed determining the strength in conditions of interlayer shift in two mutually transverse directions. Determination of two characteristics on one sample increases informativity of research, authenticity of results and enables to decrease two times the number of samples needed. *Results.* Application of the suggested sample is effective not just in testing the material of tubular workpieces, but also in conditions when due to constructive features of the product it is impossible to cut the sample to determine shift strength in axial direction, for example, in the docking ring of the interstage chamber. The authors suggest a rational number of stages of layerwise hardening and such modes of reeling that allow decreasing of radial residual stresses, achieving more uniform distribution thereof by width and creating a tubular workpiece without radial residual stresses. On the basis of conducted research together with advantages of the method of layerwise hardening the authors revealed disadvantages, consisting in the fact that multiple hardening of sequentially reeled packages prolongs the technological process of production, and each previous package of layers is subject to repeated thermal treatment. Reeling of another package on the previously hardened one aggravates the conditions of adhesive bond formation on the contact surfaces of these packages and the diffusion

processes behaviour. *Conclusions.* The method of reeling with layerwise hardening allows effective influence on the field of residual stresses in the material and obtaining elimination of defects in the thick-wall tubular workpiece of the friction bearing.

Key words: fiber reeling method, technological process modes, new test samples, effectiveness of suggested laboratory tests.

Сочетание высоких прочностных и упругих характеристик полимерных композиционных материалов (ПКМ) с высокими триботехническими параметрами ставят их в ряд наиболее перспективных материалов при создании высоконагруженных опор скольжения. Более того, возможность создания материалов с заранее прогнозируемыми свойствами и изготовления из них конструкций подшипников скольжения делают ПКМ незаменимыми при проектировании новых высокоресурсных узлов трения.

Сегодня подшипники скольжения из намоточных ПКМ успешно эксплуатируются во многих узлах трения агрегатов дорожных и дорожно-строительных машин, коммунальных машин и машин сельскохозяйственного назначения, горно-транспортного оборудования и автопогрузчиков, балансирных подвесок грузовых автоприцепов и другой техники. Значительно увеличилась номенклатура антифрикционных втулок, возросло число заказчиков продукции ООО НПП «Полидор». В то же время для современного состояния серийного производства намоточных конструкций из ПКМ характерно изготовление значительной части изделий, содержащих недопустимые макродефекты в виде межслоевых расслоений и трещин, текстурной волнистости. Промышленные технологические процессы являются недостаточно стабильными и надежными с точки зрения гарантированного обеспечения необходимого уровня качества.

Опыт эксплуатации показывает необходимость в разработке и внедрении технологических и конструкторских приемов, способствующих снижению, а в дальнейшем и исключению производственных дефектов при изготовлении одного из ответственных элементов узла трения – антифрикционной втулки из ПКМ. Решение данной проблемы видится в создании и внедрении бездефектной технологии изготовления подшипников скольжения (ПС), особенностью которой является формирование определенного напряженно-деформированного состояния материала, обеспечивающего сжимающие напряжения массива армированного реактопласта в трансверсальном направлении.

Суть одного из известных методов предотвращения трещин в материале конструкции и искривления арматуры состоит в силовой намотке в комбинации с послойным отверждением (метод послойной намотки). Основные положения этого метода описаны в работах [1–3]. При этом методе после наложения определенного числа слоев (пакета слоев) заготовка отверждается, затем наматывается следующий пакет, содержащий определенное число слоев, и вновь отверждается и т.д. Намотку каждого пакета слоев можно вести на полностью отвержденный или предварительно уплотненный (не полностью отвержденный) полуфабрикат. Толстостенное изделие составляется, таким образом, из ряда пакетов небольшой толщины, при намотке которых натяжение падает в значительно меньшей степени. В результате расширяются возможности для компенсации температурных напряжений как внутри одного

пакета слоев, так и в заготовке в целом. Эффект достигается за счет уменьшения (до величины одного пакета) реакционноспособного объема армированного полимера, участвующего в полном цикле технологического процесса.

Технико-экономическая эффективность данного метода оценивалась на кольцевых образцах из стеклопластика шириной 32...35 мм, вырезанных из технологического припуска трубчатой заготовки серийно изготавливаемого подшипника скольжения внутренним диаметром 120 мм, наружным – 155 мм ($m = 1,29$). Стеклопластик трубчатой заготовки формируют на основе стеклоткани ТС-11-78 (толщина слоя 0,27 мм) и эпоксифенолоформальдегидного связующего ФФЭ-70. В табл. 1 приведены геометрические параметры и силовые режимы послойной намотки пакетов.

Намотка велась «сухим» способом на неподогреваемую оправку, препрег при намотке не подогревался. Отверждение осуществлялось в сушильном электрошкафу СНОЛ. Каждый пакет отверждался по режиму 80 °С/1 час + 120 °С/3 часа. Окончательное отверждение (трубчатой заготовки – по варианту I и последних пакетов – по вариантам II и III) велось по режиму 80/1 + 120/3 + 160/5 + 170/3. Охлаждение происходило вместе с термощафом со скоростью 0,25 °С/мин.

В ходе исследований оценивались:

- величина и распределение по толщине кольца остаточных радиальных напряжений в образцах, намотанных по различным режимам;
- изменение степени армирования материала по толщине кольца.

Остаточные радиальные напряжения σ_r^0 (рис. 1) определялись в кольцевых образцах методом Закса, деформации колец определялись при помощи тензодатчиков.

Из рис. 1 видно, что сочетание силовой намотки с послойным отверждением при изготовлении толстостенных трубчатых заготовок подшипников скольжения дает возможность эффективно влиять на распределение остаточных напряжений, при этом удается не только понизить, но и изменить знак радиальных остаточных напряжений.

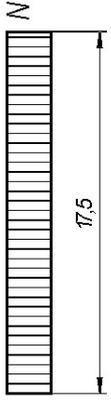
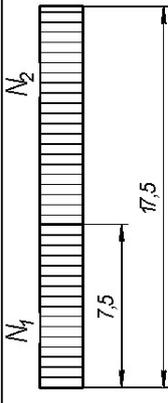
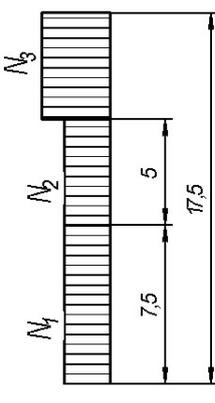
В работе [2] экспериментально показано, что существенного изменения величины окружных напряжений σ_ϕ^0 от введения промежуточных отверждений замечено не было. Установлено также, что существует такое число этапов послойного отверждения, превышение которого не приводит к каким-либо заметным изменениям величины $\max \sigma_r^0$ (рис. 2).

Очевидно, что задачей технологической обработки становится определение рационального числа этапов послойного отверждения и таких режимов намотки, которые позволили бы уменьшить радиальные остаточные напряжения, добиться их более равномерного распределения по толщине и создавать трубчатую заготовку без остаточных радиальных напряжений.

Изменение коэффициента армирования по толщине изделия оценивалось по содержанию связующего в зонах внутренней и наружной поверхностей кольца, а также в зонах с $\xi = 0,42; 0,71$. Оценка производилась методом выжигания в электропечи при температуре 600 °С в течение 30 мин, образцы вырезались из тех же колец, намотанных по вышеприведенным режимам I–III (рис. 3).

Таблица 1

Параметры и режимы процесса послойной намотки

№ варианта	Количество образцов	Количество пакетов n в образце	Геометрические параметры				Удельное усилие натяжения, N , Н/мм	Эпюры остаточных радиальных напряжений по толщине образца
			$R_{вн}$, мм	$R_{нар}$, мм	Толщина пакета, мм	Количество слоев в пакете		
I	2	1	60	77,5	17,5	66	30	
II	4	2	60	67,5	7,5	28	30	
			67,5	77,5	10	38	30	
III	4	3	60	67,5	7,5	28	20	
			67,5	72,5	5,0	19	20	
			72,5	77,5	5,0	19	30	

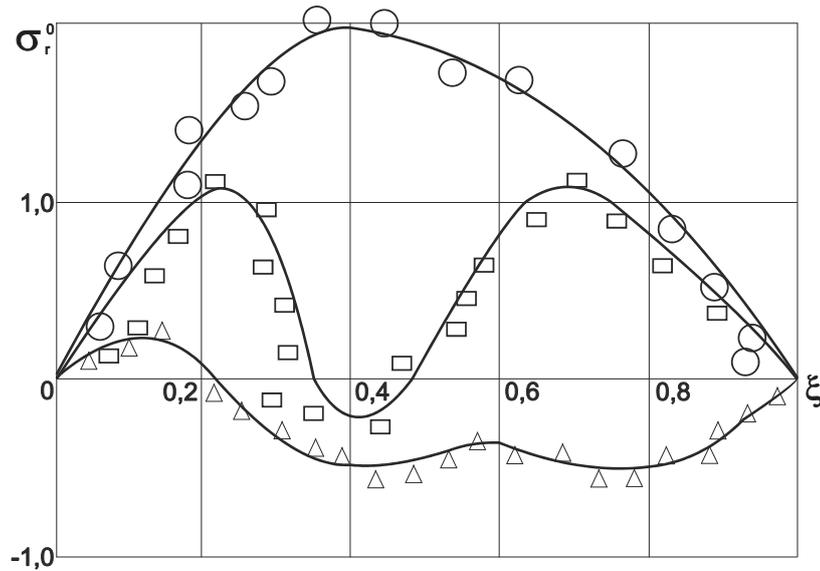


Рис. 1. Распределение радиальных остаточных напряжений по толщине кольца, намотанного по: о – варианту I; □ – варианту II; △ – варианту III

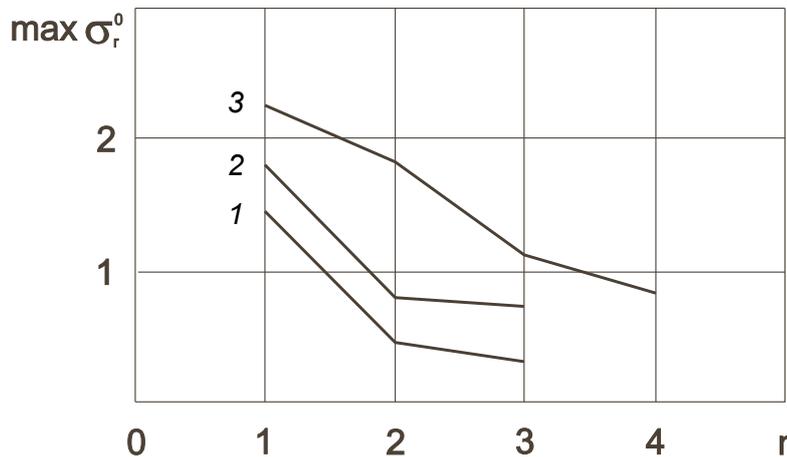


Рис. 2. Зависимость максимальных значений радиальных напряжений от числа n этапов послойного отверждения: 1 – кольцо $H = 20$ мм, $N = 20$ Н/мм; 2 – кольцо $H = 20$ мм, $N = 30$ Н/мм; 3 – кольцо $H = 35$ мм, $N = 30$ Н/мм

При намотке без промежуточного отверждения разность между содержанием смолы на внутренней и наружной поверхностях кольца составляет около 8 %. В кольцах, изготовленных методом послойного отверждения, содержание связующего оказывается более равномерным (до 2 % в кольцах по режиму III). Штриховая линия $v = 38,1$ % соответствует содержанию смолы в ленте-препреге.

Основной недостаток рассматриваемого метода состоит в том, что каждый предшествующий пакет слоев подвергается многократной термообработке. Намотка очередного пакета на ранее отвержденный ухудшает условия формирования адгезионной связи на поверхностях контакта этих пакетов,

протекания диффузионных процессов. Все это неизбежно сказывается на качестве и физико-механических свойствах материала.

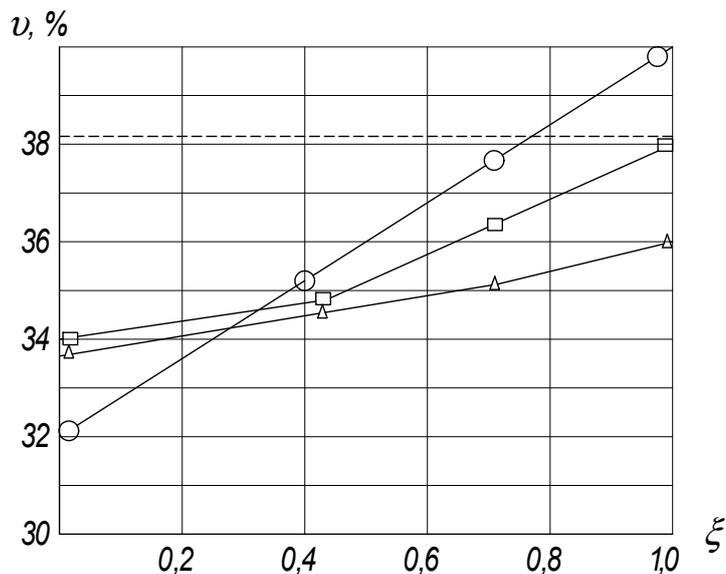


Рис. 3. Влияние послойного отверждения на содержание связующего по толщине кольца, намотанного по: o – варианту I; □ – варианту II; Δ – варианту III

Представляет интерес количественное изменение прочностных характеристик материала, особенно в зоне послойно наносимых пакетов. С этой целью проведена сравнительная экспериментальная оценка межслоевой прочности в зоне $\xi = 0,42$ ($r = 67,5$ мм) кольцевых образцов, намотанных по вариантам I и II:

- при трансверсальном растяжении;
- при межслоевом сдвиге.

Испытания на растяжение перпендикулярно слоям проводились на образцах, конструкция которых описана в [4]. Образцы вырезались из этих кольцевых образцов таким образом, чтобы исследуемая зона материала с $\xi = 0,42$ ($r = 67,5$ мм) находилась в рабочей части образца (рис. 4).

Результаты испытаний, приведенные в табл. 2, показывают, что промежуточное отверждение снижает прочность материала на растяжение перпендикулярно слоям с 16,3 до 10,6 МПа. Увеличился разброс результатов испытаний.

Определению прочностных характеристик при межслоевом сдвиге в толстостенной конструкции (трубчатой заготовке) предшествовал выбор образца, обеспечивающего максимальную и достоверную информацию об исследуемом параметре.

Прочность слоистого ПКМ при межслоевом сдвиге определяется в основном силами сцепления на контактной поверхности матрица–наполнитель и действующими на этой поверхности касательными напряжениями. Поэтому при экспериментальном определении прочности межслоевого сдвига важно знать действительное численное значение касательных напряжений, приво-

дящих к разрушению образца. Максимальное значение касательных напряжений зависит от способа испытаний на межслойный сдвиг и схемы нагружения, от формы и размеров образца, а также от всех отклонений от идеализированной структуры материала, вносимых технологией изготовления армированных пластиков (нерегулярная укладка арматуры, искривление волокон, пустоты). Аналитическая оценка всех этих факторов невозможна, поэтому экспериментально определяемые характеристики межслойного сдвига являются усредненными и пригодны в основном только для качественной оценки материала [5].

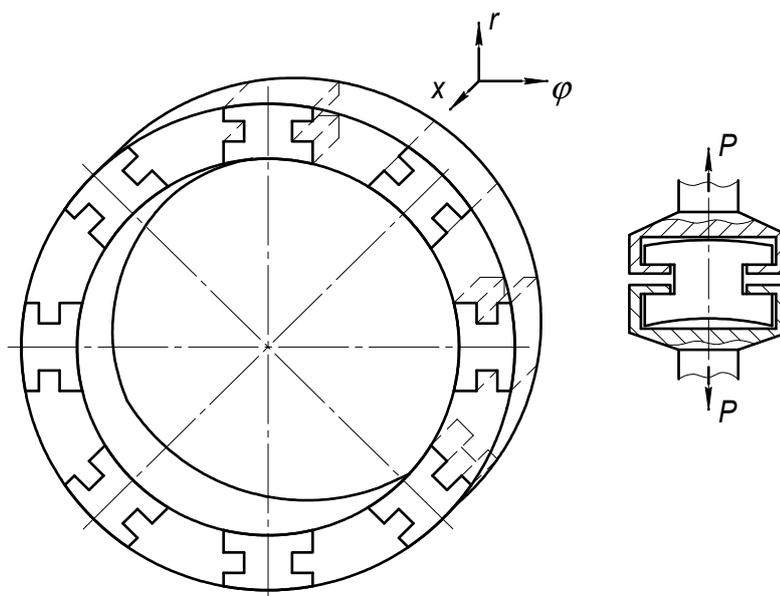


Рис. 4. Схема вырезки и испытания образцов для определения Π_r^+

Таблица 2

Результаты испытаний на прочность при растяжении в трансверсальном направлении стеклопластиков, намотанных по различным вариантам

Вариант намотки	Количество испытанных образцов	Среднее арифметическое значение Π_r^+ , МПа	$\frac{\Pi_r^+ \text{ min}}{\Pi_r^+ \text{ max}}$	Коэффициент вариации, %
I	24	16,3	$\frac{8,17}{25,8}$	24,1
II	22	10,6	$\frac{2,89}{18,7}$	27,8

В настоящее время в лабораторных испытаниях наибольшее распространение получил образец, реализующий метод изгиба короткой балки. Простая форма образца и схема нагружения (рис. 5), легкость обработки результатов испытаний обусловили использование данного метода оценки качества не только при создании новых материалов, но и при конструкторско-технологической отработке новых изделий из ПКМ.

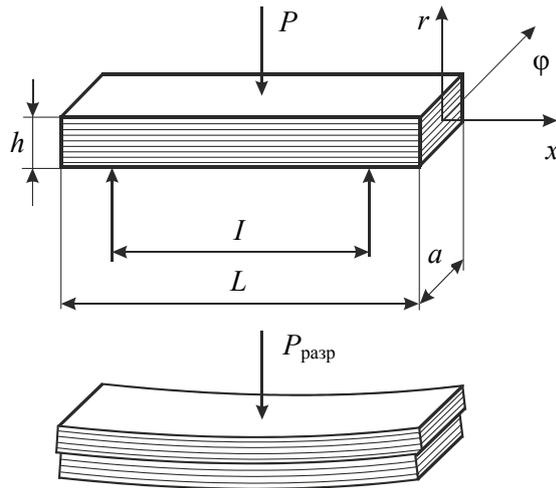


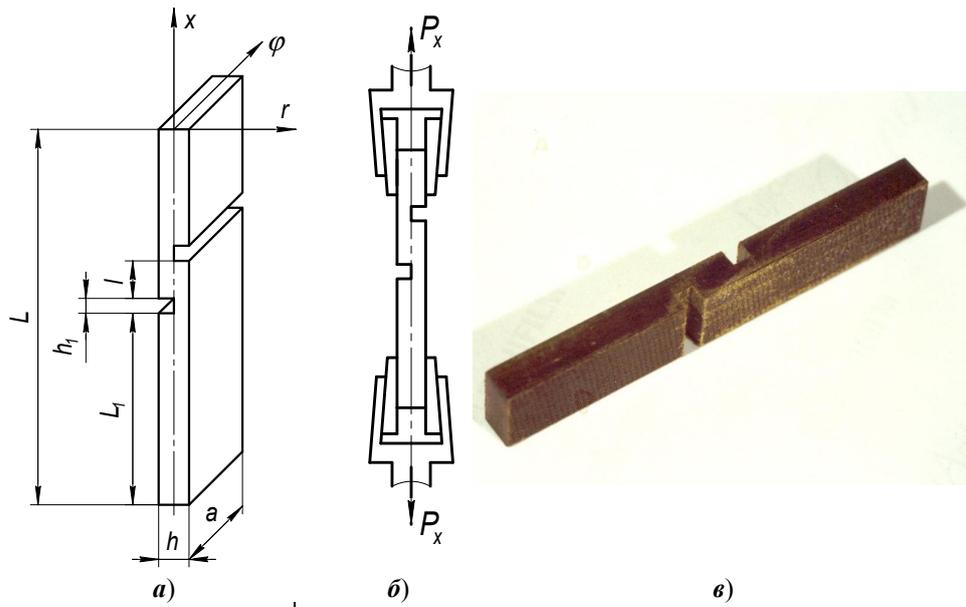
Рис. 5. Схема нагружения и деформирования образца при испытаниях на межслойный сдвиг методом изгиба

Однако полученные таким образом значения сдвиговой прочности не являются истинными и могут использоваться только для качественного сопоставления материалов, так как в расчетном сечении образца, кроме касательных напряжений, действуют также нормальные контактные напряжения, и результаты испытаний имеют завышенные значения. Более достоверных результатов можно добиться при использовании образцов, выполненных в виде брусков с надрезами (рис. 6).

Испытания в этом случае проводятся путем растяжения (сжатия) образца, при этом расчетное сечение образца $S = la$ расположено между надрезами в плоскости исследуемой поверхности; скорость нагружения – 1,5 мм/мин. Однако при использовании указанных образцов следует считаться с влиянием изгиба, обуславливающего уменьшение разрушающей нагрузки (рис. 7).

Из приведенных на рис. 8 данных [5] видно, что максимальные значения межслойного сдвига получены на образцах, которые устанавливались в специальные направляющие, предотвращающие изгиб образца, т.е. $M/EI \rightarrow 0$. Здесь величина M/EI характеризует влияние изгиба, M – изгибающий момент, E – модуль упругости материала, I – момент инерции целой части ослабленного сечения образца, т.е. $I = \frac{1}{12} a \left(\frac{h}{2} \right)^3$. При увеличении M/EI (например, при испытании более толстых образцов) прочность межслойного сдвига резко снижается.

Изложенное с достаточной точностью подтверждается экспериментальными данными (табл. 3, рис. 9), полученными на образцах (тип III), вырезанных из зоны верхнего стыковочного шпангоута аэродинамического обтекателя [6]. Материал образца – стеклопластик на основе стеклоткани Т45П и связующего 5-211Б. Для исключения влияния изгиба использован специальный захват, содержащий два вкладыша, один из которых выполнен удлиненным (рис. 10) [7].



Тип образца		Размеры					
№	Обозначение	L	a	h	L_1	h_1	l
II	ASTM Д2733-70	200	25	3	90	4	13
III	К59.343.15.009	120	16	4-10	41	4	10
IV	ПД-09.04.01.004	100	15	6-8	31	4	10

Рис. 6. Размеры (а), схема нагружения (б) и общий вид (в) образца при определении прочности при межслойном сдвиге в плоскости xr [5]

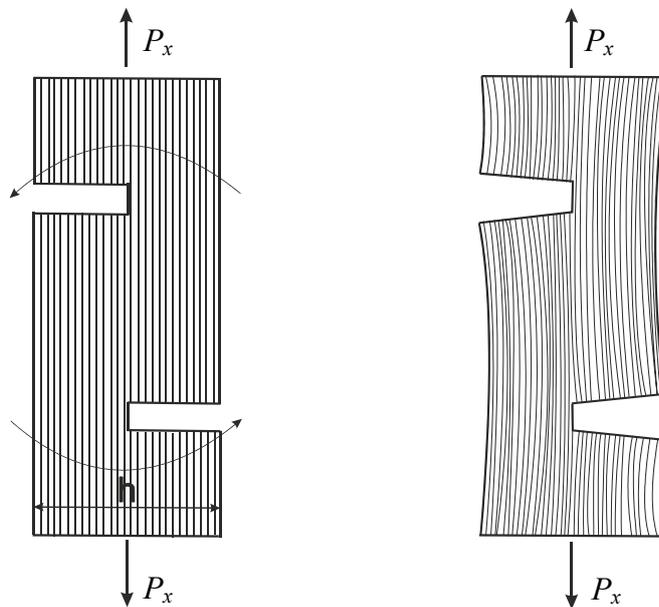


Рис. 7. Схема деформирования образца с надрезами [5]

Приведенный на рис. 11 образец [8, 9] позволяет определить прочность при межслойном сдвиге при нагружении в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

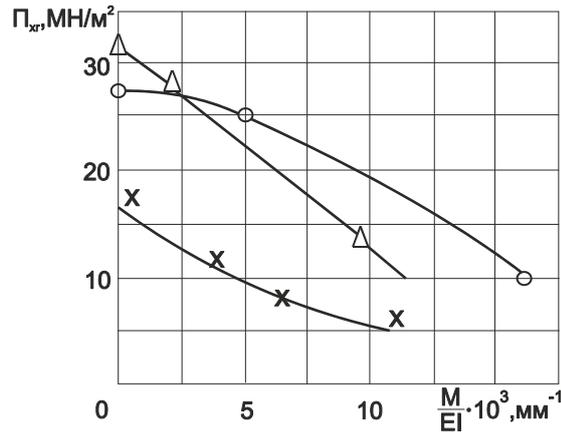


Рис. 8. Влияние изгиба образца с надрезами на замеренную прочность при межслойном сдвиге волокнистых эпоксидных стеклопластиков [4]

Таблица 3

Сравнительные результаты определения прочности межслойного сдвига

$P_{xr}, \text{МПа}$		Повышение точности измерения, %
при $M/EI = 4,8 \cdot 10^{-3}$	при $M/EI \rightarrow 0$	
29,5	31,8	27,3
24,7	35,8	
37,0	32,2	
27,0	29,5	
23,9	35,5	
–	37,0	
Среднее значение		
26,4	33,6	

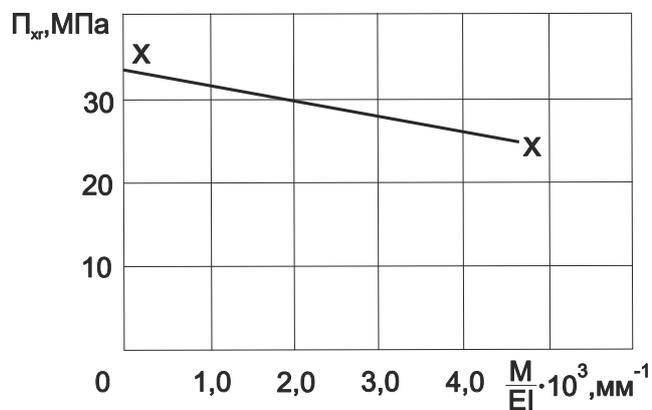


Рис. 9. Влияние изгиба образца (тип III, рис. 6) на прочность при межслойном сдвиге стеклопластика СП-Т45П/5-211-6-ВП

Образец снабжен двумя дополнительными надрезами, расположенными на тех же гранях, что и основные надрезы. Конструкция образца позволяет определить прочность при сдвиге под действием сжимающей нагрузки в перпендикулярном направлении (рис. 12).

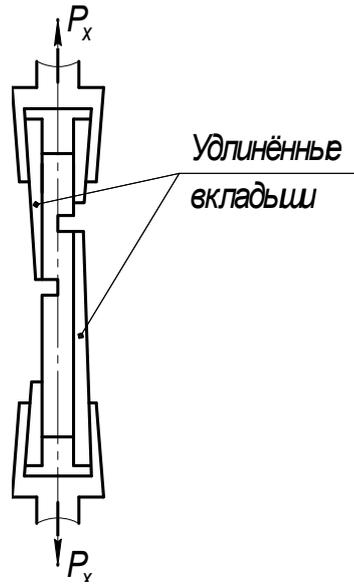


Рис. 10. Схема испытаний образца с надрезами

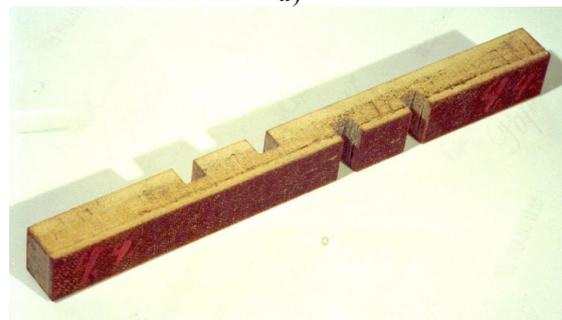
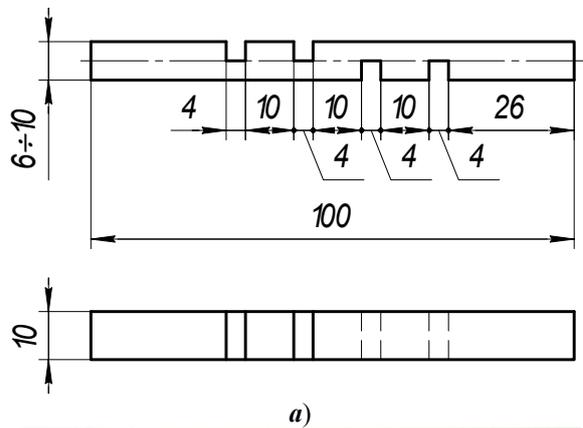


Рис. 11. Образец для определения прочности при межслойном сдвиге нагружением в двух направлениях (тип V):
 а – геометрические размеры образца; б – общий вид образца

Применение такого образца эффективно не только при испытаниях материала трубчатых заготовок. Использование его особенно целесообразно

в тех случаях, когда из-за конструктивных особенностей изделия невозможно вырезать образец для определения сдвиговой прочности в осевом направлении, например, в стыковочном шпангоуте межступенчатого отсека (рис. 13).

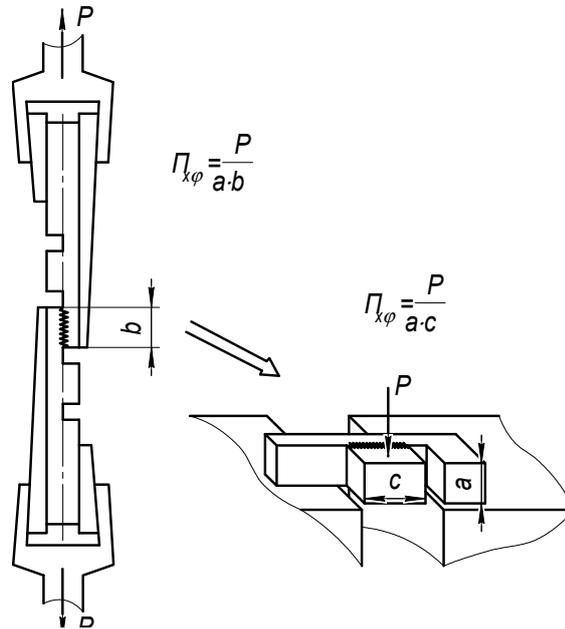


Рис. 12. Определение прочности при межслойном сдвиге нагружением образца в двух направлениях

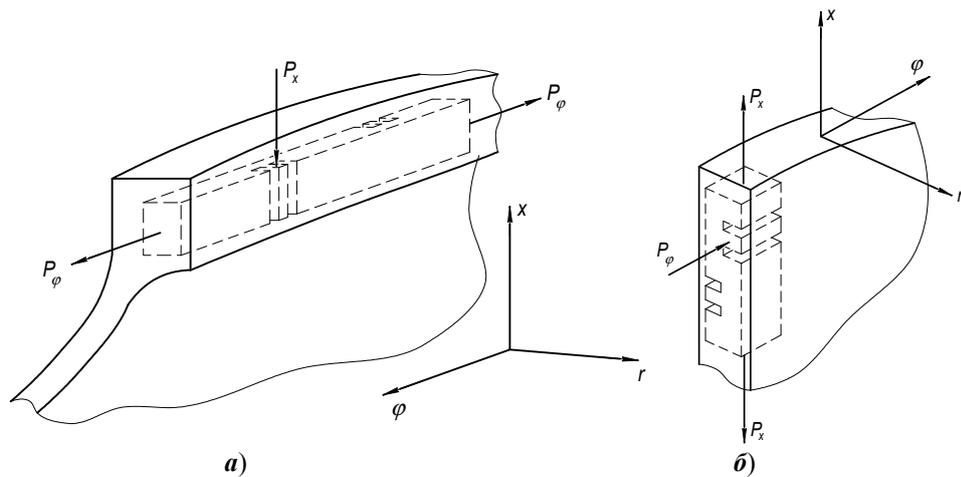


Рис. 13. Схема вырезки образцов для определения сдвиговой прочности материала нагружением в двух направлениях: *a* – из верхнего стыковочного шпангоута межступенчатого отсека; *б* – из трубчатой заготовки подшипника скольжения

Определение на одном образце двух характеристик повышает информативность исследований, достоверность результатов и дает возможность в два раза сократить количество необходимых образцов.

Результаты оценки межслойной прочности на образцах типа IV (см. рис. 7) и типа V (рис. 11) приведены в табл. 4, из которой видно, что проч-

ность при межслойном сдвиге падает на 25...28 %. При этом резко растет разброс η результатов испытаний.

Таблица 4

Межслойная прочность ПКМ трубчатых заготовок

Тип	Образец Обозначение	Количество испытанных образцов	Режим изготовления				Направление приложения нагрузки
			I		II		
			$P_{кр}$, МПа	η , %	$P_{кр}$, МПа	η , %	
IV	ПД-09.04.01.004	32	15,62	7,8	11,71	10,8	ось x
V	ПД-09.04.01.005	28	15,80	9,2	11,38	13,4	ось x
		28	15,61	9,1	11,41	12,1	ось ϕ

Таблица 5

Время на изготовление трубчатых заготовок ($\varnothing 120 \times 155$)

№ режима	Намотка, ч (с учетом подготовительно- заключительных работ)	Отверждение, ч (с учетом охлаждения со скоростью 0,25 °C/мин)	Общее время на изготовление трубчатой заготовки, ч
I	0,16	22,00	22,16
II	0,20	28,70	28,90
III	0,24	35,30	35,54

К недостаткам метода послойного отверждения следует также отнести и то, что многократное отверждение последовательно наматываемых пакетов удлиняет технологический процесс изготовления трубчатой заготовки в целом. На 60 % увеличивается время изготовления трубчатой заготовки, намотанной и отвержденной по режиму III (табл. 5), на 38 % – трудоемкость, общие энергозатраты – на 29 %.

Таким образом, метод намотки с послойным отверждением позволяет эффективно влиять на поле остаточных напряжений в материале и добиться исключения дефектов в толстостенной трубчатой заготовке подшипника скольжения. В то же время необходимо учитывать вышеуказанные недостатки описанного метода и использовать дополнительные способы усиления толстостенных изделий в радиальном направлении.

Список литературы

1. **Тарнопольский, Ю. М.** Компенсация температурных напряжений в изделиях из стеклопластика методом послойной намотки / Ю. М. Тарнопольский, Г. Г. Портнов, Ю. Б. Спридзанс // Механика полимеров. – 1972. – № 4. – С. 640–645.
2. **Благонадежин, В. Л.** Остаточные напряжения в кольцах из стеклопластика, полученных методом послойного отверждения / В. Л. Благонадежин, В. Г. Перевозчиков // Механика полимеров. – 1972. – № 1. – С. 174–176.
3. **Инденбаум, В. М.** Расчет остаточных напряжений в намоточных изделиях, образованных методом послойного отверждения / В. М. Инденбаум, В. Г. Перевозчиков // Механика полимеров. – 1972. – № 2. – С. 284–289.
4. **Зиновьев, Р. С.** Экспериментальная оценка остаточных напряжений в трубчатых заготовках подшипников скольжения / Р. С. Зиновьев, Ю. А. Мережко // Неод-

- народные конструкции : тр. XIX Рос. шк. и XXIX Уральского семинара. – Екатеринбург : Изд-во Уральского отделения РАН, 1999. – С. 30–39.
5. **Тарнопольский, Ю. М.** Методы статических испытаний армированных пластиков / Ю. М. Тарнопольский, Т. Я. Кинцис. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1981. – 272 с.
 6. **Додин, Г. В.** Применение композиционных материалов в разработках КБ имени академика В. П. Макеева / Г. В. Додин, В. Л. Клейман, И. М. Крымский // Баллистические ракеты подводных лодок / под общ. ред. И. И. Величко. – Миасс : Гос. ракетный центр «КБ имени академика В. П. Макеева», 1994. – 279 с.
 7. А. С. 238110 СССР. Захват для образца при определении прочности на межслоевой сдвиг / Р. С. Зиновьев, В. М. Титов, В. Н. Шалыгин. Заявка № 3121796/25-28, 12.08.85; МКЛ G01N 3/04. 1985.
 8. **Зиновьев, Р. С.** Методы оценки качества при изготовлении тонкостенных подкрепленных оболочек из ПКМ / Р. С. Зиновьев, В. Д. Клейменов, И. М. Крымский, О. Л. Петровский, З. С. Салихов, В. Н. Шалыгин // Обзор. Сер. VII. № 96. ЦНТИ «Поиск», 1989. – 73 с.
 9. А. С. 254 084 СССР. Образец для испытания композиционного материала на прочность при сдвиге / Р. С. Зиновьев, В. М. Титов, В. А. Борисов. Заявка 3144561/23-05, 6.08.86; МКЛ G01N 1/28. 1986.

References

1. Tarnopol'skiy Yu. M., Portnov G. G., Spridzans Yu. B. *Mekhanika polimerov* [Polymer mechanics]. 1972, no. 4, pp. 640–645.
2. Blagonadezhin V. L., Perevozchikov V. G. *Mekhanika polimerov* [Polymer mechanics]. 1972, no. 1, pp. 174–176.
3. Indenbaum V. M., Perevozchikov V. G. *Mekhanika polimerov* [Polymer mechanics]. 1972, no. 2, pp. 284–289.
4. Zinov'ev R. S., Merezhko Yu. A. *Neodnorodnye konstruksii: tr. XIX Ros. shk. i XXIX Ural'skogo seminara* [Heterogeneous constructions: proceedings of XIX Russian school XXIX Ural seminar]. Ekaterinburg: Izd-vo Ural'skogo otdeleniya RAN, 1999, pp. 30–39.
5. Tarnopol'skiy Yu. M., Kintsis T. Ya. *Metody staticheskikh ispytaniy armirovannykh plastikov. 3-e izd., pererab. i dop.* [Methods of statistical testing of armoured plastics. 3rd edition, revised and supplemented]. Moscow: Khimiya, 1981, 272 p.
6. Dodin G. V., Kleyman V. L., Krymskiy I. M. *Ballisticheskie rakety podvodnykh lodok* [Ballistic submarine-based rockets]. Miass: Gos. raketnyy tsentr "KB imeni akademika V. P. Makeeva", 1994, 279 p.
7. A. S. 238110 USSR. *Zakhvat dlya obratzsa pri opredelenii prochnosti na mezhshloevoy sdvig* [Grip for sample during determination of interlayer shift strength]. R. S. Zinov'ev, V. M. Titov, V. N. Shalygin. Application no. 3121796/25-28, 12.08.85; MKL G01N 3/04. 1985.
8. Zinov'ev R. S., Kleymenov V. D., Krymskiy I. M., Petrovskiy O. L., Salikhov Z. S., Shalygin V. N. *Obzor. Seriya VII.* [Review. Series VII]. No. 96. Center of research information "Poisk". 1989, 73 p.
9. A. S. 254 084 USSR. *Obrazets dlya ispytaniya kompozitsionnogo materiala na prochnost' pri sdvige* [Sample for testing composite materials of strength at shift]. R. S. Zinov'ev, V. M. Titov, V. A. Borisov. Application 3144561/23-05, 6.08.86; MKL G01N 1/28. 1986.

Зиновьев Радий Сергеевич

кандидат технических наук, доцент,
технический директор Группы научно-
промышленных компаний «Полидор»,
(Россия, г. Челябинск, ул. Федорова, 1а)

E-mail: zinoviev@polidor.ru

Zinov'ev Rادیy Sergeevich

Candidate of engineering sciences, associate
professor, technical director of the Scientific
industrial group of companies "Polidor"
(1a Fyodorova street, Chelyabinsk, Russia)

Савицкий Владимир Яковлевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра № 11, Пензенский филиал
Военной академии материально-
технического обеспечения (Россия,
г. Пенза-5)

E-mail: W.savis@gmail.com

Savitskiy Vladimir Yakovlevich

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department № 11, Penza branch
of the Military Academy of Maintenance
Supplies (Penza-5, Russia)

Мережко Юрий Александрович

кандидат технических наук, доцент,
председатель Совета директоров Группы
научно-промышленных компаний
«Полидор» (Россия, г. Челябинск,
ул. Федорова, 1а)

E-mail: merezhko@inbox.ru

Merezhko Yuriy Aleksandrovich

Candidate of engineering sciences, associate
professor, chairman of the Board
of directors of the Scientific industrial
group of companies "Polidor"
(1a Fyodorova street, Chelyabinsk, Russia)

Ивановский Владимир Сергеевич

доктор технических наук, профессор,
начальник Военной академии
материально-технического обеспечения
имени генерала армии А. В. Хрулева
(Россия, г. Санкт-Петербург, набережная
Макарова, 8)

E-mail: W.savis@gmail.com

Ivanovskiy Vladimir Sergeevich

Doctor of engineering sciences, professor,
head of the Military Academy
of Maintenance Supply named after army
general A. V. Khrulev (8 Makarova
embankment, Saint-Petersburg, Russia)

УДК 65.015.13+678.86

Зиновьев, Р. С.

Исследование характеристик армированных реактопластов при изготовлении подшипников скольжения методом послойной намотки / Р. С. Зиновьев, В. Я. Савицкий, Ю. А. Мережко, В. С. Ивановский // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 4 (28). – С. 140–155.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ЧЕРВЯЧНЫХ ПЕРЕДАЧАХ

Аннотация. *Актуальность и цели.* В связи с улучшением методов проектирования и технологии производства червячные передачи обладают большим потенциалом использования в различных машинах вместо цилиндрических передач. Одной из главных проблем при проектировании червячных механизмов является решение тепловых задач. В данной работе анализируются вопросы расчета и моделирования температурных полей в червячной передаче, в том числе с использованием автоматизированного проектирования. *Материалы и методы.* Решение задачи теплового проектирования червячного редуктора можно вести на основе аналитических методов или на основе метода конечных элементов. *Результаты.* Для решения задач теплообмена были разработаны расчетные параметрические модели двух конструкций червячных редукторов с горизонтальным и вертикальным расположением червяка. На основе разработанных численных алгоритмов может быть точно определена площадь поверхности корпусов редукторов, в том числе площадь рабочей камеры корпуса, что позволяет улучшить точность расчетов. Результаты численного моделирования показали, что обдув вентилятором улучшает теплоотвод при установке вентилятора как на вал червяка, так и на вал червячного колеса. *Выводы.* Для улучшения теплоотвода в червячных передачах возможно применение специальных вентиляторов. Использование моделирования метода конечных элементов позволяет отказаться от натурных экспериментов с изготовлением опытных образцов. Теплоотвод для разработанных конструкций корпусов редукторов лучше на 20 % (на основе результатов численного моделирования) по сравнению с результатами традиционных расчетов. Дальнейшим путем улучшения результатов численного моделирования является решение ряда контактных задач с учетом сил трения, в частности, в зоне контакта червяка и колеса в подшипниковых узлах.

Ключевые слова: червячная передача, численное моделирование, зубчатые передачи, теплообмен.

А. Н. Соболев, М. Г. Косов

MODELING OF HEAT TRANSFER IN WORM GEARS

Abstract. *Background.* With improved methods of design and production technology worm gears have great potential of use in various machines instead of cylindrical gears. An important problem in the design of worm gears is the solution of thermal problems. The article analyzes the problems of calculation and modeling of temperature fields in the worm gears, including the use of computer-aided design. *Materials and methods.* Solution of the problem of thermal design of worm gears can be carried on the basis of analytical methods or based on the finite element method (FEM). *Results.* To solve the problems of heat transfer the authors developed computational models of two parametric designs of worm gear units with horizontal and vertical location of the worm. On the basis of numerical algorithms the surface area of the gear case can be accurately determined, including the area of the working chamber of the body, thereby improving the accuracy of calculations. The results of numerical simulations have shown that the air cooling fan improves heat dissipation

when the fan is mounted on the shaft of the worm as well as on the worm gear. *Conclusions.* To improve the heat dissipation in worm gears it is possible to use special fans. The usage of finite element modeling eliminates the full-scale experiments with the manufacture of prototypes. Heat dissipation developed for the gear hull is better by 20 % (based on the simulation results) compared with the results of conventional calculations. A further way to improve the results of numerical simulation is to solve some problems of contact with the friction forces, in particular in the contact area of the worm wheel and the bearing assemblies.

Key words: worm gear, numerical modeling, gears, heat transfer.

Введение и постановка задачи

С улучшением методов проектирования и технологии производства червячные передачи обладают большим потенциалом использования в различных машинах вместо цилиндрических передач. Червячные редукторы обладают рядом преимуществ: компактные габариты при большом передаточном отношении; ограниченное количество подвижных частей, что позволяет снизить расходы на обслуживание и ремонт; бесшумность хода передачи; устойчивость к динамическим нагрузкам. Однако следует выделить и недостатки: относительно низкий КПД; большое тепловыделение и необходимость проведения дополнительных мероприятий для теплоотвода; повышенный износ; специальные требования к точности сборки. В данной работе анализируются вопросы расчета и моделирования температурных полей в червячной передаче, в том числе с использованием автоматизированного проектирования.

При проектировании привода с червячной передачей основными критериями качества являются:

- 1) тепловые параметры;
- 2) износостойкость элементов передачи;
- 3) прочность зубьев.

Показатели мощности червячных приводов часто основываются на тепловых расчетах.

Температура смазочного материала в зоне зацепления колеса и червяка – лимитирующий фактор тепловой мощности передачи [1]. При большой температуре ширина масляного слоя может быть недостаточной в зоне зацепления. Кроме того, резкое изменение температуры может повлиять на структуру материала колеса из бронзы, что в дальнейшем может привести к разрушению колеса.

При проектировании червячного редуктора проектировщик должен решать следующие задачи:

- 1) рациональное проектирование корпуса редуктора;
- 2) обеспечение интенсивного движения смазочного материала внутри корпуса;
- 3) расчет установки дополнительных устройств отвода тепла (например, установка вентилятора на червячном валу или охлаждение жидкостью).

Исследование теплообмена традиционным методом

Решение задачи теплового проектирования червячного редуктора можно вести на основе аналитических положений [1–3] или на основе метода конечных элементов (МКЭ) [4, 5].

Важной задачей при проектировании червячного редуктора является тепловой расчет корпуса и передачи. Тепло, рассеиваемое корпусом передачи, примем

$$Q = \Delta T S k \text{ (Вт)}, \quad (1)$$

где ΔT – разность между максимально допустимой температурой поверхности корпуса и температурой окружающего воздуха, К; S – площадь поверхности корпуса, м²; k – коэффициент теплообмена, Вт/(м²·К);

$$\Delta T = \frac{T_M - T_A}{1,03 + 0,01\sqrt{0,1n_1}} - 1,5 \text{ (К)}, \quad (2)$$

где T_M – максимально допустимая температура масла в редукторе (К), указывается в паспорте на масло производителем; T_A – температура атмосферного воздуха (например, 293 К); n_1 – число оборотов червяка (об/мин).

Внешняя поверхность корпуса может быть рассчитана по следующей формуле:

$$S = 9 \cdot 10^{-5} a^{K1} \text{ (м}^2\text{)}, \quad (3)$$

где $K1 = 1,85$ для корпусов редукторов с ребрами охлаждения, $K1 = 1,8$ для корпусов без ребер охлаждения; a – межосевое расстояние, мм.

При проектировании редуктора в автоматизированной системе площади поверхностей корпуса и элементов передачи могут быть вычислены автоматически наряду с массовыми и инерционными характеристиками. Таким образом, формулу (3) в расчетах может заменить программный макрос автоматизированной системы.

Коэффициент теплообмена определим по следующей формуле:

$$k = 6,6 \cdot 10^{-3} \left(1 + K2 \left(\frac{n_1}{60} \right)^{0,75} \right) K3 \text{ (Вт/(м}^2\text{·К))}, \quad (4)$$

где $K2 = 0,4$ – при установке вентилятора на червячном валу, $K2 = 0,23$ – без установки вентилятора; $K3 = 0,8$ для червячной передачи с верхним расположением червяка, $K3 = 1,0$ для червячной передачи с нижним расположением червяка.

При конструировании корпуса редуктора учитывается, что червячное колесо должно погружаться в масло на 30 % его диаметра.

Потеря энергии P_{Π} в червячном редукторе может быть вычислена по следующей формуле:

$$P_{\Pi} = P_{\text{вход}} - \eta P_{\text{вход}} \text{ (Вт)}, \quad (5)$$

где $P_{\text{вход}}$ – входная мощность, Вт; η – КПД червячной передачи (может меняться в процессе приработки).

Величина рассеивания тепла в червячном редукторе должна быть больше величины потери энергии: $Q \geq P_{\Pi}$.

Червячная передача работает в условиях интенсивного нагрева, поступающего непосредственно из зоны контакта. В этой связи элементы ее кон-

струкции находятся под воздействием термического нагружения, в результате чего возникают их термоупругие перемещения, влияющие на положение ориентируемых поверхностей.

Исследование теплообмена МКЭ

При расчетах МКЭ может быть принято допущение, что распространение тепла в передаче происходит за счет теплопроводности материалов, конвективного и лучистого обмена между высоко нагретыми и менее нагретыми элементами конструкции червячного редуктора.

Алгоритм расчета реализуется таким образом, что вначале по уравнению теплового баланса (теплопроводности) производится расчет температур узлов каждого элемента конструкции, а затем производится расчет температурных деформаций (напряжений) элемента.

Уравнение теплопроводности, описывающее тепловой режим в трехмерном сплошном теле, имеет вид [4]:

$$K_{xx} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K_{yy} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + K_{zz} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q_m = 0, \quad (6)$$

где T – температура, К; K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} – коэффициенты теплопроводности анизотропного материала в направлении местных осей координат элемента X, Y и Z соответственно, Вт/(м·К); Q_m – источник тепла внутри элемента, который считается положительным, если тепло подводится к элементу, Вт/м².

Для уравнения (6) существует три различных типа граничных условий.

Если известна температура или закон распределения температуры по поверхности элемента, то граничные условия запишутся следующим образом:

$$T = T(S_1), \quad (7)$$

где $T(S_1)$ – температура на границе элемента в функции координат точек поверхности S_1 элемента.

Если на границе поверхности элемента S_2 происходит конвективный теплообмен, который характеризуется величиной $h(T - T_\infty)$, или задан поток тепла q , то граничное условие имеет вид

$$K_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} l_x + K_{yy} \frac{\partial T}{\partial y} l_y + K_{zz} \frac{\partial T}{\partial z} l_z + h(T - T_\infty) + q = 0, \quad (8)$$

где h – коэффициент теплообмена, Вт/(м²·К); T – температура на границе элемента (неизвестная), град; T_∞ – температура окружающей среды (известная, обычно 273 К), К; l_x, l_y, l_z – направляющие косинусы вектора нормали к исследуемой поверхности; q – поток тепла, подводимый к элементу, Вт/м².

Следует иметь в виду, что поток тепла q и конвективная потеря тепла $h(T - T_\infty)$ не имеют места на одном и том же участке поверхности границы элемента.

Уравнение (6) вместе с граничными условиями (7) и (8) описывает распространение тепла в трехмерном элементе.

С вариационной точки зрения решение уравнения (6) с граничными условиями (7), (8) эквивалентно нахождению минимума функционала [3, 4]:

$$\chi = \int_{V_T} \frac{1}{2} \left[K_{xx} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + K_{yy} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + K_{zz} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 - 2QT \right] dV + \int_{S_T} \left[q_T T + \frac{1}{2} h_T (T - T_\infty)^2 \right] dS, \quad (9)$$

где V_T, S_T – соответственно объем и площадь поверхности теплообмена элемента.

Процесс минимизации функционала (9) на некотором множестве конечных элементов узловых значений описан в [5].

Матрица теплопроводности отдельного конечного элемента имеет вид

$$\left[K_T^{(e)} \right] = \int_{V^{(e)}} \left[B^{(e)} \right]^T \left[D_T^{(e)} \right] \left[B^{(e)} \right] dV + \int_{S_2^{(e)}} h \left[N^{(e)} \right]^T \left[N^{(e)} \right] dS. \quad (10)$$

Вектор-столбец (вектор нагрузки элемента) правых частей уравнений для e -го конечного элемента определяется выражением

$$\left\{ f^{(e)} \right\} = - \int_{V^{(e)}} Q \left[N^{(e)} \right]^T dV + \int_{S_1^{(e)}} q \left[N^{(e)} \right]^T dS + \int_{S_2^{(e)}} h T_\infty \left[N^{(e)} \right]^T dS. \quad (11)$$

Здесь $\left[D_T^{(e)} \right]$ – матрица теплопроводности элемента:

$$\left[D_T^{(e)} \right] = \begin{bmatrix} K_{xx}^{(e)} & 0 & 0 \\ 0 & K_{yy}^{(e)} & 0 \\ 0 & 0 & K_{zz}^{(e)} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Значение температуры в зоне зацепления примем равной максимально допустимой температуре масла в редукторе.

Теплопроводность стыковых соединений элементов червячной передачи моделируется системой температурных связей (стержней) с общим коэффициентом теплопроводности. В этом случае, если температура поверхности i -го элемента не равна температуре поверхности j -го элемента, считалось, что через стык идет тепловой поток интенсивности Q_i и Q_j :

$$Q_i = \frac{kS}{m} (T_i - T_j); \quad (13)$$

$$Q_j = \frac{kS}{m} (T_j - T_i), \quad (14)$$

где S – площадь стыка, m ; m – число связей (стержней), моделирующих стыковое соединение.

С учетом (13), (14) глобальная матрица теплопроводности для узлов i и j стержня преобразуется следующим образом:

$$\left[K_T^{(e)} \right] = \begin{bmatrix} - & - & - & - & - \\ K_{i_1} & - \left(K_{ij} + \frac{kS}{m} \right) & - \left(K_{ji} - \frac{kS}{m} \right) & & \\ K_{j_1} & - \left(K_{ji} - \frac{kS}{m} \right) & - \left(K_{jj} - \frac{kS}{m} \right) & & \\ - & - & - & - & - \end{bmatrix} \quad (15)$$

Аналогичным образом матрица $\left[K_T^{(e)} \right]$ преобразуется для всех узлов, моделирующих стыковое соединение.

Алгоритм решения задачи исследования теплообмена и температурных деформаций может быть следующий:

1. Описание параметрической геометрии червячного редуктора с помощью расчетных макроэлементов или твердотельной модели с дальнейшим разбиением на конечные элементы.

2. Задание типов, используемых конечных элементов; задание свойств материалов, коэффициентов теплопроводности и теплообмена.

3. Определение источников тепла внутри элементов; потоков тепла через грани элементов; температуры окружающей среды. Задание координат узлов, в которых приложены внешние температурные воздействия, значений температур в узлах.

4. Формирование матрицы $C1$ координат тетраэдера; преобразование координат узлов тетраэдера из системы координат «кирпича» в систему координат тетраэдера; формирование матрицы C координат тетраэдера в местной системе координат; обращение матрицы C .

5. Вычисление интегралов первого и второго слагаемого матрицы теплопроводности тетраэдера.

6. Формирование глобальной матрицы теплопроводности модели червячного редуктора.

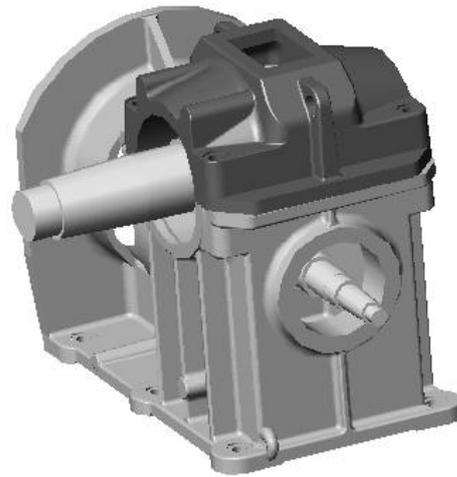
7. Формирование вектора внешних температурных воздействий.

8. Внесение граничных условий в глобальную матрицу теплопроводности модели.

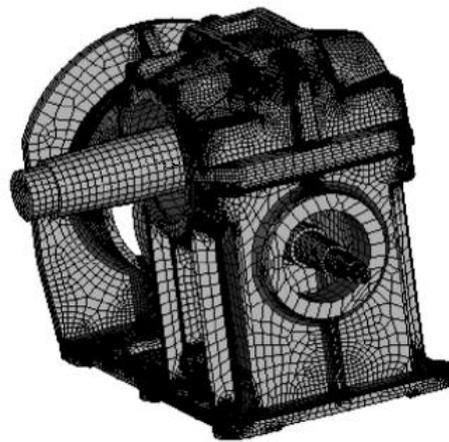
9. Решение системы линейных дифференциальных уравнений методом Гаусса.

Результаты работы

1. Для решения задач теплообмена были разработаны (спроектированы) расчетные параметрические модели двух конструкций червячных редукторов с горизонтальным и вертикальным расположением червяка (рис. 1, 2). Данные червячные редукторы могут быть использованы в конструкциях лифтовых лебедок.



a)



б)

Рис. 1. Модель червячного редуктора для привода с горизонтальным расположением электродвигателя: *a* – визуальная модель; *б* – модель для численного анализа

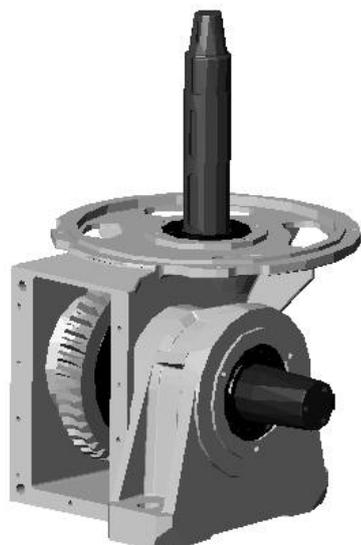
2. На основе разработанных численных алгоритмов может быть точно определена площадь поверхности корпусов редукторов, в том числе площадь рабочей камеры корпуса, что позволяет улучшить точность расчетов.

3. Результаты численного моделирования показали, что обдув вентилятором улучшает теплоотвод при установке вентилятора как на вал червяка, так и на вал червячного колеса. В данной работе не приводятся количественные результаты – только качественные, так как модели конструкций механизмов параметрические и варьируются в зависимости от других факторов, например габаритов и свойств материалов.

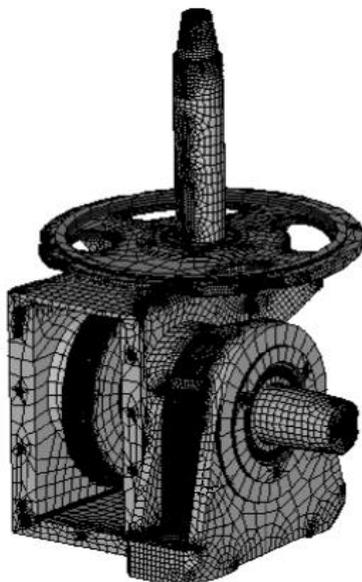
Выводы

1. Для улучшения теплоотвода в червячных передачах возможно применение специальных вентиляторов.

2. Использование моделирования МКЭ позволяет отказаться от натуральных экспериментов с изготовлением опытных образцов.



а)



б)

Рис. 2. Модель червячного редуктора для привода с вертикальным расположением электродвигателя: *а* – визуальная модель; *б* – модель для численного анализа

3. Теплоотвод для разработанных конструкций корпусов редукторов лучше на 20 % (на основе результатов численного моделирования) по сравнению с результатами по формулам (1)–(3). Таким образом, формулы (1)–(3) обеспечивают хороший запас по возможности теплоотвода при выполнении расчетов без использования средств численного моделирования.

4. Дальнейшим путем улучшения результатов численного моделирования является решение ряда контактных задач с учетом сил трения, в частности, в зоне контакта червяка и колеса и подшипниковых узлах. Однако при решении в совокупности нескольких задач с большим количеством конечных

элементов требуются большие машинные ресурсы, а также временные затраты на алгоритмизацию и программную реализацию.

Список литературы

1. **Яновски, Л.** Проектирование механического оборудования лифтов : моногр. / Л. Яновски. – 3-е изд. – М. : Изд-во АСВ, 2005. – 336 с.
2. **Жуков, К. П.** Проектирование деталей и узлов машин / К. П. Жуков, Ю. Е. Гуревич. – М. : Станкин, 2004. – 671 с.
3. Illés Dudás. *The Theory and Practice of Worm Gear Drives* / Illés Dudás. – London : Penton Press, 2000. – 337 p.
4. **Зенкевич, О.** Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М. : Мир, 1975. – 541 с.
5. **Сегерлинд, Л.** Применение метода конечных элементов : пер. с англ. / Л. Сегерлинд. – М. : Мир, 1979. – 392 с.

References

1. Yanovski L. *Proektirovanie mekhanicheskogo oborudovaniya liftov: monogr.* [Design of mechanical equipment of lifts: monograph]. Moscow: Izd-vo ASV, 2005, 336 p.
2. Zhukov K. P., Gurevich Yu. E. *Proektirovanie detaley i uzlov mashin* [Design of machine parts and assemblies]. Moscow: Stankin, 2004, 671 p.
3. Illés Dudás. *The Theory and Practice of Worm Gear Drives*. London: Penton Press, 2000, 337 p.
4. Zenkevich O. *Metod konechnykh elementov v tekhnike* [Method of finite elements in technology]. Moscow: Mir, 1975, 541 p.
5. Segerlind L. *Primenenie metoda konechnykh elementov: per. s angl.* [Application of finite element method: translation from English]. Moscow: Mir, 1979, 392 p.

Соболев Александр Николаевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра станков, Московский
государственный технологический
университет «Станкин» (Россия,
г. Москва, Вадковский переулок, 3а)

E-mail: t-64@mail.ru

Sobolev Aleksandr Nikolaevich

Candidate of engineering sciences, associate
professor, sub-department of machine tools,
Moscow State Technological University
"Stankin" (3a Vadkovskiy lane, Moscow,
Russia)

Косов Михаил Георгиевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой основ
конструирования машин, Московский
государственный технологический
университет «Станкин» (Россия,
г. Москва, Вадковский переулок, 3а)

E-mail: t-64@mail.ru

Kosov Mikhail Georgievich

Doctor of engineering sciences, professor,
head of sub-department of basic machine
construction, Moscow State Technological
University "Stankin" (3a Vadkovskiy lane,
Moscow, Russia)

УДК 62-233.3/9:004.9

Соболев, А. Н.

Моделирование теплообмена в червячных передачах / А. Н. Соболев, М. Г. Косов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 4 (28). – С. 156–164.

Д. П. Родионов, Ю. В. Хлебникова,
Г. В. Козлов, И. В. Гервасьева, Т. Р. Суаридзе

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕКСТУРЫ ЖЕЛЕЗНИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ $Fe_{64}Ni_{36}$ И $Fe_{50}Ni_{50}$ МЕТОДОМ ДИФРАКЦИИ ОБРАТНО ОТРАЖЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ¹

Аннотация. *Актуальность и цели.* Возможность успешной реализации в Fe-Ni сплавах с ГЦК-решеткой очень острой кубической текстуры, приближающейся к монокристалльной, их достаточно высокие механические свойства, способность воспринимать затравочные ориентированные оксидные слои из SeO_2 или Y_2O_3 , совершенная текстура отжига позволяют использовать металлические подложки из Ni-Fe сплавов не только в технологии высокотемпературных сверхпроводников второго поколения, но и для других многослойных композиций, например, в электронной технике. Целью данной работы является исследование закономерностей формирования текстуры первичной рекристаллизации в сплавах $Fe_{64}Ni_{36}$ и $Fe_{50}Ni_{50}$ в зависимости от условий отжига. *Материалы и методы.* Для выплавки лабораторных сплавов $Fe_{64}Ni_{36}$ и $Fe_{50}Ni_{50}$ использовался никель чистотой 99,99 % и карбонильное железо чистотой 99,97 %. Для оценки совершенства кубической текстуры в металлической ленте и исследования ориентации рекристаллизованных зерен в плоскости текстурованной ленты-подложки в работе использован метод дифракции обратно отраженных электронов на сканирующих электронных микроскопах Regasus «Quanta-200» и Jeol JSM 840A. Кинетика рекристаллизации деформированных лент исследовалась на dilatометре Ulvac Sincu-riku. Для исследования микроструктуры применялся оптический микроскоп «Neophot-30». *Результаты.* Результаты исследования свидетельствуют о возможности реализации в сплавах $Fe_{64}Ni_{36}$ и $Fe_{50}Ni_{50}$ острой кубической текстуры рекристаллизации, приближающейся к монокристалльной. *Выводы.* 1. Легирование никеля железом приводит к значительному увеличению параметра решетки сплава, однако, в отличие от легирования другими *d*-переходными металлами, это не приводит к изменению типа текстуры деформации сплавов, что, в свою очередь, позволяет получить при отжиге острую кубическую текстуру во всей области существования ГЦК Fe-Ni сплавов. 2. Для сплава $Fe_{50}Ni_{50}$ определен оптимальный режим рекристаллизационного отжига 1050 °C в течение 1 ч, при котором удастся реализовать очень острую кубическую текстуру, близкую к монокристалльной с содержанием двойниковых зерен на поверхности текстурованной ленты менее 1 %. 3. В инваре $Fe_{64}Ni_{36}$ после всех режимов рекристаллизационного отжига реализуемая острая кубическая текстура дает возможность использования тонких лент из этого сплава в качестве подложек в технологии высокотемпературных сверхпроводников второго поколения, но немного уступает по степени совершенства текстуре пермаллоя $Fe_{50}Ni_{50}$.

Ключевые слова: железоникелевые сплавы, холодная деформация прокаткой, отжиг, рекристаллизация, совершенная кубическая текстура, дифракция электронов.

¹ Работа выполнена по программе РАН (тема «Структура», № гос. регистр. 01201064335), при частичной финансовой поддержке гранта № 12-П-2-1015 Программы Президиума РАН.

D. P. Rodionov, Yu. V. Khlebnikova,
G. V. Kozlov, I. V. Gervas'eva, T. R. Suaridze

STUDY OF TEXTURES OF FE-NI ALLOYS FE₆₄NI₃₆ AND FE₅₀NI₅₀ WITH BACK-SCATTERED ELECTRON DIFFRACTION

Аннотация. *Background.* Possibility of successful realization in Fe-Ni alloys with fcc lattice of a very pointed cubic texture, tending to a monocrystal one, their quite high mechanical properties, ability to take inoculating oriented oxide layers CeO₂ or Y₂O₃, perfect annealing texture allow using a metal back of Ni-Fe alloys not only in technology of high-temperature superconductors (HTSC) of second generation, but also for other multilayer compositions, for example, in electronic engineering. The article is aimed at researching the regularities of formation of primary recrystallization textures in alloys Fe₆₄Ni₃₆ и Fe₅₀Ni₅₀ depending on the annealing conditions. *Materials and methods.* For melting the laboratory alloys Fe₆₄Ni₃₆ and Fe₅₀Ni₅₀ the researchers used nickel of 99,99 % purity and carbonyl iron of 99,97 % purity. To assess the perfection of cubic texture in the metal tape and to research the orientation of recrystallized grains in the plance of textured tape-backing the authors used the method of back-scattered electron diffraction on scanning electronic microscopes Pegasus «Quanta-200» and Jeol JSM 840A. Recrystallization kinetics of deformed tapes was researched on the dilatometer Ulvac Sincu-riku. To research the microstructure the authors used the optical microscope «Neophot-30». *Results.* The research results prove the possibility of realization of alloys Fe₆₄Ni₃₆ and Fe₅₀Ni₅₀ with pointed cubic texture of recrystallization, tending to a monocrystal one. *Conclusions* 1. Alloying of nickel with iron leads to a significant increase of the alloy lattice parameter, however, unlike alloying with other *d*-transition metals, it leads to no changes of the alloy deformation texture type, and this by-turn allows obtaining the pointed cubic texture in the whole area of fcc Fe-Ni alloys existence during annealing. 2. For the alloy Fe₅₀Ni₅₀ the authors determined an optimal mode of recrystallization of annealing at 1050 °C for 1 hour, during which it is possible to realize a very pointed cubic texture, tending to a monocrystal one with presence of twin grains on the surface of the textured tape of less than 1 %. 3. In the invar Fe₆₄Ni₃₆ after all modes of recrystallizing annealing the realized pointed cubic texture allows using thin tapes from the said alloy as the backing in technology of HTSC of second generation, but lags a little behind in the level of Fe₅₀Ni₅₀ permalloy texture perfection.

Key words: Fe-Ni alloys, cold rolling with some degree of deformation, annealing, recrystallization, perfect cubic texture, electron diffraction.

Введение

В последнее десятилетие в литературе широко обсуждается вопрос об использовании Fe-Ni сплавов с ГЦК-решеткой в качестве подложек для ленточных высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) второго поколения. Основанием для использования некоторых Fe-Ni сплавов в качестве подложек в многослойных композициях служит тот факт, что в этих сплавах достаточно успешно может быть реализована очень острая кубическая текстура, приближающаяся к монокристалльной [1–4]. Например, в работе [5] использовали текстурованную ленту из сплава Ni₅₀Fe₅₀ шириной 10 мм и толщиной 25 мкм. Хотя из-за склонности Fe-Ni сплавов к окислению такая подложка являлась не лучшим вариантом, однако на ней была выстроена достаточно

стройная «архитектура» оксидных слоев $\text{CeO}_2/\text{Y}_2\text{O}_3$ и сверхпроводящего слоя YBCO (123), на которой получен сверхпроводящий переход при температуре ~ 90 К ($\Delta T_C = 10$ К), плотность тока I_C при 77 К составляла $\sim 0,6 \cdot 10^5$ А/см².

Нужно учитывать, что физические свойства, достаточно высокие механические свойства ($\sigma_{0,2} = 140\text{--}160$ МПа), способность воспринимать затраточные ориентированные оксидные слои из CeO_2 или Y_2O_3 , совершенная текстура отжига позволяют использовать металлические подложки из Ni-Fe сплавов не только в технологии ВТСП второго поколения, но и для других многослойных композиций, например, в электронной технике.

Цель настоящей работы заключалась в исследовании закономерностей формирования текстуры первичной рекристаллизации в сплавах $\text{Fe}_{64}\text{Ni}_{36}$ и $\text{Fe}_{50}\text{Ni}_{50}$ в зависимости от условий отжига. Основным методом исследования в работе был метод дифракции обратно отраженных электронов (EBSD), позволяющий с высокой точностью оценивать совершенство реализуемой кубической текстуры в металлической ленте. Этот метод также привлекает к себе внимание в связи с возможностью более детального исследования ориентаций рекристаллизованных зерен в плоскости текстурированной ленты-подложки.

Материал и методы исследования

Для выплавки лабораторных сплавов $\text{Fe}_{64}\text{Ni}_{36}$ и $\text{Fe}_{50}\text{Ni}_{50}$ использовался никель чистотой 99,99 % и карбонильное железо чистотой 99,97 %. Сплавы выплавлялись в алундовых тиглях в атмосфере аргона в вакуумной индукционной печи. Слитки ковали при температуре в интервале 1000–800 °С на прутки сечением 10×10 мм. Далее проводили теплую ковку при 650 °С до размера 7×7 мм. После шлифовки получали заготовки 6×6×150, которые отжигали 1,5 ч при 800 °С. В структуре заготовок сплавов с 50 и 36 % Ni наблюдалась небольшая разнотерность. Холодную деформацию заготовки осуществляли в два этапа: I этап на стане с диаметром валков 180 мм (деформация ~ 90 %, число проходов 40); II этап – на двухвалковом прокатном стане с полированными валками до толщины 100 мкм, степень холодной деформации составляла 98–99 %. Также для проведения исследования использовали текстурированные образцы пермаллоя $\text{Fe}_{49}\text{Ni}_{51}$, изготовленного в МГУ им. М. В. Ломоносова.

Кинетику рекристаллизации деформированных лент исследовали на dilatометре Ulvac Sincu-giku в интервале температур от 20 до 850 °С со скоростью нагрева 2 град/мин (~ 100 град/ч).

Рекристаллизационные отжиги сплавов $\text{Fe}_{64}\text{Ni}_{36}$ и $\text{Fe}_{50}\text{Ni}_{50}$ для получения кубической текстуры проводили в вакуумной печи ($2\text{--}3 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.) при температуре 1000 и 1050 °С в течение 1 ч. Нагрев осуществляли посадкой ленточных образцов в печь, нагретую до требуемой температуры, охлаждение образцов после отжига – вне печного пространства. Также проводили отжиг 1000 °С в течение 1 ч с медленным нагревом 2 град/мин в интервале температур от 700 до 1000 °С. Кроме того, использовали отжиг образцов сплава $\text{Fe}_{49}\text{Ni}_{51}$ в протяжной печи в аргон-водородной атмосфере (отжиг проводили в МГУ им. М. В. Ломоносова). Скорость движения ленты составляла 2 м/ч, время пребывания в горячей зоне при $T_{\text{max}} = 1050$ °С – 40 мин.

Для определения текстур деформации использовали рентгеновскую съемку внутренней части полюсных фигур «на отражение» до $\alpha = 65^\circ$. Съемку полюсных фигур $\{111\}$, $\{200\}$, $\{220\}$ и $\{311\}$ производили с шагом 5° в излучении $\text{Co-K}_{\alpha 1}$ на рентгеновском дифрактометре с автоматизированной текстурной приставкой. Исследование текстуры деформированных образцов осуществляли путем анализа функций распределения ориентаций (ФРО) по четырем неполным полюсным фигурам с числом членов разложения ряда, равным 22. Объемную долю отдельных текстурных составляющих определяли интегрированием текстурной функции в пределах $\pm 10^\circ$ от положения соответствующей идеальной компоненты $\{hkl\}\langle uvw \rangle$ в пространстве углов Эйлера.

Ориентацию зерен на поверхности текстурованных сплавов определяли методом дифракции обратно отраженных электронов (EBSD) на сканирующих электронных микроскопах Pegasus «Quanta-200» (ИФМ УрО РАН) и Jeol JSM 840A (химический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова). Область формирования дифракционной картины в точке составляла около 50 нм. Сканирование ориентационных данных осуществлялось с шагом 2 мкм с поверхности площадью примерно 2800×1000 мкм.

Для металлографического исследования использовали ленту непосредственно после прокатки в полированных валках и рекристаллизационных отжигов. Для исследования микроструктуры в оптическом микроскопе «Neophot-30» образцы травили в смеси концентрированных кислот HNO_3 , HCl и H_3PO_4 в равных долях с добавлением 30–40 % H_2O_2 . Среднюю величину исходного зерна вычисляли по структуре заготовок сплавов после отжига при температуре 850°C в течение 1,5 ч. Среднее значение получали путем усреднения результата от измерения минимум 80 зерен. В заготовке средний размер зерна перед прокаткой не превышал 40 мкм.

Результаты исследования и их обсуждение

В бинарной металлической системе Fe-Ni область с неограниченной растворимостью легирующего элемента, примыкающая к чистому никелю, существует до границы $\sim 30\%$ Ni [6]. Эта область включает несколько широко используемых в промышленности железоникелевых сплавов, таких как пермаллой ($\text{Fe}_{50}\text{Ni}_{50}$ и $\text{Fe}_{49}\text{Ni}_{51}$) и инвар ($\text{Fe}_{64}\text{Ni}_{36}$). На основе ряда работ [7–9] ранее построена зависимость энергии дефектов упаковки (ЭДУ) от концентрации никеля в сплавах Fe-Ni, которая имеет экстремальный характер с минимумом в области 40–42 ат.% Ni. Минимум ЭДУ по своему положению соответствует максимальному значению параметра решетки в системе Fe-Ni [10]. Зависимость ЭДУ от концентрации никеля позволяет предположить, что во всем интервале существования ГЦК сплавов Fe-Ni может быть реализована острая кубическая $\{100\}\langle 001 \rangle$ текстура рекристаллизации. Ранее этот эффект был отмечен в системе Ni-Cu [11].

В табл. 1 приведены значения объемных долей основных текстурных компонент $\{110\}\langle 112 \rangle$ (B), $\{123\}\langle 634 \rangle$ (S) и $\{112\}\langle 111 \rangle$ (C) в текстуре холлодокатаных со степенями 98–99 % лент из трех Fe-Ni сплавов в сравнении с чистым никелем.

Таблица 1

Объемная доля основных компонент текстуры
в деформированных образцах Fe-Ni сплавов, %

Состав сплава, ат. %	ε , %	Размер исходного зерна, мкм	S {123}<634>	C {112}<111>	B {011}<211>	$S + C$	$2B$
Ni 99,97%	98,8	30	30,6	17,1	17,0	47,7	34,0
Fe ₅₀ Ni ₅₀	98,5	32	29,4	17,8	6,8	47,2	13,6
Fe ₄₉ Ni ₅₁	99,0	40	29,6	17,4	6,7	47,0	13,4
Fe ₆₄ Ni ₃₆	99,0	39	31,5	19,5	7,0	51,0	14,0

Ранее в работе [12] было показано, что существует эмпирическое соотношение текстурных компонент $C + S > 2B$, которое достаточно хорошо отражает переход от текстуры прокатки типа «меди» к текстуре прокатки типа «а-латуни». Для большинства сплавов Ni-Me с ограниченной растворимостью легирующего элемента увеличение его содержания в ГЦК-твердом растворе приводит к резкому подъему доли компоненты $B - \{110\}<112>$ и заметному снижению доли компонент C и S в текстуре деформации [4, 12]. В случае Fe-Ni сплавов следует обратить внимание на необычно низкое содержание в текстуре деформации сплавов Fe₅₀Ni₅₀, Fe₄₉Ni₅₁ и Fe₆₄Ni₃₆ компоненты $B \sim 7\%$. Такой компонентный состав текстуры деформации, а особенно малая объемная доля компоненты B , позволяет надеяться на реализацию острой кубической текстуры рекристаллизации при последующем отжиге деформированных Fe-Ni сплавов разного состава.

На основе дилатометрических данных при медленном нагреве холоднокатаных на 99 % лент проведена оценка температуры начала рекристаллизации сплавов Fe₄₉Ni₅₁ и Fe₆₄Ni₃₆ в сравнении с чистым никелем (рис. 1). Температура начала рекристаллизации для сплава Fe₄₉Ni₅₁ составляет ~ 545 °C и для инвара Fe₆₄Ni₃₆ – 560 °C, что превышает температуру начала рекристаллизации чистого никеля всего на 50–60 °C. Поэтому в работе помимо часового отжига при температуре 1000 и 1050 °C использовали отжиг с медленным нагревом ~ 2 град/мин в интервале температур от 700 до 1000 °C, который, по данным [13, 14], позволяет существенно повысить остроту кубической текстуры рекристаллизации бинарных и тройных никелевых сплавов за счет уменьшения количества двойников.

Ранее в работе [15] было установлено, что в деформированной на 99 % ленте из пермаллоя Fe₅₁Ni₄₉ уменьшение скорости нагрева или повышение температуры рекристаллизационного отжига, приводящее к увеличению остроты кубической текстуры, приводит и к повышению уровня магнитомягких свойств. Так, при повышении температуры отжига сплава Fe₅₁Ni₄₉ с 1000 до 1150 °C значения магнитной индукции увеличивались с 1,20 до 1,28 Тл, а коэрцитивная сила уменьшалась с 43,0 до 12,7 А/м.

Отжиг ленты из пермаллоя Fe₄₉Ni₅₁ проводился в процессе протяжки в печи в аргон-водородной атмосфере со скоростью движения ленты 2 м/ч, время пребывания в горячей зоне составляло 40 мин при $T_{\max} = 1050$ °C (рис. 2). Оценка совершенства текстуры проводилась в нескольких участках протяженной ленты. Во всей ленте получена острая кубическая текстура, приближающаяся по степени совершенства к монокристалльной с частотой появления двойников менее 0,01 (рис. 2,б).

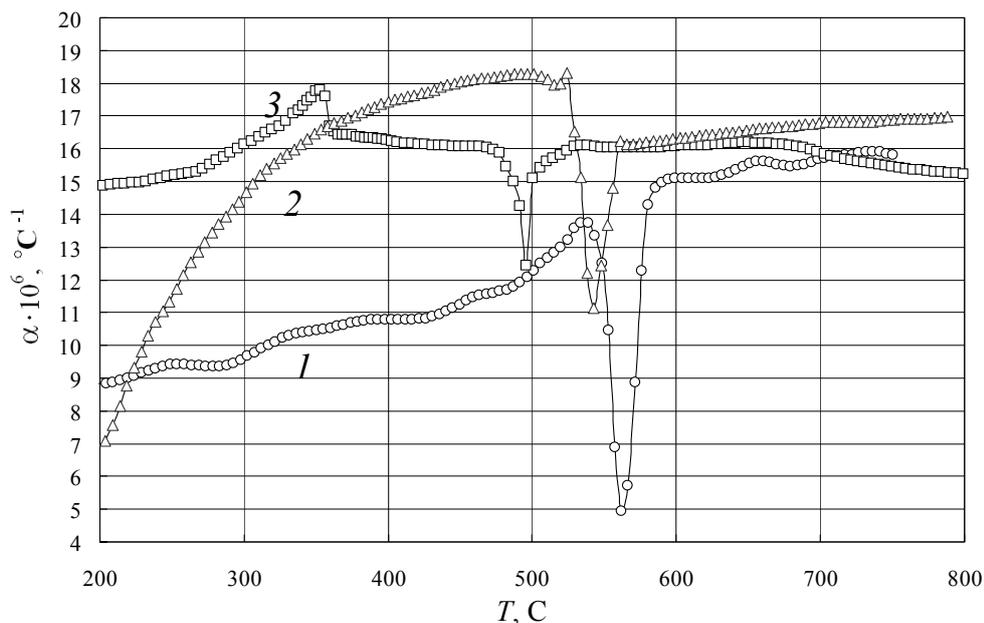


Рис. 1. Изменение коэффициента температурного линейного расширения при нагреве со скоростью 2 град./мин холоддеформированных (98,8–99 %) образцов сплавов Fe-Ni и чистого никеля: 1 – Fe₄₉Ni₅₁; 2 – Fe₆₄Ni₃₆; 3 – Ni

Для двух исследуемых в настоящей работе сплавов Fe₆₄Ni₃₆ и Fe₅₀Ni₅₀, помимо наиболее часто применяемого для получения острой кубической текстуры «тестового» отжига при температуре 1000 °C, был выбран рекристаллизационный отжиг при $T = 1050$ °C в течение 1 ч, поскольку такой режим наиболее близок к условиям отжига длинной ленты из сплава Fe₄₉Ni₅₁ в протяжной печи.

Результаты EBSD анализа ленты из сплава Fe₅₀Ni₅₀ после рекристаллизационного отжига при $T = 1050$ °C в течение 1 ч приведены на рис. 3. Средняя величина рекристаллизованного зерна при этой температуре отжига составляет ~31 мкм, заметна разноразмерность (рис. 3,а). В сплаве сформировалась совершенная кубическая текстура (рис. 3,б). Частотная характеристика разориентировки границ зерен на поверхности текстурованной ленты из этого сплава позволяет заключить, что не менее 90 % зерен находится в области углов с разориентацией до ~10–12°. Доля двойниковой составляющей (зерна с угловой разориентацией 60°) не превышает 0,05. Количество зерен с промежуточными разориентировками от 10–12 до 60° невелико (рис. 3,в). Оценка степени совершенства сформировавшейся кубической текстуры в других участках достаточно длинной (более 1 м) ленты приводит к аналогичным результатам (рис. 3,г), причем двойников в некоторых участках практически нет.

Можно констатировать, что количество зерен с кубической ориентировкой во всех участках ленты составляет более 90 %, а в некоторых участках ленты более 95 %. Однако рекристаллизационный отжиг в вакууме при температуре 1050 °C в течение 1 ч не позволяет полностью (во всех участках

ленты) избавиться от двойниковой составляющей. При отжиге в аргон-водородной атмосфере ($\text{Ar}_2 + 1\% \text{H}_2$) удается добиться в никеле и двойных никелевых сплавах снижения доли двойниковых границ зерен (PCY $\Sigma 3$), при этом уменьшается глубина канавок термического травления поверхности ленты [16]. Показательна в этом отношении кубическая текстура в сплаве $\text{Fe}_{49}\text{Ni}_{51}$ (см. рис. 2), где после отжига в протяжной печи при $T_{\text{max}} = 1050\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 40 мин в аргон-водородной атмосфере снижается доля двойниковой составляющей до величины $< 0,01$.

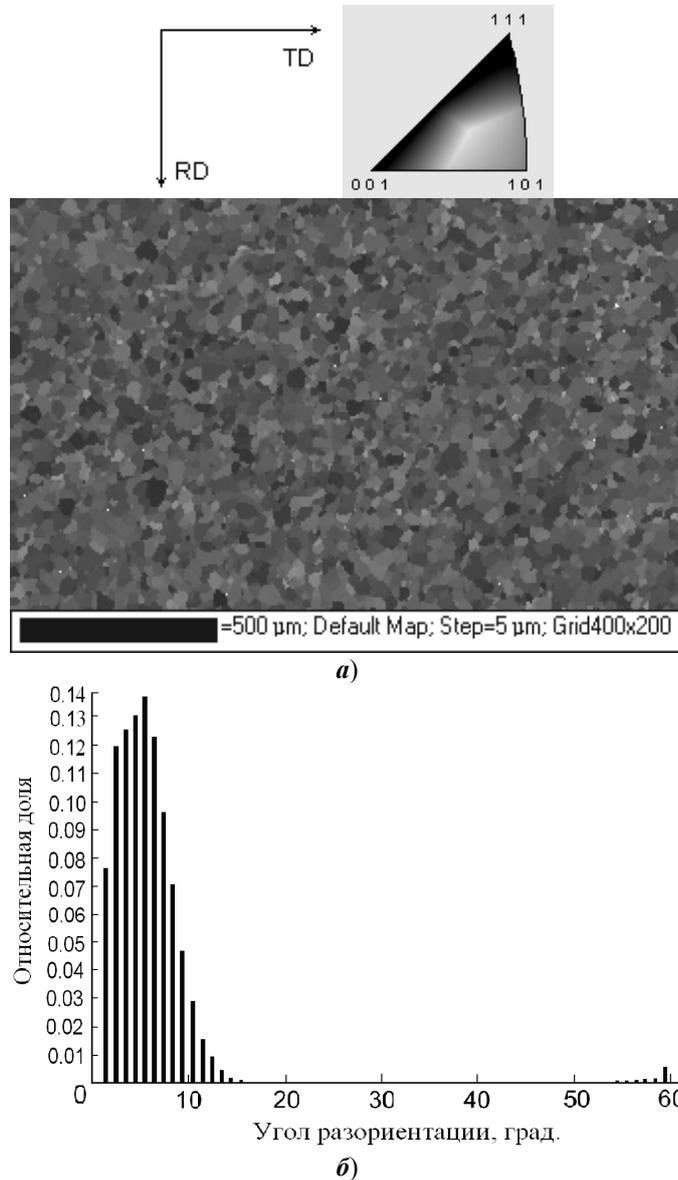


Рис. 2. Микрокарта разориентации зерен (**а**) и гистограмма разориентировки границ зерен (**б**) в плоскости ленты для текстурированного сплава $\text{Fe}_{51}\text{Ni}_{49}$. Отжиг в протяжной печи в аргон-водородной атмосфере движущейся со скоростью 2 м/ч ленты, время пребывания в горячей зоне при $T_{\text{max}} = 1050\text{ }^\circ\text{C}$ 40 мин

Проводили также EBSD анализ ленты из сплава $\text{Fe}_{50}\text{Ni}_{50}$ после рекристаллизационного отжига при $1000\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 1 ч с медленным нагревом ~ 2 град/мин в интервале температур от 700 до $1000\text{ }^\circ\text{C}$, результаты приведены на рис. 4.

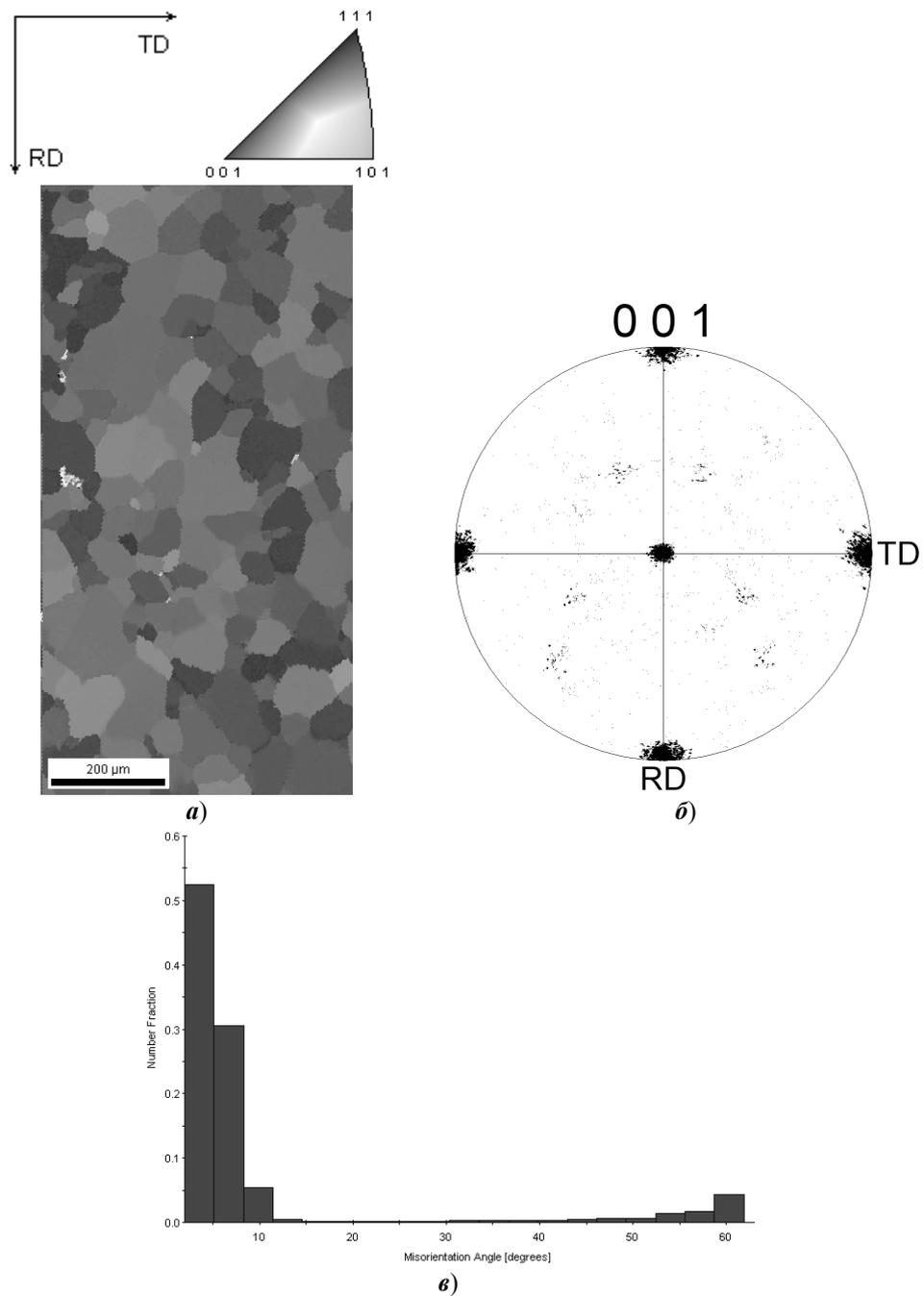


Рис. 3. Микрокарта ориентировок зерен (а), полюсная фигура {001} (б) и гистограммы разориентировки границ зерен (в, г) для ленты из сплава $\text{Fe}_{50}\text{Ni}_{50}$ после рекристаллизационного отжига $1050\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 1 ч

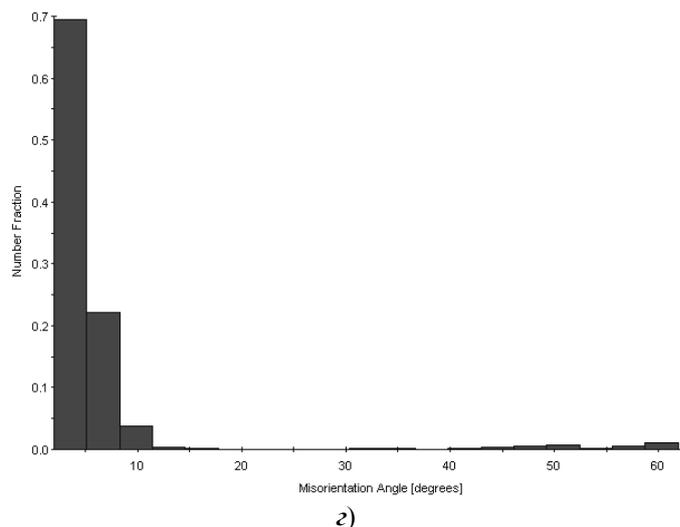


Рис. 3. Окончание

Отжиг ленты из сплава $Fe_{50}Ni_{50}$ с медленным нагревом позволяет получить в ленте квазимонокристалльную структуру. Качество кубической текстуры в ленте из пермаллоя $Fe_{50}Ni_{50}$ после отжига с медленным нагревом немного лучше, чем после отжига при температуре $1050\text{ }^{\circ}C$ в течение 1 ч. Однако отжиг при $1050\text{ }^{\circ}C$ в течение 1 ч с экономической точки зрения более выгоден, чем режим отжига с медленным нагревом, при котором общая продолжительность нагрева от $700\text{ }^{\circ}C$ составляет не менее 4 ч.

Сплав инвар $Fe_{64}Ni_{36}$ находится в системе Fe-Ni близко к границе концентрационного интервала ГЦК сплавов ($\sim 30\%$ Ni). В этом сплаве, так же как и в пермаллое, после глубокой деформации и последующего рекристаллизационного отжига, при всех используемых в работе режимах отжига, реализуется острая кубическая текстура (рис. 5). Средняя величина рекристаллизованного зерна при этой температуре отжига составляет $\sim 35\text{ }\mu m$ (рис. 5,а). Следует отметить высокое совершенство кубической текстуры в ленте из сплава $Fe_{64}Ni_{36}$ после рекристаллизационного отжига при $1050\text{ }^{\circ}C$ в течение 1 ч (рис. 5,б). В той части спектра распределения разориентировок рекристаллизованных зерен, где сосредоточена кубическая компонента текстуры (область углов до $10\text{--}12\text{ }^{\circ}$) находится более 90 % зерен. Доля двойниковой составляющей $\sim 0,05$, что несколько больше, чем в пермаллое $Fe_{50}Ni_{50}$ после аналогичного режима рекристаллизационного отжига.

Кроме того, в инваре после отжига при $1050\text{ }^{\circ}C$ в течение 1 ч присутствует некоторая доля зерен с разориентировками в области углов от 30 до 60 ° (рис. 5,в). В целом реализуемая в инваре кубическая текстура уступает по степени совершенства текстуре пермаллоя, хотя и незначительно.

Таким образом, результаты исследования подтверждают возможность реализации в сплавах $Fe_{64}Ni_{36}$ и $Fe_{50}Ni_{50}$ острой кубической текстуры рекристаллизации.

Возможность получения квазимонокристалльной структуры в тонкой ленте из железоникелевых сплавов открывает возможность использования их в качестве подложек не только в технологии ВТСП второго поколения, но и в электронной технике.

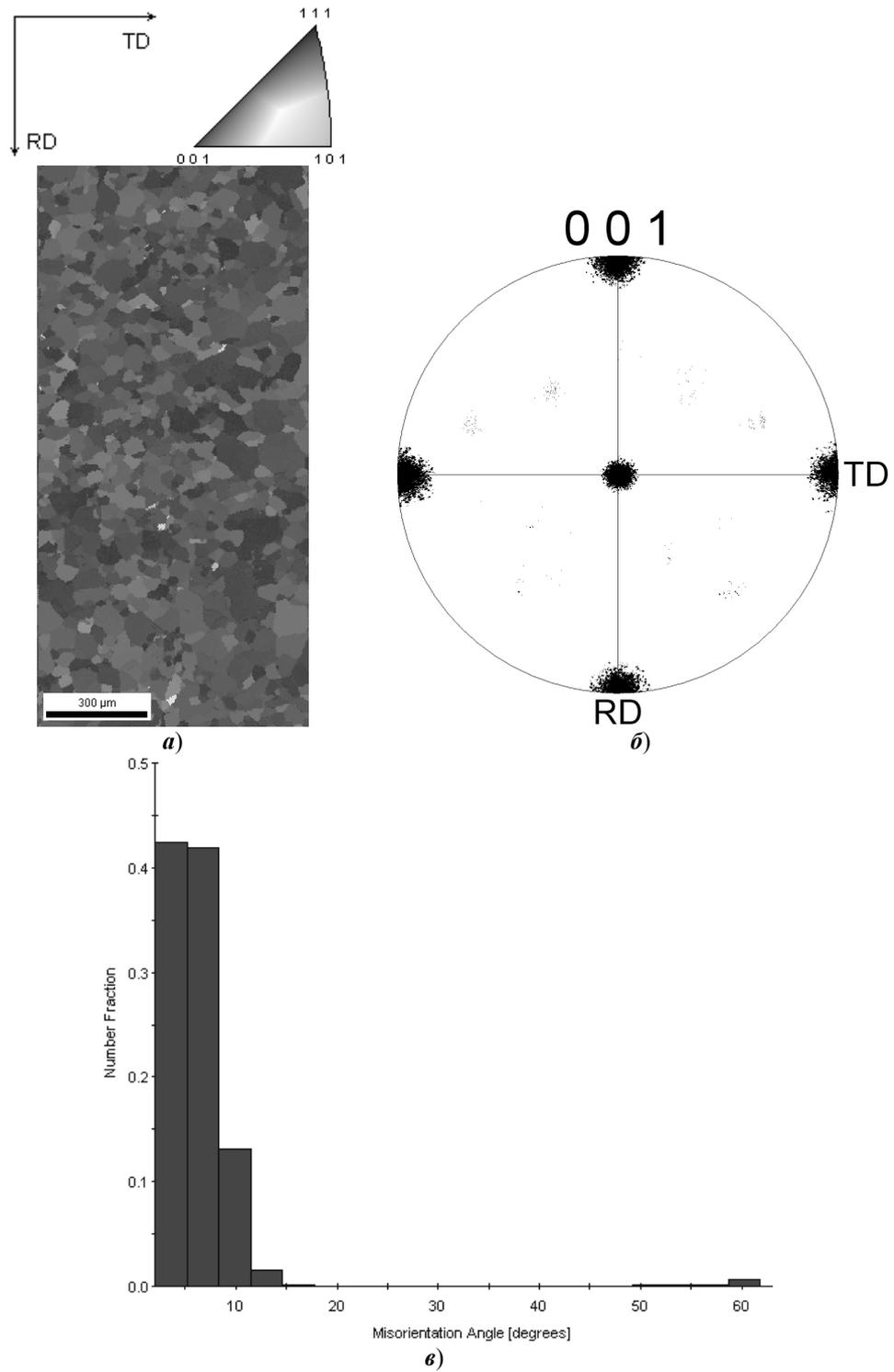


Рис. 4. Микрокарта ориентировок зерен (а), полюсная фигура {001} (б) и гистограммы разориентировки границ зерен (в) для ленты из сплава Fe₅₀Ni₅₀ после рекристаллизационного отжига при 1000 °С в течение 1 ч с медленным нагревом 2 град/мин

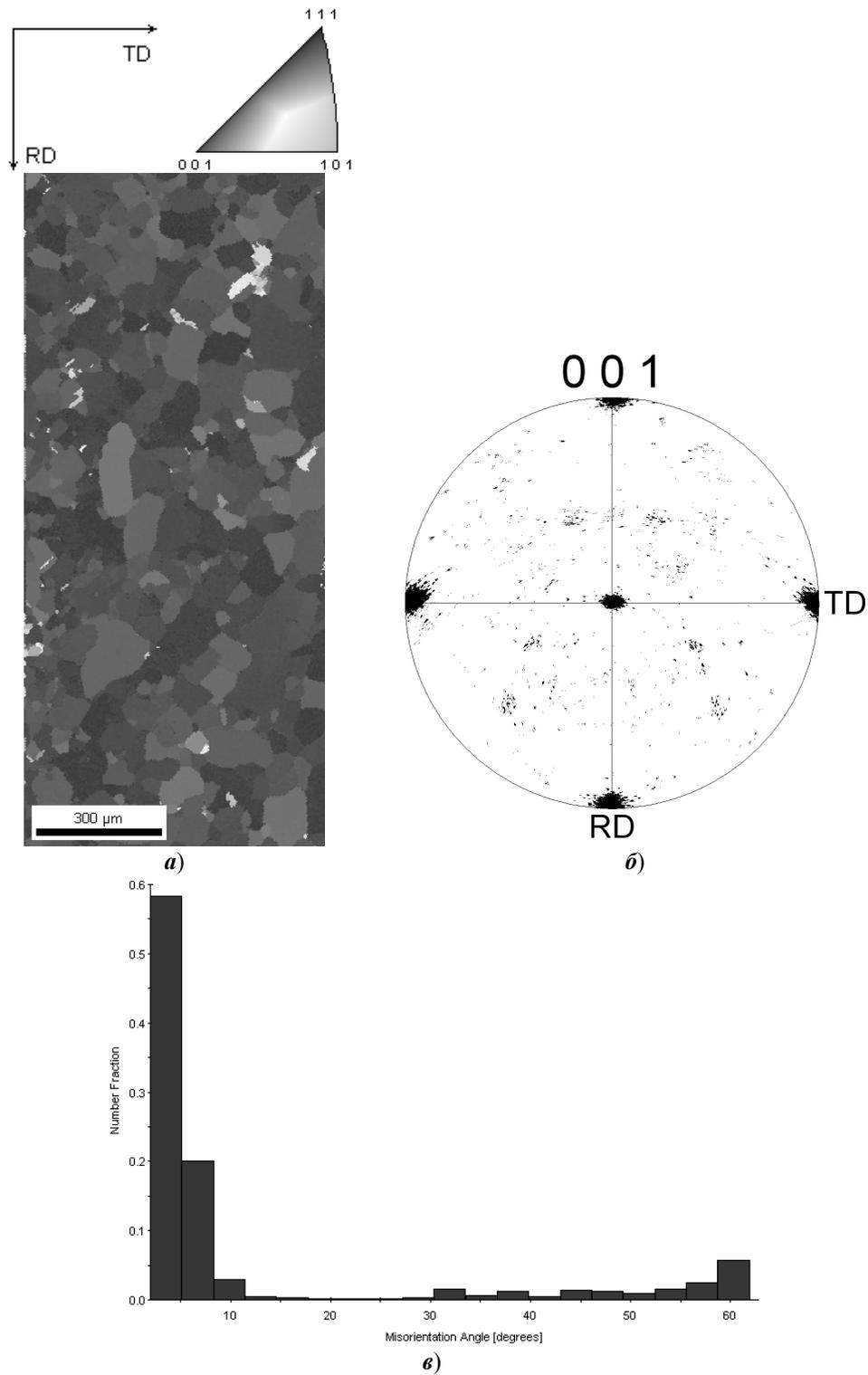


Рис. 5. Микрокарта ориентировок зерен (а), полюсная фигура {001} (б) и гистограмма разориентировки границ зерен (в) для ленты из сплава Fe₆₄Ni₃₆ после рекристаллизационного отжига при 1050 °С в течение 1 ч

Выводы

1. Легирование никеля железом приводит к значительному увеличению параметра решетки сплава, однако, в отличие от легирования другими *d*-переходными металлами, это не приводит к изменению типа текстуры деформации сплавов, что в свою очередь позволяет получить при отжиге острую кубическую текстуру во всей области существования ГЦК Fe-Ni сплавов.

2. Для сплава Fe₅₀Ni₅₀ определен оптимальный режим рекристаллизационного отжига при 1050 °С в течение 1 ч наиболее близкий к отжигу ленты в протяжной печи, при котором удастся реализовать очень острую кубическую текстуру, близкую к монокристалльной с содержанием двойниковых зерен на поверхности текстурованной ленты менее 1 %.

3. В инваре Fe₆₄Ni₃₆ после всех режимов рекристаллизационного отжига, включая отжиг при 1050 °С в течение 1 ч, реализуемая острая кубическая текстура дает возможность использования тонких лент из этого сплава в качестве подложек в технологии ВТСП второго поколения, но немного уступает по степени совершенства текстуре пермаллоя Fe₅₀Ni₅₀.

Эксперименты по определению ориентации зерен на поверхности текстурованных лент методом EBSD на сканирующем микроскопе Pegasus «Quanta-200» проведены в отделе электронной микроскопии ЦКП «Испытательный центр нанотехнологий и перспективных материалов» Института физики металлов УрО РАН.

Список литературы

1. **Вишняков, Я. Д.** Теория образования текстур в металлах и сплавах / Я. Д. Вишняков, А. А. Бабарэко, С. А. Владимиров, И. В. Эгиз. – М. : Наука, 1979. – 343 с.
2. Образование текстуры в сплавах никеля с некоторыми *d*-переходными металлами. Ч. 2. Текстура рекристаллизации / И. В. Гервасьева, Б. К. Соколов, Д. П. Родионов, Ю. В. Хлебникова, Я. В. Подкин // Физика металлов и металловедение. – 2003. – Т. 96, № 2. – С. 95–101.
3. Влияние рекристаллизационного отжига на формирование совершенной кубической текстуры в ГЦК-никелевых сплавах / Д. П. Родионов, И. В. Гервасьева, Ю. В. Хлебникова, В. А. Казанцев, Н. И. Виноградова, В. А. Сазонова // Физика металлов и металловедение. – 2011. – Т. 111, № 6. – С. 628–638.
4. **Родионов, Д. П.** Текстурованные подложки из никелевых сплавов / Д. П. Родионов, И. В. Гервасьева, Ю. В. Хлебникова. – Екатеринбург : РИО УрО РАН, 2012. – 112 с.
5. Pulsed Laser Deposition of Epitaxial YBa Cu O/Oxide Multilayers onto Textured NiFe Substrates for Coated Conductor Applications / R. I. Tomov, A. Kurzumovic, M. Majoros, D-J. Kang, B. A. Glowacki, J. E. Evetts // Supercond. Sci. Technol. – 2002. – Vol. 15. – P. 598–605.
6. **Хансен, М.** Структура двойных сплавов / М. Хансен, К. Андерко. – М. : ГНТИ по черной и цветной металлургии. – 1962. – Т. II. – 1488 с.
7. **Schramm, R. E.** Stacking Fault energies of fcc Fe-Ni Alloys by X-Ray Diffraction Line Profile Analysis / R. E. Schramm, R. P. Reed // Met. Trans. – 1976. – Vol. 7A, № 3. – P. 359–363.
8. **Beeston, B. E. P.** The Staking Fault Energies of Some Binary Nickel Alloys / B. E. P. Beeston, L. K. France // J. Inst. of Metals. – 1968. – Vol. 96, № 4. – P. 105–107.

9. **Бутакова, Э. Д.** Энергия дефекта упаковки в сплавах железо-никель и железо-никель-хром / Э. Д. Бутакова, К. А. Малышев, Н. И. Носкова // *Физика металлов и металловедение*. – 1973. – Т. 35, № 3. – С. 662–664.
10. **Вол, А. Е.** Строение и свойства двойных металлических систем / А. Е. Вол. – М.: Физматгиз, 1962. – Ч. II. – 793 с.
11. Industrial Cu-Ni alloys for HTS coated conductor tape / A. Girard, C. E. Bruzek, J. L. Jorda et al. // *J. Phys. Conf. Ser.* – 2006. – Vol. 43. – P. 341–343.
12. **Гервасьева, И. В.** Образование текстуры в сплавах никеля с некоторыми *d*-переходными металлами. Ч. I. Текстура деформации / И. В. Гервасьева, Б. К. Соколов, Д. П. Родионов, Ю. В. Хлебникова // *Физика металлов и металловедение*. 2003. – Т. 95, № 1. – С. 77–84.
13. Biaxially Textured NiCrX (X=W and V) Tapes as Substrates for HTS Coated Conductor Applications / A. Tuissi, E. Villa, M. Zamboni et al. // *Physica*. – 2002. – P. 759–762.
14. YBCO Coated Conductor Deposited onto Non-magnetic Ternary Alloy NiCrW RABiTS Tape by in situ Pulsed Laser Deposition / R. I. Tomov, A. Kursumovic, M. Majoros et al. // *Physica C*. – 2003. – Vol. 383. – P. 323–336.
15. **Гервасьева, И. В.** Получение кубической текстуры в лентах Fe-Ni сплавов / И. В. Гервасьева, Д. П. Родионов, Ю. В. Хлебникова, А. П. Потапов // *Письма в Журнал технической физики*. – 2011. – Т. 37, № 14. – С. 76–83.
16. **Geadstone, T. A.** Grain boundary misorientation and thermal grooving in cube-textured Ni, Ni-Cr tape / T. A. Geadstone, J. C. Moore, A. J. Wilkinson, C. R. M. Grovenor // *IEEE Transactions on Applied Supercond.* – 2001. – Vol. 11, Issue 1, Part III. – P. 623–626.

References

1. Vishnyakov Ya. D., Babareko A. A., Vladimirov S. A., Egiz I. V. *Teoriya obrazovaniya tekstur v metallakh i splavakh* [Theory of texture formation in metals and alloys]. Moscow: Nauka, 1979, 343 p.
2. Gervas'eva I. V., Sokolov B. K., Rodionov D. P., Khlebnikova Yu. V., Podkin Ya. V. *Fizika metallov i metallovedenie* [Physics of metals and physical metallurgy]. 2003, vol. 96, no. 2, pp. 95–101.
3. Rodionov D. P., Gervas'eva I. V., Khlebnikova Yu. V., Kazantsev V. A., Vinogradova N. I., Sazonova V. A. *Fizika metallov i metallovedenie* [Physics of metals and physical metallurgy]. 2011, vol. 111, no. 6, pp. 628–638.
4. Rodionov D. P., Gervas'eva I. V., Khlebnikova Yu. V. *Teksturovannye podlozhki iz nikelovykh splavov* [Texturing of nickel alloy backing]. Ekaterinburg: RIO UrO RAN, 2012, 112 p.
5. Tomov R. I., Kurzumovic A., Majoros M., Kang D-J., Glowacki B. A., Evetts J. E. *Supercond. Sci. Technol.* 2002, vol. 15, pp. 598–605.
6. Khansen M., Anderko K. *Struktura dvoynykh splavov* [Structure of binary alloys]. Moscow: GNTI po chernoy i tsvetnoy metallurgii, 1962, vol. II, 1488 p.
7. Schramm R. E., Reed R. P. *Met. Trans.* 1976, vol. 7A, no. 3, pp. 359–363.
8. Beeston B. E. P., France L. K. *J. Inst. of Metals*. 1968, vol. 96, no. 4, pp. 105–107.
9. Butakova E. D., Malyshev K. A., Noskova N. I. *Fizika metallov i metallovedenie* [Physics of metals and physical metallurgy]. 1973, vol. 35, no. 3, pp. 662–664.
10. Vol A. E. *Stroenie i svoystva dvoynykh metallicheskih sistem* [Structure and properties of binary metallic systems]. Moscow: Fizmatgiz, 1962, part II, 793 p.
11. Girard A., Bruzek C. E., Jorda J. L. et al. *J. Phys. Conf. Ser.* 2006, vol. 43, pp. 341–343.
12. Gervas'eva I. V., Sokolov B. K., Rodionov D. P., Khlebnikova Yu. V. *Fizika metallov i metallovedenie* [Physics of metals and physical metallurgy]. 2003, vol. 95, no. 1, pp. 77–84.

13. Tuissi A., Villa E., Zamboni M. et al. *Physical*. 2002, pp. 759–762.
 14. Tomov R. I., Kursumovic A., Majoros M. et al. *Physical C*. 2003, vol. 383, pp. 323–336.
 15. Gervas'eva I. V., Rodionov D. P., Khlebnikova Yu. V., Potapov A. P. *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Letters to the journal of technical physics]. 2011, vol. 37, no. 14, pp. 76–83.
 16. Geadstone T. A., Moore J. C., Wilkinson A. J., Grovenor C. R. M. *JEEE Transactions on Applied Supercond*. 2001, vol. 11, issue 1, part III, p. 623–626.
-

Родионов Дмитрий Петрович

доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник,
Институт физики металлов Уральского
отделения Российской академии наук
(Россия, г. Екатеринбург,
ул. С. Ковалевской, 18)

E-mail: phym@imp.uran.ru

Rodionov Dmitriy Petrovich

Doctor of physical and mathematical
sciences, chief research scientist, Institute
of physics of metals of the Ural branch
of the Russian Academy of Sciences
(18 S. Kovalevskoy street,
Ekaterinburg, Russia)

Хлебникова Юлия Валентиновна

кандидат технических наук, старший
научный сотрудник, Институт физики
металлов Уральского отделения
Российской академии наук (Россия,
г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18)

E-mail: yulia_kh@imp.uran.ru

Khlebnikova Yuliya Valentinovna

Candidate of engineering sciences, senior
staff scientist, Institute of physics of metals
of the Ural branch of the Russian Academy
of Sciences (18 S. Kovalevskoy street,
Ekaterinburg, Russia)

Козлов Геннадий Васильевич

доктор технических наук, профессор,
декан факультета повышения
квалификации и дополнительного
образования, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: gvk17@yandex.ru

Kozlov Gennadiy Vasil'evich

Doctor of engineering sciences, professor,
dean of the Faculty of advanced studies
and additional education, Penza State
University (40 Krasnaya street, Penza,
Russia)

Гервасьева Ирина Владимировна

доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник, Институт
физики металлов Уральского отделения
Российской академии наук (Россия,
г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18)

E-mail: gervasy@imp.uran.ru

Gervas'eva Irina Vladimirovna

Doctor of physical and mathematical
sciences, leading researcher, Institute
of physics of metals of the Ural branch
of the Russian Academy of Sciences (18
S. Kovalevskoy street, Ekaterinburg, Russia)

Суаридзе Теона Романиевна

младший научный сотрудник, Институт
физики металлов Уральского отделения
Российской академии наук (Россия,
г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18)

E-mail: t.suaridze@yandex.ru

Suaridze Teona Romanievna

Junior researcher, Institute of physics
of metals of the Ural branch of the Russian
Academy of Sciences (18 S. Kovalevskoy
street, Ekaterinburg, Russia)

УДК 669.1'24:539.25

Исследование текстуры железоникелевых сплавов $Fe_{64}Ni_{36}$ и $Fe_{50}Ni_{50}$ методом дифракции обратно отраженных электронов / Д. П. Родионов, Ю. В. Хлебникова, Г. В. Козлов, И. В. Гервасьева, Т. Р. Суаридзе // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 4 (28). – С. 165–179.

В. С. Щербаков, М. С. Корытов, А. Н. Шабалин

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ МАШИННЫМИ КОМПЛЕКСАМИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ОПТИМИЗАЦИЮ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ТРУБОУКЛАДЧНОЙ КОЛОННЫ

Аннотация. *Актуальность и цели.* Обеспечение безопасности рабочего процесса грузоподъемных машин является актуальной проблемой по следующим причинам: во-первых, человек, занятый в производственном процессе, должен быть уверен в своей безопасности; во-вторых, аварийные ситуации приводят к большим финансовым затратам. *Материалы и методы.* Для обеспечения безопасности производственного процесса грузоподъемных машин создано множество различных устройств и систем безопасности, направленных на сохранение устойчивости грузоподъемных машин, принцип действия которых основан на ограничении грузового момента, создаваемого самим краном. Данный подход применим для случая работы отдельно стоящей машины с собственным единичным грузом. В рабочем процессе комплекта машин с общим грузом есть свои особенности, которые делают все эти устройства малоэффективными, поскольку автономное и независимое повышение устойчивости одной машины существующими устройствами, как правило, вызывает снижение устойчивости всех остальных машин. Все воздействия на кран-трубоукладчик, можно разделить на высокочастотные и низкочастотные. *Результаты.* Для компенсации низкочастотных воздействий создана система автоматического управления, для компенсации высокочастотных воздействий создано устройство стабилизации грузового момента, так как из-за запаздывания гидропривода система управления не успевает обрабатывать высокочастотные воздействия.

Ключевые слова: трубоукладочная колонна, комплект машин, кран-трубоукладчик, система управления, момент устойчивости, расчетная схема, однородные координаты.

V. S. Shcherbakov, M. S. Korytov, A. N. Shabalin

IMPROVEMENT OF METHODS OF MACHINE COMPLEXES CONTROL PROVIDING OPTIMIZATION OF THE WORKING PROCESS OF THE PIPELAYING COLUMN

Abstract. *Background.* Safety of the working process of load-lifting cars is a topical problem for the following reasons: first, a person involved in production has to be confident in safety; secondly, emergencies lead to big financial expenses. *Materials and methods.* For safety of production of load-lifting cars there was created a set of various devices and systems of safety intended to preserve stability of load-lifting cars which principle of action is based on restriction of the load moment created by the crane itself. This approach is applicable for a case of operation of the separate car with own single freight. In working process of a set of cars with the general freight there are features which make all these devices ineffective as autonomous and independent increase of stability of one car by existing devices, as a rule, causes decrease in stability of all other cars. All impacts on the crane-pipe layer may be divided into high-frequency and low-frequency ones. *Results.* For compensation of low-frequency impacts the authors created a system of automatic control, for com-

pensation of high-frequency impacts the researchers created a device of stabilization of the load moment since due to the delay of the hydraulic actuator the control system doesn't manage to deal with high-frequency impacts.

Key words: pipelaying column, set of cars, crane pipe layer, control system, stability moment, settlement scheme, uniform coordinates.

Введение

Типичным примером комплекта грузоподъемных машин является трубоукладочная колонна, состоящая из нескольких кранов-трубоукладчиков. Кран-трубоукладчик (КТ) – это строительная машина, созданная на базе трактора с увеличенной шириной базы и смещенным центром тяжести, оснащенного боковой стрелой А-образной формы [1–3]. Рабочий процесс трубоукладочной колонны заключается в движении колонны вдоль трубопровода, поднятии его условно неограниченного участка с одновременным смещением к оси траншеи. Сложность задачи заключается в том, что укладка трубопровода требует согласованных действий всех участников рабочего процесса. На машинистов КТ колонны возложена корректировка расстояния между машинами, движущимися вдоль оси траншеи, угла наклона стрелы КТ, высоты подвеса крюковой обоймы КТ. При движении колонна перемещается по естественному рельефу, все КТ связаны между собой трубопроводом, что делает трубоукладочную колонну сложной динамической системой.

Метод повышения безопасности и эффективности рабочего процесса комплекта грузоподъемных машин трубоукладочной колонны

Для решения поставленной задачи необходимо разработать математическую модель сложной динамической системы «трубоукладочная колонна». Ее условно можно разделить на следующие подсистемы: краны-трубоукладчики, трубопровод, гидропривод, рельеф. Для создания универсальной математической модели, которая будет отражать особенности большинства существующих моделей КТ, необходимо разработать пространственные расчетные схемы трубопровода (рис. 1) и КТ (рис. 2).

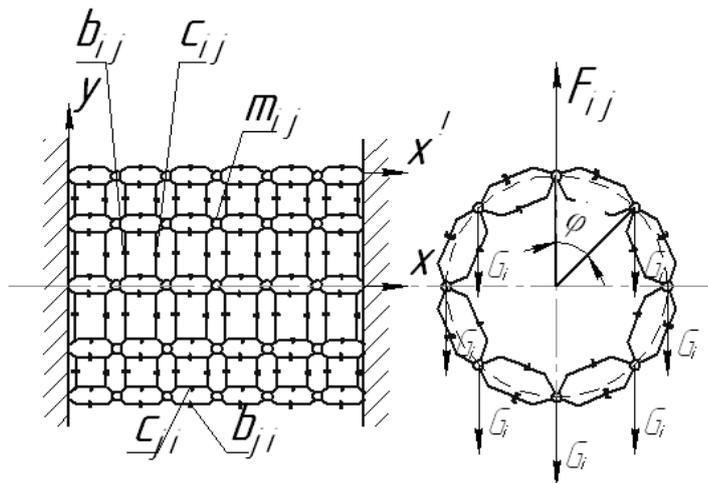


Рис. 1. Пространственная расчетная схема трубопровода

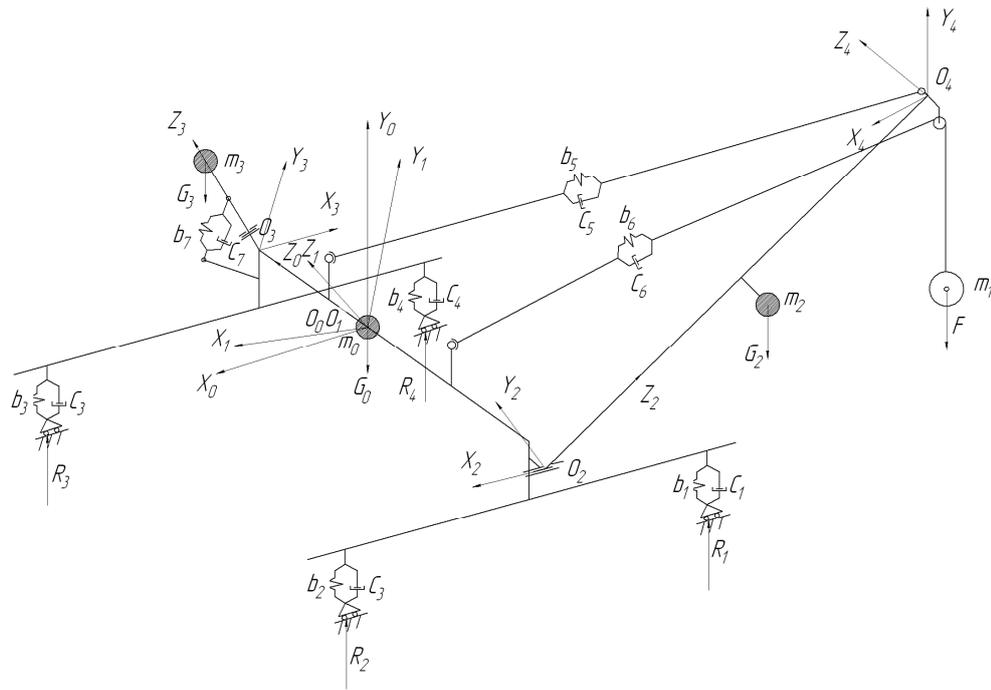


Рис. 2. Пространственная расчетная схема отдельного крана-трубоукладчика в составе трубоукладочной колонны

При составлении пространственных расчетных схем на основании анализа конструкций и условий работы КТ приняты следующие допущения: 1) КТ и трубопровод являются голономными и стационарными системами; 2) КТ и трубопровод представляют собой шарнирно-сочлененные многосвязники с наложенными на них упруго-вязкими и динамическими связями; 3) внешние силы, действующие на КТ и трубопровод, являются сосредоточенными; 4) зазоры и силы сухого трения в шарнирах не оказывают существенного влияния на эффективность рабочего процесса и не учитываются; 5) колебания элементов КТ и трубопровода малы.

Приняты обозначения: m_i – масса i -го звена КТ; G_i – сила тяжести i -го звена; b_i – коэффициент вязкости i -го звена; C_i – коэффициент упругости i -го звена; R_i – сила реакции грунта; F_i – внешняя сила [4, 5].

Для разработки динамической модели КТ и трубопровода применялся метод уравнений Лагранжа второго рода. Каждое из уравнений Лагранжа второго рода для голономной системы с числом степеней свободы, равным l , которым соответствуют обобщенные координаты q_j ($j = 1, \dots, l$), будет иметь следующий вид [6–8]:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial K}{\partial \dot{q}_j} \right] - \frac{\partial K}{\partial q_j} + \frac{\partial P}{\partial q_j} + \frac{\partial \Phi}{\partial q_j} = F_j, \quad (1)$$

где t – время; q_j – обобщенная координата; K – кинетическая энергия; P – потенциальная энергия; Φ – диссипативная функция; \dot{q}_j – обобщенная скорость; F_j – обобщенная сила, действующая по обобщенной координате.

В векторно-матричной форме система дифференциальных уравнений будет иметь вид [6–8]:

$$A \cdot \ddot{\vec{q}} + B \cdot \dot{\vec{q}} + C \cdot \vec{q} = \vec{F}, \quad (2)$$

где A , B , C – матрицы коэффициентов дифференциальных уравнений (A – матрица инерционных коэффициентов, B – матрица коэффициентов демпфирования, C – матрица коэффициентов жесткости); $\ddot{\vec{q}}$, $\dot{\vec{q}}$, \vec{q} – векторы соответственно ускорения, скорости и обобщенных координат; \vec{F} – вектор внешних сил, действующих по обобщенным координатам.

После подстановки всех слагаемых в уравнение Лагранжа получим систему дифференциальных уравнений вида [6–8]:

$$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{\ell} \text{tr} [U_{ij} H_i U_{iV}^T] q'_j + \sum_{u=1}^n \sum_{j=1}^{\ell} \text{tr} [M_{uj} B_u M_{uV}^T] q'_j + \sum_{u=1}^n \sum_{j=1}^{\ell} \text{tr} [M_{uj} N_u M_{uV}^T] q_j + \sum_{i=1}^k m_i g G^T U_{iV} \bar{R}_i = \sum_{r=1}^m \bar{F}_r U_{iV} \bar{R}_{ir}, \quad (3)$$

где U_{ij} – матрица скоростей; H_i – матрица инерции; M_{ij} – матрица скоростей упруго-вязких элементов; B_u – матрица вязкости; N_u – матрица упругости; m_i – масса звена; G – вектор силы тяжести; R_i – вектор центра масс звена; F_i – вектор внешней силы; R_{ir} – вектор точки приложения внешней силы.

Результатом решения системы дифференциальных уравнений (3) как с постоянными, так и с переменными коэффициентами являются временные зависимости изменения обобщенных координат, описывающие изменение положения элементов КТ и трубопровода в пространстве.

Адекватность математической модели подтверждена проведенными экспериментальными исследованиями. Из рис. 3 и 4 следует, что расхождение теоретических и экспериментальных кривых не превышает 5 %.

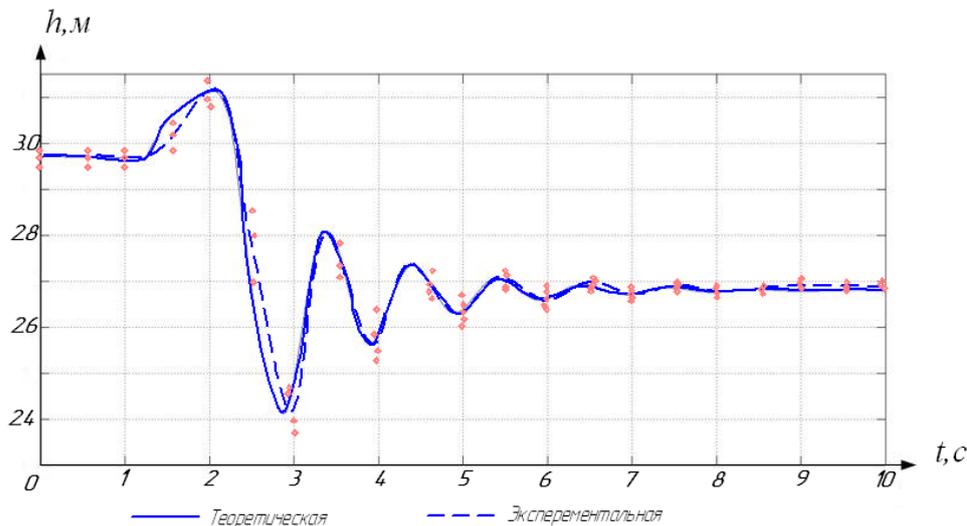


Рис. 3. Графическая зависимость перемещения оголовка стрелы при наезде КТ на неровность высотой 0,23 м (пример)

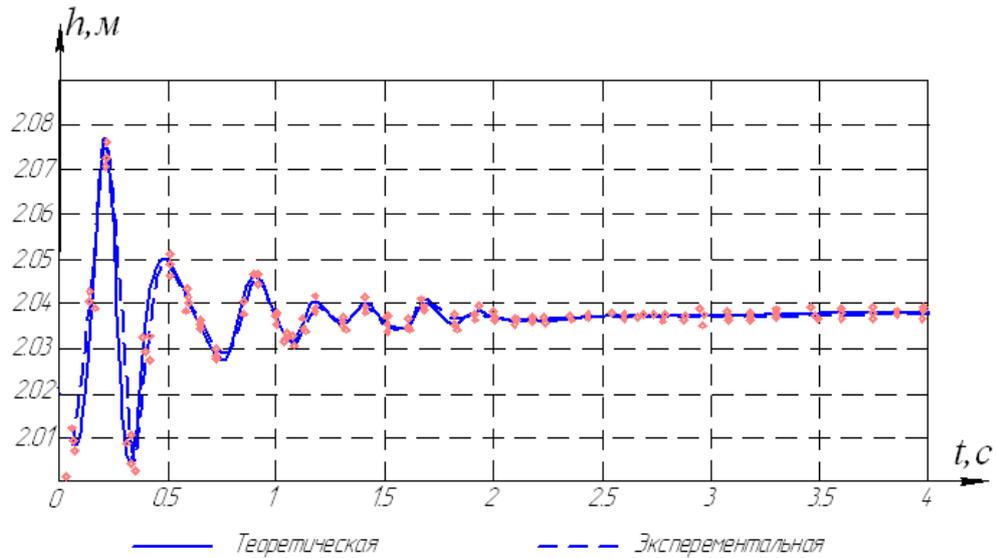


Рис. 4. Графическая зависимость колебаний трубопровода (530×10 мм) при ступенчатом воздействии

Для обеспечения безопасности рабочего процесса трубоукладочной колонны предлагается использовать систему автоматического управления, которая будет корректировать расстояния между отдельными машинами и контролировать равную загруженность всех КТ, регулируя высоту подвеса крюковой обоймы, тем самым компенсируя низкочастотные воздействия.

Данная система использует в качестве первичных информационных (входных) параметров следующие величины (рис. 5): F – силу на крюке; α – угол наклона КТ в поперечной плоскости; l – расстояние до идущего позади КТ; n – число оборотов грузовой лебедки; γ – угол наклона стрелы КТ. Выходными параметрами выступают электрические сигналы управления: $i_{упр}$ – сигнал изменения высоты подвеса крюковой обоймы, поступающий на гидрораспределитель управления грузовой лебедки; $l_{упр}$ – сигнал изменения расстояния между КТ, поступающий на сигнализатор расстояния.

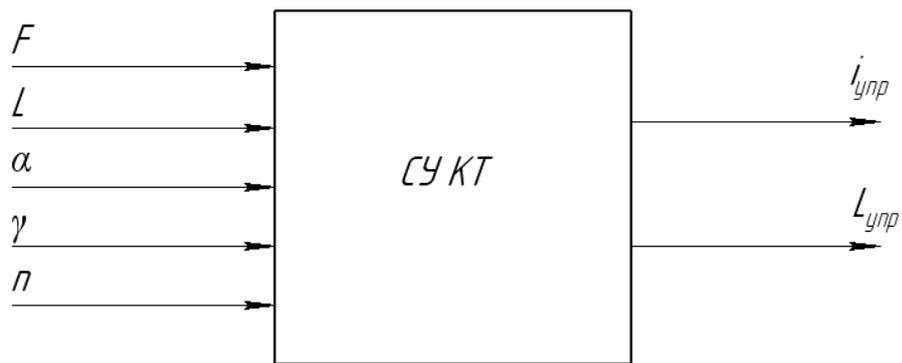


Рис. 5. Входные и выходные параметры системы управления трубоукладочной колонной

Для компенсации высокочастотных динамических воздействий на КТ предлагается установить устройство стабилизации грузового момента, принципиальная схема которого представлена на рис. 6. Принцип действия устройства стабилизации заключается в том, что на базовую машину 1 дополнительно устанавливается упруго-вязкая связь 8, один конец которой неподвижно закреплен, а к другому прикреплен шкив 9, через который проходит грузовой канат 4. Параметры упруго-вязкой связи подобраны таким образом, что при приближении значения грузового момента на крюке 6 к предельно допустимому значению момента устойчивости происходит удлинение грузового каната за счет удлинения связи 8 и происходит перераспределение нагрузки между различными КТ колонны.

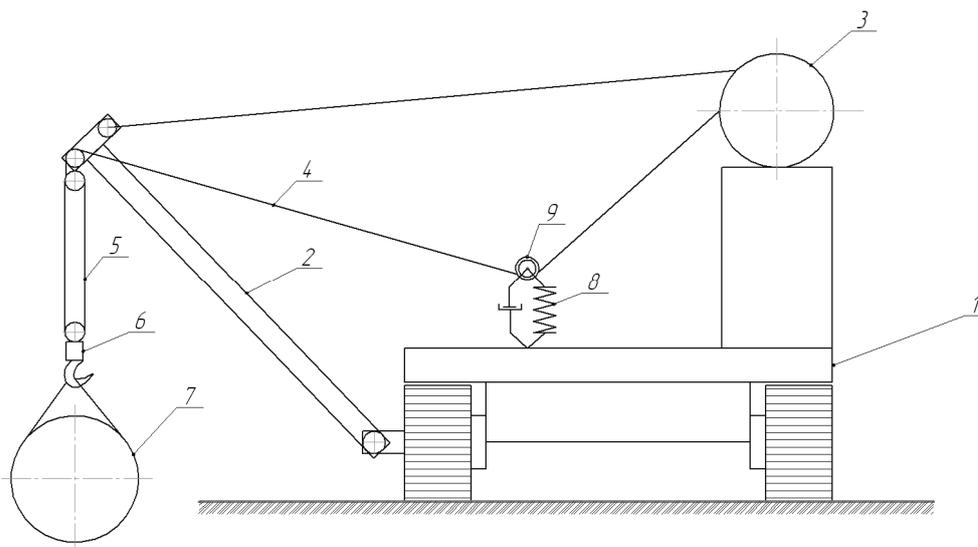


Рис. 6. Схема устройства стабилизации грузового момента крана-трубоукладчика

Применение системы управления комплектом машин трубоукладочной колонны и устройства стабилизации грузового момента позволяет исключить аварийные ситуации потери устойчивости отдельным КТ и всей колонной, и тем самым повысить безопасность и эффективность рабочего процесса трубоукладочной колонны. Данный вывод подтверждается расчетными экспериментами. С использованием динамической математической модели были получены графические зависимости грузового момента каждого КТ в составе трубоукладочной колонны с типовыми, т.е. разработанными ранее (рис. 7), и предлагаемыми (рис. 8) системами управления и безопасности.

Внедрение предлагаемой системы автоматического управления и устройства стабилизации грузового момента облегчает труд машинистов, делает его безопасным, поскольку грузовые моменты различных КТ в колонне при этом стремятся к некоторому одинаковому значению, не превышающему при этом момент устойчивости отдельного КТ. Максимальный грузовой момент наименее устойчивого КТ колонны в неблагоприятных с позиции устойчивости расчетных случаях снижается на величину до 40–45 % (см. рис. 7, 8).

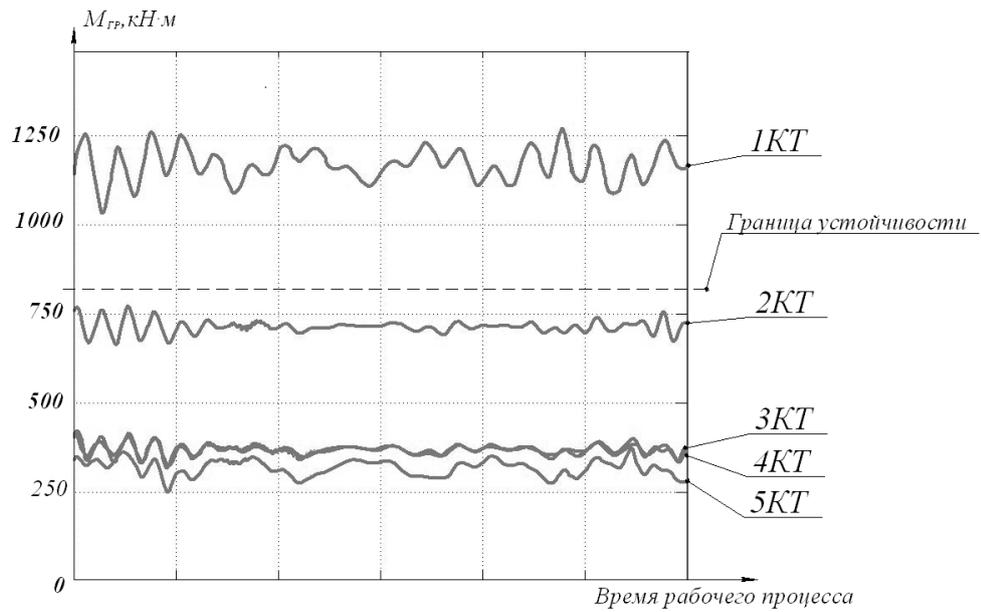


Рис. 7. Графические зависимости изменения грузового момента кранов-трубоукладчиков, входящих в состав трубоукладочной колонны с типовыми устройствами безопасности (пример)

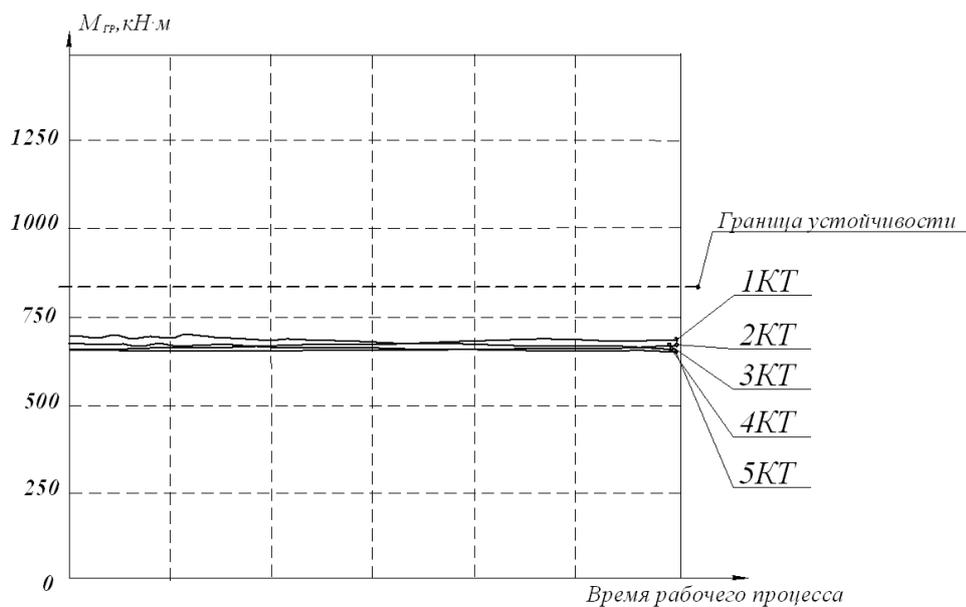


Рис. 8. Графические зависимости изменения грузового момента кранов-трубоукладчиков, входящих в состав трубоукладочной колонны с системой автоматического управления и устройством стабилизации грузового момента (пример)

Заключение

Указанный результат достигается оптимизацией грузовых моментов КТ всей колонны в комплексе и учетом и оптимизацией ряда дополнительных

параметров рабочего процесса, прежде всего расстояния между отдельными КТ в составе колонны. В разработанных ранее системах данное расстояние не учитывалось. Кроме того, дополнительно происходит перераспределение высокочастотных колебаний нагрузки от общего груза между отдельными КТ при движении по неровностям микрорельефа местности при помощи предлагаемой конструкции устройства стабилизации грузового момента. Разработанные ранее системы не позволяют осуществить подобное перераспределение, что увеличивает достигаемые максимальные значения грузового момента на отдельной машине.

Список литературы

1. **Шабалин, А. Н.** Математическое описание трубопровода для создания систем управления трубоукладочной колонной / А. Н. Шабалин // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2012. – № 3. – С. 134–136.
2. **Щербаков, В. С.** Оценка устойчивости автокрана по моменту запаса устойчивости / В. С. Щербаков, М. С. Кoryтов, С. А. Зырянова // Машины и процессы в строительстве : сб. науч. тр. – Вып. 5. – Омск : СибАДИ, 2004. – С. 184–187.
3. **Кoryтов, М. С.** Моделирование динамической системы автокрана при помощи блоков пакета «SIMMECHANICS» системы MATLAB / М. С. Кoryтов, С. А. Зырянова // Омский научный вестник. – 2004. – № 4 (29). – С. 88–90.
4. **Щербаков, В. С.** Математическая модель крана-трубоукладчика на базе гусеничной машины / В. С. Щербаков, М. С. Кoryтов // Многоцелевые гусеничные и колесные машины: разработка, производство, боевая эффективность, наука и образование (Броня – 2002) : матер. межрегион. науч.-техн. конф. – Омск : ОТИИ, 2002. – Ч. 3. – С. 42–45.
5. **Щербаков, В. С.** Математическая модель трубопровода как объекта управления кранов-трубоукладчиков / В. С. Щербаков, М. С. Кoryтов, Ю. Б. Тихонов // Информационный листок. – Омск : ЦНТИ, 2003. – № 1.
6. **Кoryтов, М. С.** Метод составления уравнений динамики для исследования движения подъемно-транспортных машин в больших перемещениях / М. С. Кoryтов, П. Ю. Манник // Дорожные и строительные машины (исследование, испытание и расчет) : сб. науч. тр. – Вып. 4. – Омск : СибАДИ, 2001. – Ч. 4. – С. 72–79.
7. Система автоматизированного моделирования стрелового грузоподъемного крана : моногр. / В. С. Щербаков, С. А. Зырянова, М. С. Кoryтов. – Омск : СибАДИ, 2009. – 104 с.
8. Статическая и динамическая устойчивость фронтальных погрузчиков : моногр. / В. С. Щербаков, М. С. Кoryтов. – Омск : СибАДИ, 1998. – 100 с.

References

1. Shabalin A. N. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii* [Problems of machine building and automation]. 2012, no. 3, pp. 134–136.
2. Shcherbakov V. S., Korytov M. S., Zyryanova S. A. *Mashiny i protsessy v stroitel'stve: sb. nauch. tr. Vyp. 5.* [Machines and processes in construction: collected papers. Issue 5]. Omsk: SibADI, 2004, pp. 184–187.
3. Korytov M. S., Zyryanova S. A. *Omskiy nauchnyy vestnik* [Omsk scientific bulletin]. 2004, no. 4 (29), pp. 88–90.
4. Shcherbakov V. S., Korytov M. S. *Mnogotsel'evye gusenichnyye i kolesnyye mashiny: razrabotka, proizvodstvo, boevaya effektivnost', nauka i obrazovanie (Bronya – 2002): mater. mezhregion. nauch.-tekhn. konf.* [Multipurpose track and wheel machines: development, production, combat efficiency, science and education (Armor – 2002): proceedings of the Interregional scientific and technical conference]. Omsk: OTII, 2002, part 3, pp. 42–45.

5. Shcherbakov V. S., Korytov M. S., Tikhonov Yu. B. *Informatsionnyy listok* [Information bulletin]. Omsk: TsNTI, 2003, no. 1.
6. Korytov M. S., Mannik P. Yu. *Dorozhnye i stroitel'nye mashiny (issledovanie, ispytanie i raschet): sb. nauch. tr. Vyp. 4* [Road and construction machines (research, testing and calculation): collected papers. Issue 4]. Omsk: SibADI, 2001, part 4, pp. 72–79.
7. Shcherbakov V. S., Zyryanova S. A., Korytov M. S. *Sistema avtomatizirovannogo modelirovaniya strelovogo gruzopod'emnogo krana: monogr.* [System of automated modeling of jib hoisting crane: monograph]. Omsk: SibADI, 2009, 104 p.
8. Shcherbakov V. S., Korytov M. S. *Staticheskaya i dinamicheskaya ustoychivost' frontal'nykh pogruchikov: monogr.* [Static and dynamic stability of front-end loaders: monograph]. Omsk: SibADI, 1998, 100 p.

Щербаков Виталий Сергеевич

доктор технических наук, профессор,
декан факультета нефтегазовой
и строительной техники, Сибирская
государственная автомобильно-дорожная
академия (Россия, г. Омск, пр. Мира, 5)

E-mail: sherbakov_vs@sibadi.org

Shcherbakov Vitaliy Sergeevich

Doctor of engineering sciences, professor,
dean of the faculty of oil-and-gas
and construction technology, Siberian
State Automobile and Highway Academy
(5 Mira avenue, Omsk, Russia)

Корытов Михаил Сергеевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра конструкционных материалов
и специальных технологий, Сибирская
государственная автомобильно-дорожная
академия (Россия, г. Омск, пр. Мира, 5)

E-mail: kms142@mail.ru

Korytov Mikhail Sergeevich

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of construction materials
and special technologies, Siberian State
Automobile and Highway Academy
(5 Mira avenue, Omsk, Russia)

Шабалин Андрей Николаевич

аспирант, Сибирская государственная
автомобильно-дорожная академия
(Россия, г. Омск, пр. Мира, 5)

E-mail: andreishabalin@mail.ru

Shabalin Andrey Nikolaevich

Postgraduate student, Siberian State
Automobile and Highway Academy
(5 Mira avenue, Omsk, Russia)

УДК 621.86./87.

Щербаков, В. С.

Совершенствование методов управления машинными комплексами, обеспечивающих оптимизацию рабочего процесса трубоукладочной колонны / В. С. Щербаков, М. С. Корытов, А. Н. Шабалин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 4 (28). – С. 180–188.

Т. Б. Тюрбеева, Г. Д. Волкова, О. Г. Григорьев

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СОЗДАНИЯ,
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ ПРИКЛАДНЫХ
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ НА БАЗЕ
МЕТОДОЛОГИИ АВТОМАТИЗАЦИИ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ТРУДА¹**

Аннотация. *Актуальность и цели.* Целью работы является повышение эффективности процессов создания, функционирования и развития прикладных автоматизированных систем за счет разработки обобщенного нормативно-методического обеспечения этих процессов на базе методологии автоматизации интеллектуального труда. *Материалы и методы.* В процессе исследований и разработок использовались: оригинальная методология автоматизации интеллектуального труда, обеспечивающая промышленный способ создания прикладных автоматизированных систем, методы моделирования прикладных задач, подлежащих автоматизации, в рамках этой методологии и системный подход как инвариантное представление и моделирование различных процессов. *Результаты.* Исследованы, проанализированы особенности создания, функционирования и развития автоматизированных систем на базе методологии автоматизации интеллектуального труда и разработаны формальные описания модели для указанных процессов. Выявлены взаимосвязи между содержательными характеристиками рассматриваемых процессов, характеристиками среды этих процессов и содержательными характеристиками входных и выходных объектов на основе системного подхода и теории систем. *Выводы.* Проведенные исследования и моделирования особенностей создания, функционирования и развития прикладных автоматизированных систем на базе методологии автоматизации интеллектуального труда на основе существующей нормативной базы позволили установить специфику моделей функционирования автоматизированных систем.

Ключевые слова: прикладные системы, методология автоматизации интеллектуального труда, формальное описание.

T. B. Tyurbeeva, G. D. Volkova, O. G. Grigor'ev

**MODELING OF THE PROCESSES OF CREATION,
FUNCTIONING AND DEVELOPMENT OF APPLIED
AUTOMATED SYSTEMS BASED ON THE METHODOLOGY
OF AUTOMATION OF INTELLECTUAL LABOR**

Abstract. *Background.* The aim of the study is to increase the efficiency of the creation, operation and development of the application of automated systems through the development of generalized regulations and methodologies of these processes on the basis of methodology of automation of intellectual labor. *Materials and meth-*

¹ Данная статья подготовлена в рамках выполнения инициативного проекта №12-07-00185 «Исследование и обоснование научно-методического обеспечения процессов создания, функционирования и развития прикладных автоматизированных систем на основе методологии автоматизации интеллектуального труда» по гранту РФФИ.

ods. In the process of research and development were used: the original methodology of automation of intellectual labor, which provides a way to create an industrial application of automated systems, methods of applied tasks modeling, subject to automation, as part of the methodology and a systematic approach as an invariant representation and modeling of different processes. *Results.* The authors investigated and analyzed the features of creation, operation and development of the automated systems based on the methodology of automation of intellectual labor, and developed formal descriptions of models to these processes. The researchers identified the relationships between the substantive characteristics of these processes, characteristics of the environment of these processes and meaningful characteristics of the input and the output objects based on a systematic approach and systems theory. *Conclusions.* Studies and modeling features of creation, operation and development of the automated systems for applications based on the methodology of automation of intellectual labor on the basis of existing regulatory framework allow to establish the specificity of models of the operation of the automated systems.

Key words: applied systems, methodology of automation of intellectual work, formal description.

В настоящее время для разработки прикладных автоматизированных систем (ПАС) используется широкий спектр инструментальных средств, поддерживающих определенные методологии создания автоматизированных систем различного назначения. Использование существующих методов и средств создания ПАС является не достаточно эффективным из-за ориентации их на представление и моделирование хорошо задокументированной информации, в то время как для многих автоматизированных систем (АС) процесс выявления/объективирования информации и знаний о задаче из памяти специалистов обуславливает одну из фундаментальных проблем автоматизации интеллектуального труда [1].

1. Моделирование процессов создания прикладных автоматизированных систем на базе методологии автоматизации интеллектуального труда

Исследование подходов к автоматизации производственных и управленческих задач, применяемых в них методов и используемых стандартов, регламентирующих процесс создания ПАС, определило необходимость их моделирования на основе системного подхода [2].

Одним из подходов в области автоматизации проектных и управленческих задач является разработанная на кафедрах «Информационные технологии и вычислительные системы» и «Когнитивные технологии проектирования» МГТУ «СТАНКИН» методология автоматизации интеллектуального труда (МАИТ).

Принципиальной особенностью МАИТ является то, что она обуславливает промышленный способ создания ПАС и обеспечивает формирование модельных представлений прикладных задач как инвариантных к программно-техническим средам и средствам их реализации, так и ориентированных на них, что позволяет достаточно быстро переводить автоматизированные комплексы на новые среды и средства реализации [3]. На рис. 1 схематично представлен процесс создания АС по МАИТ в соответствии с промышленным способом создания [4–7].

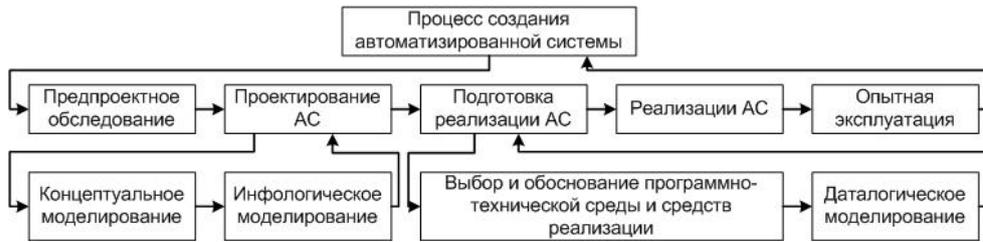


Рис. 1. Процесс создания автоматизированной системы по МАИТ

Модель процесса создания АС по МАИТ на основе системного подхода и теории систем имеет вид [8, 9]:

$$S_M = \langle Y_M, X_M, q(Y_M), q(X_M), R_M^{YX} \rangle,$$

где $Y_M = \langle \overline{Y_M}, R_M^Y \rangle$ – система этапов и действий (структура процесса создания) по МАИТ, в которой $\overline{Y_M}$ – множество элементов системы, описывающих этапы и действия, R_M^Y – множество связей между этапами и действиями; $X_M = \langle \overline{X_M}, R_M^X \rangle$ – система результатов или входных/выходных объектов по МАИТ, в которой $\overline{X_M} = \overline{X_{M1}} \cup \overline{X_{M2}}$ – множество элементов системы, состоящее из подмножества модельных представлений $\overline{X_{M1}}$ и подмножества элементов системы документирования, описывающих документы разного уровня сложности $\overline{X_{M2}}$ по МАИТ, R_M^X – множество связей между этими объектами; $q(Y_M) = \bigcup_{i=1}^m q_i(Y_M)$ – множество разнородных свойств элементов системы, описывающих структуру процесса создания АС по МАИТ; $q(X_M) = \bigcup_{i=1}^m q_i(X_M)$ – множество разнородных свойств элементов системы, описывающих систему результатов или входных/выходных объектов по МАИТ; R_M^{YX} – множество связей между объектами модельных представлений, документирования, этапами и действиями.

С точки зрения теории систем систему S_M , описывающую процесс создания АС по МАИТ, необходимо дополнить параметрами, отражающими среду процесса создания. Формально это можно представить путем введения в систему S_M дополнительных компонентов и отношений:

$$S_M^2 = \langle S_M, Z_{SR}, R_M^{SR} \rangle = \langle Y_M, X_M, q(Y_M), q(X_M), R_M^{YX}, Z_{SR}, R_M^{SR} \rangle,$$

где $Z_{SR} = \langle SR, q(SR), R_{SR} \rangle$ – структура, описывающая среду процесса создания АС по МАИТ, в которой SR – среда процесса создания АС по МАИТ, $q(SR)$ – множество свойств элементов среды, R_{SR} – множество связей между элементами среды; R_M^{SR} – множество связей между элементами системы S_M^2 .

Среда процесса создания АС по МАИТ представляет собой объединение множеств, описывающих субъект, средства (как минимум, нормативно-методическое обеспечение) и временные ресурсы, что может быть описано как: $SUB \subset SR, T \subset SR, N_M \subset SR$; $SR = SUB \cup T \cup N_M$, где SUB – множество элементов среды, описывающее субъекта процесса создания АС (т.е. группу разработчиков АС, включая аналитиков, когнитологов, системотехников и других специалистов); T – временной ресурс процесса создания АС; $N_M = \langle \overline{N_M}, q(\overline{N_M}), R_M^N \rangle$ – множество элементов среды, описывающее структуру элементов нормативно-методического обеспечения по МАИТ, в котором $\overline{N_M}$ – множество, описывающее элементы нормативно-методического обеспечения; $q(\overline{N_M})$ – множество свойств элементов нормативно-методического обеспечения; R_M^N – множество связей между элементами нормативно-методического обеспечения. Множество $\overline{N_M}$ представляет собой объединение нормативных документов разных уровней сложности:

$\overline{N_M} = \bigcup_i H_i$, где $H_i = \{h_{ij}\}$ – множество нормативных документов на i -м уровне сложности.

Таким образом, N_M регламентирует структуру процесса создания автоматизированной системы Y_M , правила выполнения всех действий $\overline{Y_M}$, правила представления результатов $\overline{X_M}$ по МАИТ.

2. Моделирование процесса функционирования ПАС на базе МАИТ

Содержательной основой процесса проектирования АС является модель процесса ее перспективного функционирования. Модель процесса функционирования АС по МАИТ на основе системного подхода и теории систем имеет вид

$$F = \langle Y_F, X_F, q(Y_F), q(X_F), R_F \rangle,$$

где $Y_F = \langle \overline{Y_F}, R_F^Y \rangle$ – система автоматизированных процедур (структура процесса функционирования), в которой $\overline{Y_F}$ – множество автоматизированных процедур, R_F^Y – множество связей между автоматизированными процедурами; $X_F = \langle \overline{X_F}, R_F^X \rangle$ – система входов/выходов автоматизированных процедур, в которой $\overline{X_F} = \overline{X_{F1}} \cup \overline{X_{F2}}$ – множество элементов системы, состоящее из подмножества автоматизированных решений $\overline{X_{F1}}$ и подмножества отчетных документов для автоматизированных решений $\overline{X_{F2}}$, R_F^X – множество связей между этими объектами; $q(Y_F) = \bigcup_{i=1}^m q_i(Y_F)$ – множество разнородных свойств элементов системы, описывающих структуру процесса функциони-

рования; $q(X_F) = \bigcup_{i=1}^m q_i(X_F)$ – множество разнородных свойств элементов

системы, описывающих систему входов/выходов; R_F – множество связей между объектами и действиями.

С точки зрения теории систем систему F , описывающую процесс функционирования АС, необходимо дополнить параметрами, отражающими среду процесса функционирования. Формально это можно представить путем введения в систему F дополнительных компонентов и отношений:

$$F^2 = \langle F, Z_F^{SR}, R_F^{SR} \rangle = \langle Y_F, X_F, q(Y_F), q(X_F), R_F, Z_F^{SR}, R_F^{SR} \rangle,$$

где $Z_F^{SR} = \langle SR_F, q(SR_F), R_F^Z \rangle$ – структура, описывающая среду процесса функционирования АС, в которой SR_F – среда процесса функционирования АС; $q(SR_F)$ – множество свойств элементов среды; R_F^Z – множество связей между элементами среды; R_F^{SR} – множество связей между элементами системы F^2 .

Среда процесса функционирования АС представляет собой объединение множеств, описывающих субъект, временные ресурсы и программно-технические средства, что может быть описано как: $SUB_F \subset SR_F$, $T_F \subset SR_F$, $PTS \subset SR_F$; $SR_F = SUB_F \cup T_F \cup PTS$, где SUB_F – множество элементов среды, описывающее субъекта процесса функционирования АС (т.е. системных администраторов, администраторов баз данных, прикладных пользователей и других специалистов); T_F – временной ресурс процесса функционирования АС; $PTS = \langle PTS, q(PTS), R_{PTS} \rangle$ – система элементов, описывающих программно-технические средства процесса функционирования, в которой $PTS = \overline{PTS}_F \cup N_F$ – множество элементов системы, состоящее из подмножества программно-технических средств \overline{PTS}_F и подмножества элементов системы, описывающих нормативно-методическое обеспечение по использованию программно-технических средств N_F , где $\overline{PTS}_F = \{ТО_i; ПО_i\}$ (в свою очередь техническое обеспечение представляет собой множество аппаратных и сетевых компонентов $ТО_i = \{АП_i; СЕТ_i\}$, а программное обеспечение представляет собой множество общих компонентов и прикладных $ПО_i = \{ОБ_i; \dots\}$; $q(PTS)$ – множество свойств элементов, описывающих программно-технические средства; R_{PTS} – множество связей между элементами, описывающими программно-технические средства.

Графическое представление модели процесса функционирования ПАС (по аналогии [10]) приведено на рис. 2.

3. Моделирование процесса развития ПАС на базе МАИТ

Бурное развитие программно-технических сред и средств автоматизации обуславливает необходимость моделирования процессов совершенство-

вания ПАС. Модель процесса развития АС по МАИТ на основе системного подхода и теории систем имеет вид

$$P = \langle Y_P, \Delta X_P, q(Y_P), q(\Delta X_P), R_P \rangle,$$

где $Y_P = \langle \overline{Y_P}, R_P^Y \rangle$ – система действий (структура процесса развития) по МАИТ, в которой $\overline{Y_P}$ – множество элементов системы, описывающих этапы и действия, R_P^Y – множество связей между этапами и действиями; $\Delta X_P = \langle \overline{\Delta X_P}, R_P^X \rangle$ – система модифицированных результатов или входных/выходных объектов по МАИТ, в которой $\overline{\Delta X_P} = \overline{\Delta X_{P1}} \cup \overline{\Delta X_{P2}}$ – множество элементов системы, состоящее из подмножества модифицированных модельных представлений $\overline{\Delta X_{P1}}$ и подмножества элементов системы документирования, описывающих модифицированные документы разного уровня сложности $\overline{\Delta X_{P2}}$ по МАИТ; R_P^X – множество связей между этими объектами;

$q(Y_P) = \bigcup_{i=1}^m q_i(Y_P)$ – множество разнородных свойств элементов системы, описывающих структуру процесса развития; $q(\Delta X_P) = \bigcup_{i=1}^m q_i(\Delta X_P)$ – множество

разнородных свойств элементов системы, описывающих систему модифицированных результатов или входов/выходов; R_P – множество связей между модифицированными объектами документирования, этапами и действиями.



Рис. 2. Графическое представление формальной модели процесса функционирования АС

С точки зрения теории систем систему P , описывающую процесс развития АС, необходимо дополнить параметрами, отражающими среду процесса развития. Формально это можно представить путем введения в систему P дополнительных компонентов и отношений:

$$P^2 = \langle P, Z_P^{SR}, R_P^{SR} \rangle = \langle Y_P, X_P, q(Y_P), q(X_P), R_P, Z_P^{SR}, R_P^{SR} \rangle,$$

где $Z_P^{SR} = \langle SR_P, q(SR_P), R_P^Z \rangle$ – структура, описывающая среду процесса развития АС по МАИТ, в которой SR_P – среда процесса развития АС по МАИТ; $q(SR_P)$ – множество свойств элементов среды; R_P^Z – множество связей между элементами среды; R_P^{SR} – множество связей между элементами системы P^2 .

Среда процесса развития АС представляет собой объединение множеств, описывающих субъект, средства (нормативно-методическое обеспечение и программно-техническое обеспечение) и временные ресурсы, что может быть описано как:

$$SUB_P \subset SR_P, T_P \subset SR_P, N_P \subset SR_P, PTS_P \subset SR_P;$$

$$SR_P = SUB_P \cup T_P \cup N_P \cup PTS_P,$$

где SUB_P – множество элементов среды, описывающее субъекта процесса развития АС (т.е. группу разработчиков АС, включая аналитиков, когнитологов, системотехников и других специалистов); T_P – множество элементов среды, описывающее характеристики временных ресурсов процесса развития АС; $N_P = \langle \overline{N_P}, q(\overline{N_P}), R_P^N \rangle$ – множество элементов среды, описывающее структуру элементов нормативно-методического обеспечения по МАИТ, в котором $\overline{N_P}$ – множество, описывающее элементы нормативно-методического обеспечения по МАИТ; $q(\overline{N_P})$ – множество свойств элементов нормативно-методического обеспечения по МАИТ; R_P^N – множество связей между элементами нормативно-методического обеспечения по МАИТ. Множество $\overline{N_P}$ представляет собой объединение нормативных документов разных уровней сложности: $\overline{N_P} = \bigcup_i H_i^P$, где $H_i^P = \{h_{ij}^P\}$ – множество нормативных документов на i -м уровне сложности. Таким образом, N_P регламентирует структуру процесса развития АС R_P^Y , правила выполнения всех действий $\overline{Y_P}$, правила представления модифицированных результатов $\overline{\Delta X_P}$ по МАИТ; $PTS_P = \langle \overline{PTS}, q(\overline{PTS}), R_{PTS}^P \rangle$ – система элементов, описывающих модифицированные программно-технические средства процесса развития АС по МАИТ, в которой $\overline{PTS} = \overline{PTS_P} \cup \Delta N_P$ – множество элементов системы, состоящее из подмножества программно-технических средств $\overline{PTS_P}$ и подмножества элементов системы, описывающих модифицированные нормативно-методические документы по использованию программно-технических средств ΔN_P , где $\overline{PTS_P} = \{TO_i; ПО_i\}$ (в свою очередь, техническое обеспе-

чение представляет собой множество аппаратных и сетевых компонентов $ТО_i = \{АП_i; СЕТ_i\}$, а программное обеспечение представляет собой множество общих компонентов и прикладных $ПО_i = \{ОБ_i; ПР_i\}$; $q(\overline{PTS})$ – множество свойств элементов, описывающих программно-технические средства; R_{PTS} – множество связей между элементами, описывающими программно-технические средства.

Таким образом, формальное описание процессов создания, функционирования и развития ПАС позволяет: рассматривать не только этапы и результаты для всех указанных процессов, но и учитывать среду выполнения этих процессов; детализировать среду протекания процессов в виде организационной структуры, аппаратных средств, программных систем и нормативных документов и их увязку; использовать описание процессов на базе МАИТ для анализа и сопряжения различных подходов к автоматизации прикладных задач.

Список литературы

1. Проблематика нормативного обеспечения процессов создания и развития прикладных автоматизированных систем / Г. Д. Волкова, О. Г. Григорьев, О. В. Новоселова, Л. В. Григорьева, Т. Б. Тюрбеева // *Věda a vznik – 2012/2013: materialy IX mezinárodní vědecko-praktická conference*. – Díl 33. Moderní informační technologie. – Praha : Publishing House «Education and Science» s.r.o, 2013. – С. 12–16.
2. Исследование методов и подходов при создании автоматизированных систем различного назначения / О. Г. Григорьев, Г. Д. Волкова, О. В. Новоселова, Л. В. Григорьева, Т. Б. Тюрбеева // *Съвременни технологии на информации*. – София : Бял ГРАД-БГ, 2012. – С. 7–12.
3. **Волкова, Г. Д.** Развитие методологии автоматизации интеллектуального труда как теоретической основы создания прикладных автоматизированных систем / Г. Д. Волкова // *Информационные технологии и вычислительные системы*. – 2006. – № 1. – С. 105–117.
4. **Волкова, Г. Д.** Методология автоматизации интеллектуального труда. Часть 1 / Г. Д. Волкова // *Межотраслевая информационная служба*. – 2009. – № 1 (150). – С. 4–30.
5. **Волкова, Г. Д.** Методология автоматизации интеллектуального труда. Часть 2 / Г. Д. Волкова // *Межотраслевая информационная служба*. – 2009. – № 2 (147). – С. 9–20.
6. **Волкова, Г. Д.** Методология автоматизации интеллектуального труда. Часть 3 / Г. Д. Волкова // *Межотраслевая информационная служба*. – 2009. – № 3 (148). – С. 10–23.
7. **Волкова, Г. Д.** Методология автоматизации интеллектуального труда. Часть 4 / Г. Д. Волкова // *Межотраслевая информационная служба*. – 2010. – № 4 (149). – С. 15–30.
8. **Протасова, С. В.** Анализ и концептуальное моделирование взаимосвязей проектных и управленческих функций в деятельности проектно-конструкторской организации / С. В. Протасова, Г. Д. Волкова // *Технология машиностроения*. – 2007. – № 2. – С. 83–85.
9. **Волкова, Г. Д.** Особенности разработки средств поддержки управления проектами при создании САПР машиностроительного назначения / Г. Д. Волкова, Д. А. Володин // *Технология машиностроения*. – 2007. – № 2. – С. 66–68.
10. **Протасова, С. В.** Разработка метода и средств поддержки взаимосвязанного моделирования проектных и управленческих процессов при автоматизации дея-

тельности проектно-конструкторской организации : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Протасова С. В. – М., 2007. – С. 17–18.

References

1. Volkova G. D., Grigor'ev O. G., Novoselova O. V., Grigor'eva L. V., Tyurbееva T. B. *Věda a vznik – 2012/2013: materialy IX mezinárodní vědecko-praktická konference. – Díl 33. Moderní informační technologie*. Prague: Publishing House "Education and Science" s.r.o, 2013, pp. 12–16.
2. Grigor'ev O. G., Volkova G. D., Novoselova O. V., Grigor'eva L. V., Tyurbееva T. B. *S'vremenni tekhnologii na informatsii* [Modern technologies of information]. Sofiya: Byal GRAD-BG, 2012, pp. 7–12.
3. Volkova G. D. *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy* [Information technologies and computing systems]. 2006, no. 1, pp. 105–117.
4. Volkova G. D. *Mezhotraslevaya informatsionnaya sluzhba* [Interindustrial information service]. 2009, no. 1 (150), pp. 4–30.
5. Volkova G. D. *Mezhotraslevaya informatsionnaya sluzhba* [Interindustrial information service]. 2009, no. 2 (147), pp. 9–20.
6. Volkova G. D. *Mezhotraslevaya informatsionnaya sluzhba* [Interindustrial information service]. 2009, no. 3 (148), pp. 10–23.
7. Volkova G. D. *Mezhotraslevaya informatsionnaya sluzhba* [Interindustrial information service]. 2010, no. 4 (149), pp. 15–30.
8. Ppotasova S. V., Volkova G. D. *Tekhnologiya mashinostroeniya* [Technology of machine building]. 2007, no. 2, pp. 83–85.
9. Volkova G. D., Volodin D. A. *Tekhnologiya mashinostroeniya* [Technology of machine building]. 2007, no. 2, pp. 66–68.
10. Protasova S. V. *Razrabotka metoda i sredstv podderzhki vzaimosvyazannogo modelirovaniya proektnykh i upravlencheskikh protsessov pri avtomatizatsii deya-tel'nosti proektno-konstruktorskoj organizatsii: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Development of the method and means of support of interrelating modeling of project and management processes in project-construction organization's activity automation: author's abstract of dissertation to apply for the degree of the candidate of engineering sciences]. Moscow, 2007, pp. 17–18.

Тюрбеева Татьяна Борисовна

аспирант, Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» (Россия, г. Москва, Вадковский переулок, 3а)

E-mail: it_ktp@stankin.ru

Tyurbееva Tat'yana Borisovna

Postgraduate student, Moscow State Technological University "Stankin" (3a Vadkovskiy lane, Moscow, Russia)

Волкова Галина Дмитриевна

доктор технических наук, профессор, кафедра информационных технологий и вычислительных систем, Московский государственный технический университет «СТАНКИН» (Россия, г. Москва, Вадковский переулок, 3а)

E-mail: it_ktp@stankin.ru

Volkova Galina Dmitrievna

Doctor of engineering sciences, professor, sub-department of information technologies and computing systems, Moscow State Technological University "Stankin" (3a Vadkovskiy lane, Moscow, Russia)

Григорьев Олег Георгиевич

доктор технических наук, главный научный сотрудник, кафедра информационных технологий и вычислительных систем, Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» (Россия, г. Москва, Вадковский переулок, 3а)

E-mail: it_ktp@stankin.ru

Grigor'ev Oleg Georgievich

Doctor of engineering sciences, chief research scientist, sub-department of information technologies and computing systems, Moscow State Technological University "Stankin" (3a Vadkovskiy lane, Moscow, Russia)

УДК 621.7.06

Тюрбеева, Т. Б.

Моделирование процессов создания, функционирования и развития прикладных автоматизированных систем на базе методологии автоматизации интеллектуального труда / Т. Б. Тюрбеева, Г. Д. Волкова, О. Г. Григорьев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 4 (28). – С. 189–198.

И. И. Артемов, А. Е. Зверовщиков, А. Н. Мартынов

ФОРМИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ХАРАКТЕРИСТИК РАБОЧИХ ТЕЛ ДЛЯ ЦЕНТРОБЕЖНО-ПЛАНЕТАРНОЙ ОБЪЕМНОЙ ОБРАБОТКИ

Аннотация. *Актуальность и цели.* Детали сложной пространственной конфигурации часто требуют объемной отделочно-зачистной обработки с целью устранения остатков литниковых систем и облоя. Инструментом служат гранулированные шлифовальные материалы, для которых отсутствует системная оценка технологических свойств. Также не принимаются во внимание изменения при обработке свойств поверхностного слоя материала. Цель исследования: разработка приемов количественной оценки влияния параметров макроформы и жесткости связки гранул для объемной обработки на качество поверхностного слоя деталей. *Материалы и методы.* Проведено компьютерное моделирование контакта рабочих тел методом конечных элементов, экспериментальные исследования податливости рабочих тел, использованы положения теории абразивного резания и износа, основ математической теории эксперимента. Используются гранулы на полимерной связке и металлические рабочие тела. Экспериментальные образцы изготовлены из конструкционных углеродистых и высоколегированных сталей. *Результаты.* Систематизированы технологические характеристики и конструктивные параметры гранул для объемной обработки. Разработана методика определения влияния податливости гранул на параметры контакта при взаимодействии с обрабатываемой поверхностью и разработан критерий оценки процесса абразивного резания. Исследованы характеристики поверхностного слоя поверхностей после центробежно-планетарной объемной обработки. Разработаны критерии для назначения технологических режимов. *Выводы.* Выработаны основы оценки свойств рабочих тел для объемной обработки. Выявлены особенности и достоинства использования податливых гранул. Установлено, что при центробежно-планетарной объемной обработке происходит формирование сжимающих остаточных напряжений и упрочнение поверхностного слоя.

Ключевые слова: гранулированная среда, объемная обработка, планетарное движение, свойства гранул, податливость, моделирование, абразивное резание, качество поверхностного слоя.

I. I. Artemov, A. E. Zverovshchikov, A. N. Martynov

FORMING THE QUALITY OF SURFACE COATINGS OF WORKPIECES IN THE COURSE OF CHANGING CHARACTERISTICS OF WORKING MEDIA FOR THREE-AXIS CENTRIFUGAL TREATMENT

Abstract. *Background.* Work-pieces of complex space configuration often require three-dimensional fine-deseaming machining in order to liquidate remnants of gating systems and casting material. Granulated grinding material serves as an instrument; for those there is no system estimation of processing characteristics. Changes while processing properties of the surface coating of the material are not taken into account either. The aim of the research is to work out methods of quantitative as-

assessment of the impact on the quality of work-pieces' surface coating produced by characteristics of macrostructure and inflexibility of the grain pack. *Materials and methods.* Computer modeling of working media contact was carried out by the finite-element method, as well as experimental analysis of working media pliancy, ideas of abraser cutting and wear theory and foundations of the mathematical theory of experiment were used. Grains on resin bond and metal working media were used. Experimental samples are made of structural carbon and heat-resistant steel. *Results.* Technological characteristics and design factors of grains for three-dimensional machining were systematized. The method to estimate the impact of grain flexibility on characteristics of the contact point and estimation test of abraser cutting process was worked out. Characteristics of the diffusion layer of faces after three-axis planet centrifugal treatment were examined. Criteria for application of operating schedules were worked out. *Conclusions.* The authors worked out the grounds for evaluation of working media properties for three-dimensional machining and revealed the characteristic features and advantages of using pliable grains. It is stated that formation of compressive resting stress and hard-facing take place during three-axis planet centrifugal treatment.

Key words: granular medium, volume machining, planetary motion, characteristics of grains, pliancy, modeling, abraser cutting, condition of surface coating.

Объемная обработка в контейнерах с планетарным вращением является одним из методов, обеспечивающих эффективное шлифование и полирование мелких и средних деталей сложной формы. В промышленности используются установки различных конструкций, реализующие планетарное движение контейнеров [1, 2].

Движение массива загрузки в контейнерах этих установок позволяет реализовать скорости относительных перемещений до 2,5 м/с и давление шлифовального материала на поверхность заготовки до 0,2–0,3 МПа, что обеспечивает высокую производительность обработки, но сопровождается значительными нагрузками на абразивные гранулы (рабочие тела). В связи с этим к характеристикам гранулированного шлифовального материала, используемого при центробежно-планетарной обработке, предъявляются достаточно высокие требования.

Для объемной отделочно-зачистной обработки используется широкая гамма гранулированных материалов: бой шлифовальных кругов различной твердости, формованные гранулы на разнообразных связках, естественные органические тела (плодовые косточки), естественные абразивные материалы, деревянные кубики, металлические рабочие тела и т.д. Различные характеристики рабочих тел из перечисленных материалов обеспечивают формирование микронеровностей разного характера, упрочнение поверхности, удаление заусенцев в соответствии с технологическими задачами.

Рассмотрим технологические возможности рабочего тела при объемной обработке. Эффективность абразивных или деформирующих тел, составляющих рабочую загрузку, можно оценить по следующим аспектам:

1. Проникающая способность рабочего тела. Характеризуется возможностью формирования однородной по высоте и направлению шероховатости на поверхностях открытых, полужакрытых и закрытых зон детали.

2. Обработывающие свойства – способность удалять с поверхности заготовки слой материала, разрушать заусенец определенной толщины при назначенных режимах обработки.

3. Износостойкость рабочего тела. Определяется сохранением проникающей способности и обрабатываемых свойств в течение определенного основного времени.

Совокупность конструктивных параметров, обуславливающую технологические свойства рабочих тел для объемной обработки, можно отобразить диаграммой Исикавы (рис. 1).

Количественный подход к оценке некоторых характеристик формы рабочих тел представлен в ряде работ [3]. Однако большинство представленных параметров в научных работах и практической деятельности соответственно не исследованы и количественно не оцениваются.

Рассмотрим ряд неисследованных показателей рабочих тел, необходимых для имитационного моделирования. Чтобы перейти к определению формируемой на поверхности заготовки шероховатости, необходима методика определения площади S_e зоны контакта с единичным рабочим телом. Примем допущение, что давление P_Σ , приходящееся на поверхность единичного рабочего тела со стороны массива загрузки, определяет силу воздействия рабочего тела на поверхность заготовки. Тогда величина распределенного давления P_K в зоне контакта определится как

$$P_K = P_\Sigma / S_e.$$

Соответственно изменение S_e приводит в большинстве случаев к изменению высоты формируемых микронеровностей при давлении среды $P_\Sigma = \text{const}$. Постоянная величина S_e характерна только для рабочих тел сферической формы. Для рабочих тел с иными формами необходимо исследование возможного изменения площади зоны контакта. Одним из факторов, усложняющих эту задачу, является податливость заготовки и рабочего тела, движущихся в массиве загрузки. Эта податливость приводит к перемещениям заготовки и рабочего тела в момент контактирования. За счет этих перемещений происходит изменение траектории рабочего тела, которое позволяет в той или иной степени копировать форму обрабатываемой поверхности.

Податливость поверхности рабочего тела при контакте является практически неисследованной характеристикой. В исследованиях, выполняемых с применением имитационного моделирования объемной обработки, рабочее тело, как правило, рассматривается абсолютно твердым. Такое допущение справедливо для металлических шаров, приемлемо для абразивных гранул на керамической связке. Однако для определенной формы рабочих тел на полимерной основе это допущение может внести существенные погрешности в результаты моделирования.

Изготовление и использование нежестких рабочих тел существенно расширяет возможности объемной обработки. Так, в производственных условиях для ряда отделочных операций используются деревянные и войлочные кубики, некоторые естественные органические тела, которые нельзя считать жесткими при моделировании взаимодействия с поверхностью детали. Однако естественные гранулированные среды, как правило, имеют значительный разброс прочностных и абразивных характеристик. В то же время создание искусственных нежестких гранул не обеспечено на данный момент расчетными методиками и системой оценочных критериев.

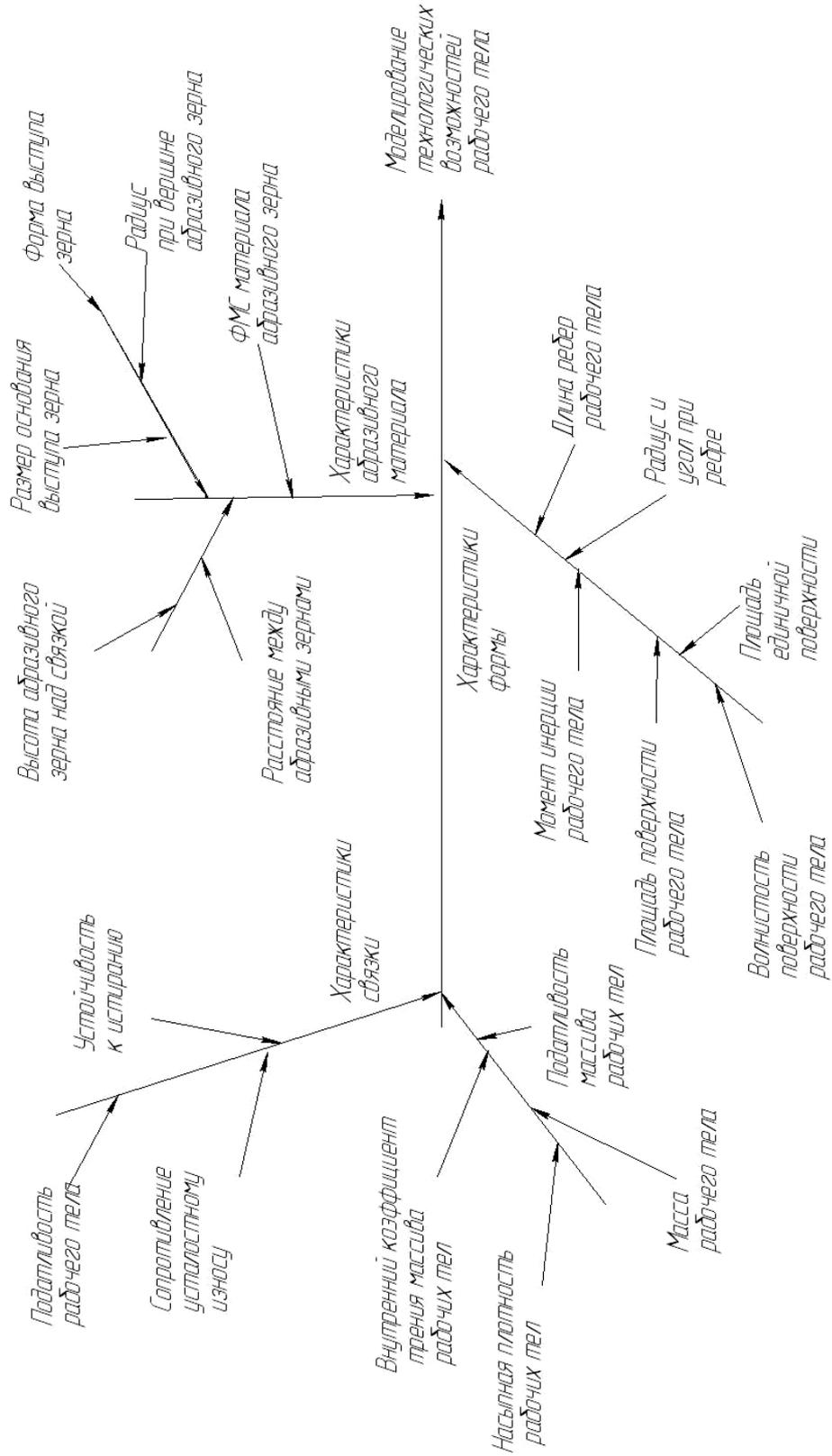


Рис. 1. Систематизация параметров рабочего тела для имитационного моделирования

К основным отличиям податливых рабочих тел от жестких гранул относятся:

- 1) возможность копирования форм обрабатываемой поверхности в зоне контакта;
- 2) малая вероятность точечного контакта с обрабатываемой поверхностью.

Эти отличия обуславливают, с одной стороны, отсутствие глубоких наколов на обрабатываемой поверхности; с другой стороны, снижение давления в зоне контакта, уменьшая интенсивность снятия припуска. Нежесткие рабочие тела будут предпочтительны при отделочной объемной обработке с целью обеспечения малых величин R_a и блескообразования. Стоит, однако, отметить, что высокие демпфирующие способности нежестких гранул могут являться недостатком для некоторых видов объемной обработки, например, для вибрационной обработки.

На (рис. 2) представлены результаты исследований деформации ребра керамического рабочего тела (**б**) и пластиковой гранулы (**а**, **в**) при контактировании с поверхностью детали для различных направлений деформирующей силы. Менее жесткая гранула характеризуется увеличением площади пятна контакта и, как следствие, ростом числа контактирующих с поверхностью абразивных зерен. Таким образом, по изменению пятна контакта под нагрузкой можно судить о податливости рабочего тела с определенными конструктивными характеристиками.

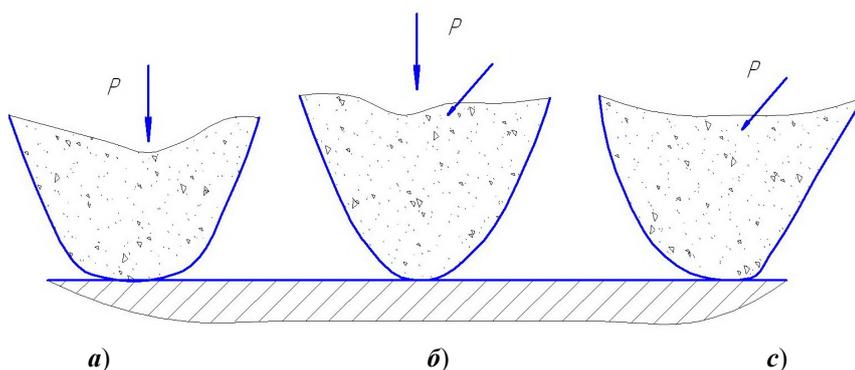


Рис. 2. Контур ребра рабочего тела при деформировании:
а – гранула на полимерной основе, вертикальное нагружение 70 Н;
б – керамическая гранула при различных вариантах нагружения;
в – гранула на полимерной основе, боковое нагружение 70 Н ($\times 12$)

Рассмотрим влияние изменения площади контактирования рабочего тела с обрабатываемой поверхностью на процесс абразивного резания.

Давление в зоне пятна контакта рабочего тела с заготовкой будет определяться силой P , действующей на рабочее тело со стороны массива загрузки и ограничено податливостью детали, размещенной в этом массиве.

Допустим, что поверхность абразивного рабочего тела представляет собой совокупность сферических инденторов с радиусом r при вершине. Тогда соотношение h/r , где h – глубина внедрения индентора, будет определять момент перехода к пластическому деформированию и микрорезанию поверх-

ности [4]. Глубина внедрения при полностью жестком контакте в этом случае описывается функцией f от двух переменных

$$h = f(P_1, n),$$

где P_1 – нагрузка на рабочее тело; n – число инденторов (зерен) в зоне контакта.

При нежестком контакте глубина внедрения уменьшится на величину упругих деформаций системы «рабочее тело – деталь»:

$$h_{\text{упр}} = f_2(P_1, j_1, j_2),$$

где j_1 – жесткость конструкции рабочего тела; j_2 – жесткость массива загрузки в динамическом состоянии.

Фактическое внедрение индентора в поверхность в этом случае определяется выражением

$$h_{\phi} = h - h_{\text{упр}}.$$

Так как расширение пятна контакта повлечет за собой увеличение количества зерен, контактирующих с поверхностью, до некоего числа n_1 , внедрение при жестком контакте составляет

$$h = f(P_1, n_1),$$

а фактическое внедрение при нежестком равно

$$h_{\phi} = f_1(P_1, n_1) - f_2(P_1, j_1, j_2).$$

Если необходимо реализовать абразивное резание нежесткими гранулами, динамические характеристики массива загрузки должны обеспечить давление P , при котором, исходя из известного соотношения [4], глубина внедрения инденторов должна соответствовать

$$h_{\phi} \geq (0,5 - (\tau / \sigma_T))r, \quad (1)$$

где τ – сдвиговая прочность молекулярной составляющей; σ_T – предел текучести обрабатываемого материала.

В случае выполнения такой технологической задачи, как полирование, или необходимости деформационной обработки нежесткими рабочими телами давление может колебаться в пределах, обеспечивающих условия пластической деформации

$$\frac{h_{\phi}}{r} \geq 3(C\sigma_T\theta)^2,$$

отсюда

$$h_{\phi} \geq 3r(C\sigma_T\theta)^2,$$

тогда условие обработки

$$3r(C\sigma_T\theta)^2 \leq h_{\phi} \leq \left(0,5 - \frac{\tau}{\sigma_T}\right)r, \quad (2)$$

где C – коэффициент изменения предела текучести от масштабного фактора и наклепа; θ – упругая постоянная обрабатываемого материала

$$\theta = \frac{1 - \mu^2}{E},$$

где μ – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости.

Распределение давлений в зоне контакта рабочего тела с поверхностью заготовки (рис. 3) можно получить, с определенными допущениями, используя моделирование методом конечных элементов [3]. Исходными данными для подобного расчета являются технологические режимы обработки в контейнерах с планетарным движением. Одним из основных моментов подобного моделирования является построение модели абразивной поверхности рабочего тела.

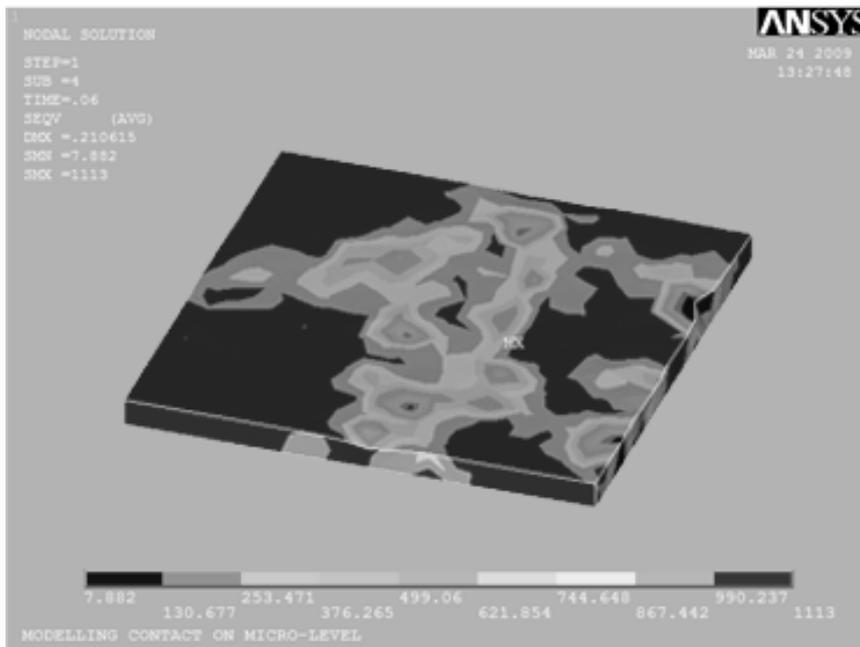


Рис. 3. Распределение контактных напряжений в зоне контакта зерен рабочего тела с поверхностью заготовки

Таким образом, соотношения (1) и (2) можно использовать как критерий для назначения технологических режимов, динамические параметры загрузки при которых обеспечивают требуемые характеристики взаимодействия нежесткого рабочего тела с заготовкой. Поскольку для центробежно-планетарной объемной обработки (ЦПОО) и практически для всех видов объемной обработки существуют методики расчета давления P обрабатывающей среды, а глубины внедрения зерен и высота формируемых микронеровностей при заданном давлении достаточно адекватно определяются по работам [3–5] или моделированием по методике конечных элементов (КЭ), то представленное решение задачи определения влияния податливости единичных гранул является очередным шагом к созданию адекватной модели взаимодействия абразивного рабочего тела и поверхности заготовки при объемной обработке.

Для исследования технологических возможностей ЦПОО с применением деформирующих рабочих тел были проведены вычислительные и экспе-

риментальные исследования. Объемная обработка такой гранулированной рабочей средой (ГРС) позволяет не только снизить шероховатость поверхностей заготовок, но и обеспечить упрочнение поверхностного слоя материала.

В качестве входных факторов были приняты:

- 1) средняя скорость движения рабочих тел в момент контакта V , м/с;
- 2) радиус рабочих тел $R_{ш}$, мм;
- 3) предел текучести материала заготовки σ_T , МПа;
- 4) величина исходной шероховатости заготовки $Ra_{и}$, мкм.

Обеспечение требуемой средней величины скорости движения рабочих тел V для уровней, требуемых при проведении эксперимента, обеспечивалось предварительным расчетом и назначением технологических режимов [5]. Образцы изготавливались из сталей 10, 45, 60Г2, 30Х13. Изменение предела текучести обеспечивалось соответствующей термической обработкой образцов.

Глубина отпечатка определялась расчетом в программном комплексе *Ansys LS-DYNA*.

Модель в кодовых и натуральных координатах для глубины упрочненного слоя $H_{упр}$ для образцов из стали 45 имеет вид

$$H_{упр} = 0,84 + 0,15x_1 + 0,22x_2 - 0,11x_3 + 0,04x_1x_2 - 0,02x_1x_3 + 0x_1x_4 - 0,03x_2x_3 + 0,03x_3^2 - 0,01x_4^2; \quad (3)$$

$$H_{упр} = 0,079 - 0,056V + 0,07R_{ш} - 0,0008\sigma_T + 0,039VR_{ш} - 0,0001V\sigma_T - 0,0002R_{ш}\sigma_T + 0,000001\sigma_T^2. \quad (4)$$

Глубина $H_{упр}$ упрочненного слоя пропорциональна скорости контакта и коррелирует с глубиной внедрения рабочего тела (рис. 4).

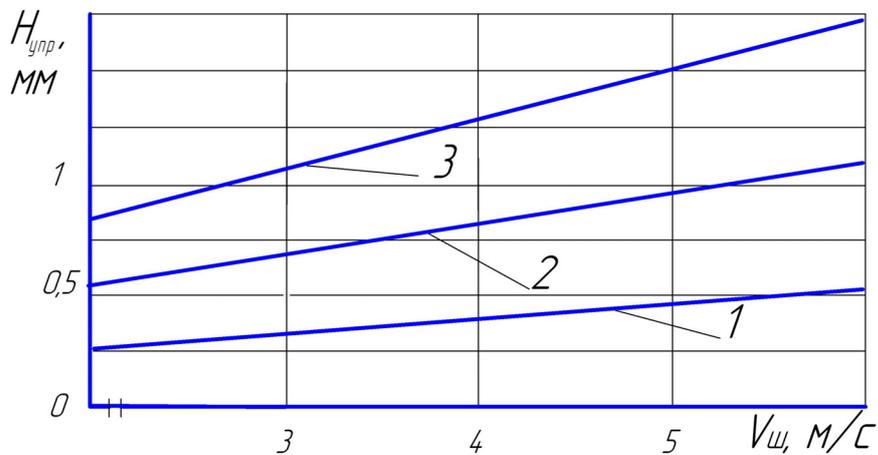


Рис. 4. Влияние скорости контактирования рабочего тела с поверхностью заготовки на глубину упрочненного слоя ($\sigma_T = 550$ МПа, $Ra_{и} = 2,4$ мкм; 1 – $R_{ш} = 2$ мм; 2 – $R_{ш} = 4$ мм; 3 – $R_{ш} = 6$ мм)

С ростом глубины внедрения увеличивается и площадь пятна контакта, соответственно среднее контактное давление при больших глубинах отпечатка снижается. Достижения требуемой глубины упрочнения скорости контактирования можно обеспечить регулированием частоты двух переносных вра-

щений водила и частоты вращения контейнеров при известных геометрических параметрах планетарного механизма.

Масса рабочего тела пропорциональна кубу его радиуса, поэтому рост ударного импульса определяет изменение между соотношением площади контакта и энергии взаимодействия (рис. 5). Таким образом, увеличение радиуса $R_{ш}$ тела является эффективным средством интенсификации упрочнения с граничным условием уменьшения проникающей способности.

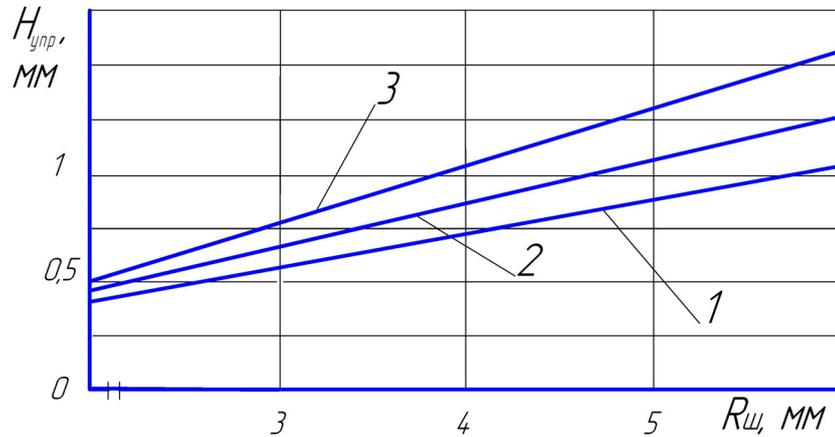


Рис. 5. Влияние радиуса тела $R_{ш}$ на глубину $H_{упр}$ упрочненного слоя ($\sigma_T = 550$ МПа; $Ra_{и} = 2,4$ мкм; 1 – $V = 2$ м/с; 2 – $V = 4$ м/с; 3 – $V = 6$ м/с)

Большая контактная площадь и энергия удара с увеличением радиуса $R_{ш}$ тела позволяют обеспечить более низкую шероховатость поверхностного слоя детали.

При увеличении предела текучести σ_T материала глубина $H_{упр}$ упрочненного слоя линейно уменьшается в соответствии с известными зависимостями [6], что подтверждает ее адекватность и применимость для практического использования (рис. 6).

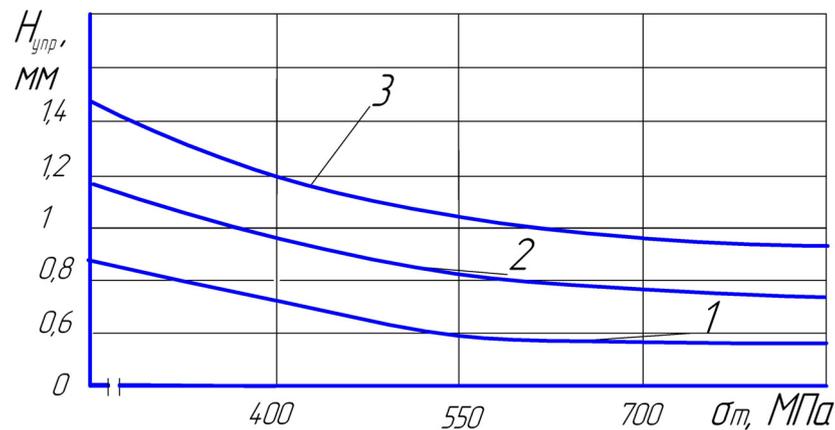


Рис. 6. Влияние физико-механических свойств материала на глубину $H_{упр}$ упрочненного слоя ($V = 4$ м/с; $Ra_{и} = 2,4$ мкм; 1 – $R_{ш} = 2$ мм; 2 – $R_{ш} = 4$ мм; 3 – $R_{ш} = 6$ мм)

Формирование свойств поверхностного слоя материала при центробежной объемной обработке деталей абразивными рабочими телами исследовались на образцах из стали 45, подвергнутых улучшению (НВ 192...285). В качестве рабочих тел использованы призмы ПТ 15×15.

Установлено (рис. 7), что микротвердость поверхности образцов при ЦПОО сначала несколько возрастает по сравнению с исходной, а затем стабилизируется. Время стабилизации пропорционально массе детали (рис. 7, зависимость 1).

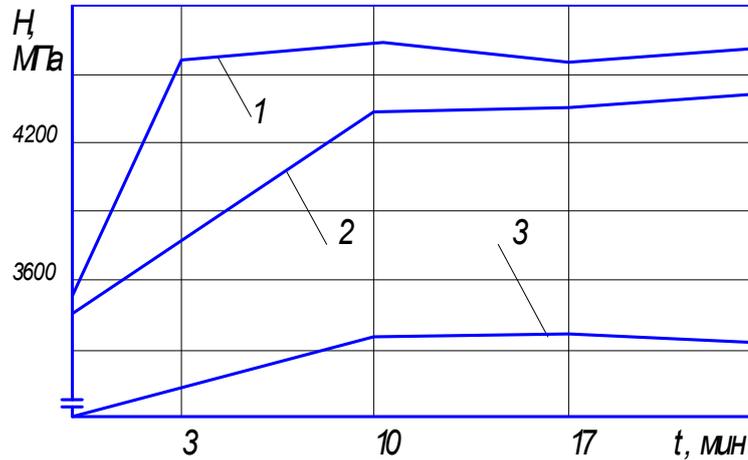


Рис. 7. Влияние времени на микротвердость поверхности деталей при объемной обработке абразивными гранулами ПТ15×15 ($n_1 = 140 \text{ мин}^{-1}$; $n_2 = 14 \text{ мин}^{-1}$; $n_3 = 1,73n_1$, $C = 0,55$): 1 – масса детали $m_d = 220 \text{ г}$; 2 – $m_d = 50 \text{ г}$; 3 – $m_d = 15 \text{ г}$

Это объясняется ростом динамического давления ГРС, большим моментом сопротивления динамическому воздействию элементарных слоев. Глубина деформированного слоя достигает 0,3...0,4 мм. Зависимость также имеет склонность к стабилизации, поскольку съем металла с ростом n_1 также монотонно возрастает [5]. Таким образом, доля энергии взаимодействия, затрачиваемая на пластическое деформирование, уменьшается, а на диспергирование материала – увеличивается.

При обработке поверхности телами на полимерной связке упрочнение (зависимость 2 на рис. 8) значительно меньше (до 4000...4100 МПа).

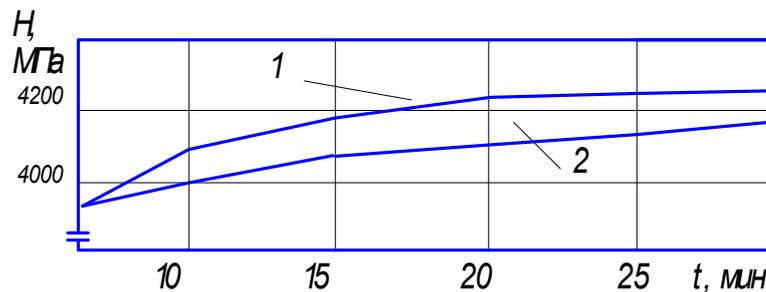


Рис. 8. Влияние времени t обработки на микротвердость поверхности ($m_d = 50 \text{ г}$, $n_1 = 130 \text{ мин}^{-1}$; $n_2 = 100...170 \text{ мин}^{-1}$; $V_o = 2,4 \text{ м/мин}$; $C = 0,6$; стали 45): 1 – рабочие тела на керамической связке; 2 – рабочие тела на полимерной связке)

Важной характеристикой качества поверхности является наличие в поверхностном слое остаточных напряжений. Установлено, что при обработке абразивными рабочими телами остаточные напряжения существенно не изменяются, а при использовании металлических рабочих тел в поверхностных слоях формируются остаточные напряжения сжатия (рис. 9), которые на глубине 0,5–0,6 мм уравниваются остаточными напряжениями растяжения.

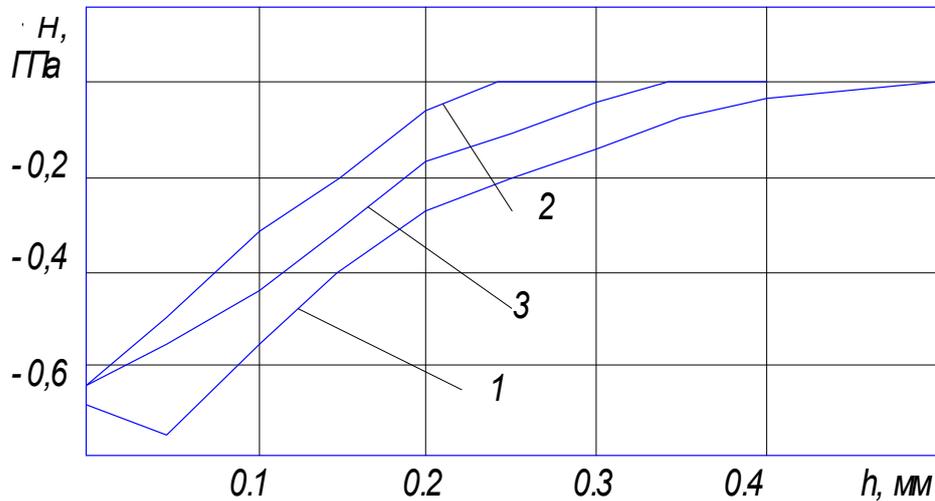


Рис. 9. Остаточные напряжения в поверхностных слоях металла: $C = 0,6$, стальные шары, образцы из стали 45 после тонкого фрезерования ($HRC = 40 \dots 45$; 1 – $n_1 = 160 \text{ мин}^{-1}$; $n_3 = 14 \text{ мин}^{-1}$; $t = 10 \text{ мин}$; 2 – $n_1 = 140 \text{ мин}^{-1}$; $n_3 = 14 \text{ мин}^{-1}$; $t = 3 \text{ мин}$; 3 – $n_1 = 140 \text{ мин}^{-1}$; $n_3 = 28 \text{ мин}^{-1}$; $t = 10 \text{ мин}$)

Для оценки изменения физико-механических свойств вязких труднообрабатываемых материалов в поверхностном слое получены экспериментальные зависимости микротвердости H_μ для стали 12Х18Н10Т от времени обработки и глубины поверхностного слоя (рис. 10).

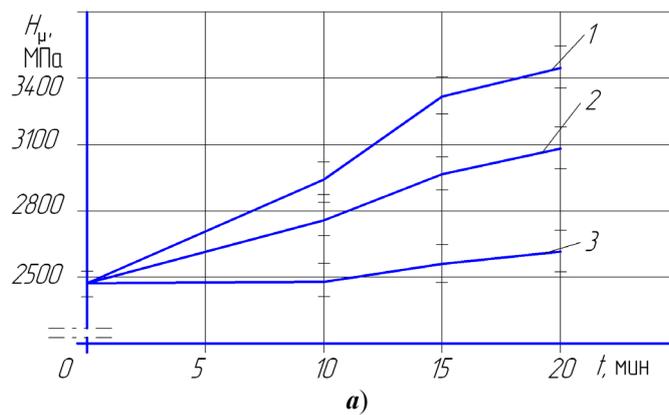


Рис. 10. Изменение микротвердости H_μ материала поверхности деталей из стали 12Х18Н10Т при различном времени обработки (а) и по глубине поверхностного слоя (б) (1 – ПТ15×15, $n_1 = 160 \text{ мин}^{-1}$; 2 – ПТ15×15, $n_1 = 120 \text{ мин}^{-1}$; 3 – фарфоровые шары Ø5 мм, $n_1 = 120 \text{ мин}^{-1}$)

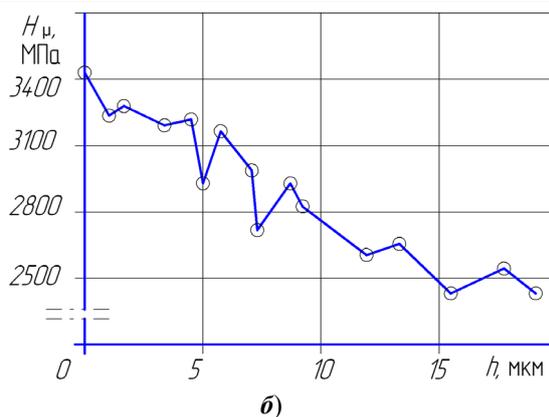


Рис. 10. Окончание

Таким образом, при ЦПОО в поверхностном слое металла формируются сжимающие остаточные напряжения, происходит некоторое увеличение микротвердости, что может служить основанием для применения рассматриваемой технологии в качестве упрочняющей на финишных стадиях технологического процесса.

Список литературы

1. А. с. 1705040 СССР, МКИЗ В24В 31/104. Способ центробежной абразивной обработки деталей и устройство для его осуществления / А. Н. Мартынов, Е. З. Зверовщиков, В. З. Зверовщиков, А. Е. Зверовщиков, М. Д. Афонин, Ю. В. Денисов, Ф. Г. Багринцев (СССР) ; опубл. 15.01.92, Бюл. № 2.
2. А. с. № 1627382 (СССР) М. кл. В24В 31/104. Способ обработки деталей и устройство для его осуществления / А. Н. Мартынов, В. З. Зверовщиков, А. Е. Зверовщиков, А. Т. Манько ; опубл. 15.02.91, Б. И. № 6.
3. **Зверовщиков, В. З.** Моделирование взаимодействия полимерных гранул с обрабатываемыми поверхностями деталей при центробежной объемной обработке в контейнерах с планетарным вращением / В. З. Зверовщиков, А. Е. Зверовщиков, Е. В. Зотов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 3 (11). – С. 162–170.
4. **Крагельский, И. В.** Трение и износ / И. В. Крагельский. – М. : Машиностроение, 1968. – 480 с.
5. **Зверовщиков, А. Е.** Многофункциональная центробежно-планетарная обработка / А. Е. Зверовщиков. – М. : Инфра-М, 2013. – 176 с.
6. **Ящерицын, П. И.** Чистовая обработка деталей в машиностроении / П. И. Ящерицын, А. Н. Мартынов. – Минск : Высшейш. шк., 1983. – 191 с.

References

1. Certificate of authorship 1705040 USSR, MKIZ V24V 31/104. The method of centrifugal part processing and the device for its implementation. A. N. Martynov, E. Z. Zverovshchikov, V. Z. Zverovshchikov, A. E. Zverovshchikov, M. D. Afonin, Yu. V. Denisov, F. G. Bagrintsev (USSR); published on 15.01.92, Bul. no. 2.
2. Certificate of authorship № 1627382 (SSSR) M. kl. V24V 31/104. The method of part processing and the device of its implementation. A. N. Martynov, V. Z. Zverovshchikov, A. E. Zverovshchikov, A. T. Man'ko; published on 15.02.91, B. I. no. 6.
3. Zverovshchikov V. Z., Zverovshchikov A. E., Zotov E. V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2009, no. 3 (11), pp. 162–170.

4. Kragel'skiy I. V. *Trenie i iznos* [Friction and wear]. Moscow: Mashinostroenie, 1968, 480 p.
5. Zverovshchikov A. E. *Mnogofunktsional'naya tsentrobezhno-planetarnaya obrabotka* [Multifunctional three-axis centrifugal treatment]. Moscow: Infra-M, 2013, 176 p.
6. Yashcheritsyn P. I., Martynov A. N. *Chistovaya obrabotka detaley v mashinostroyenii* [Smoothing of parts in machine building]. Minsk: Vysheysk. shk., 1983, 191 p.

Артемов Игорь Иосифович

доктор технических наук, профессор,
проректор по научной работе
и инновационной деятельности,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: rektorat@pnzgu.ru

Artemov Igor' Iosifovich

Doctor of engineering sciences, professor,
vice rector for research and innovation,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Зверовщиков Александр Евгеньевич

доктор технических наук, доцент,
кафедра технологии машиностроения,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: azwer@mail.ru

Zverovshchikov Aleksandr Evgen'evich

Doctor of engineering sciences, associate
professor, sub-department of machine
building technology, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Мартынов Александр Николаевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра технологии машиностроения,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: azwer@mail.ru

Martynov Aleksandr Nikolaevich

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of machine building
technology, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 621.924.93

Артемов, И. И.

Формирование качества поверхностных слоев деталей при изменении характеристик рабочих тел для центробежно-планетарной объемной обработки / И. И. Артемов, А. Е. Зверовщиков, А. Н. Мартынов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 4 (28). – С. 199–211.

УДК 681.511.4

О. В. Авдеева, Д. В. Артамонов, А. С. Никиткин, А. Д. Семенов

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ЭКСТРЕМАЛЬНОГО КОМБИНИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ

Аннотация. *Актуальность и цели.* Объектом исследования является процесс электроэрозионного профилирования алмазных шлифовальных кругов. Объектом исследования является автоматизация управления процессом электроэрозионного профилирования алмазных шлифовальных кругов. Целью работы является повышение производительности и снижение энергопотребления процесса электроэрозионной обработки на основе экстремального комбинированного управления. *Материалы и методы.* В работе использованы методы современной теории автоматического управления и автоматизации технологических процессов, теории вероятностей и математической статистики, компьютерного моделирования. *Результаты.* Синтезированная экстремальная комбинированная система управления процессом электроэрозионного профилирования алмазных шлифовальных кругов позволяет увеличивать производительность данного процесса и снижает его энергопотребление. *Выводы.* Исследования, проведенные на математических моделях, показали, что применением экстремального комбинированного управления процессом электроэрозионного профилирования позволяет увеличить стабильность процесса на 18 %, точность поддержания экстремума – на 16 %, производительность – на 20 %, а энергопотребление снизить на 10 %.

Ключевые слова: электроэрозионная обработка, экстремальная характеристика, алгоритм поиска экстремума, метод наименьших квадратов.

O. V. Avdeeva, D. V. Artamonov, A. S. Nikitkin, A. D. Semenov

AUTOMATION OF ELECTRIC EROSION MACHINING USING THE METHOD OF EXTREME COMBINED CONTROL

Abstract. *Background.* The object of research is the process of electric erosion forming of diamond abrasive wheels as well as the automation of the said process. The study is aimed at improving the productivity and decreasing the energy consumption of the process of electric erosion machining on the basis of extreme combined control. *Materials and methods.* The authors used the methods of the modern theory of automatic control and automation of technological processes, the probability and mathematical statistics theory, computer modeling. *Results.* A synthesized extreme combined system of control of the electric erosion forming of diamond abrasive wheels allows increasing of the said process productivity and decreasing its energy consumption. *Conclusions.* The research, conducted on mathematical models, showed that the application of the extreme combined control of electric erosion forming enables increasing the stability of the process by 18 %, extremum maintenance accuracy – by 16 %, productivity – by 20 %, and decreasing energy consumption by 10 %.

Key words: electric erosion processing, extreme response, extremum-seeking algorithm, least squares method.

Введение

Электроэрозионная обработка широко применяется для изменения размеров металлических изделий сложной конфигурации из твердых сплавов, а также для профилирования алмазных шлифовальных кругов. Основные недостатки электроэрозионной обработки – невысокая производительность и высокое энергопотребление. Использование экстремального регулирования при электроэрозионной обработке позволяет в значительной степени устранить эти недостатки.

Широкое применение экстремального регулирования сдерживается тем, что процесс электроэрозионной обработки носит стохастический характер, особенно это относится к процессу профилирования алмазных кругов. Сложный микрорельеф обрабатываемой поверхности, наличие токонепроводящих включений, нежелательность графитизации алмазных зерен под действием электрического тока, высокая точность профилирования предъявляют повышенные требования к системе управления процессом электроэрозионной обработки.

Следовательно, управлять данным процессом традиционными методами поиска экстремума затруднительно, поэтому требуется разработка помехозащищенных и высокоточных алгоритмов экстремального регулирования. Особый интерес представляет использование комбинированного экстремального управления, при котором использование внутренней обратной связи позволяет не только повысить точность и быстродействие системы, но и существенно уменьшить уровень действующих на систему возмущений, парирруя их в контуре обратной связи.

1. Постановка задачи

Для повышения производительности, стабильности и снижение энергопотребления процесса электроэрозионной обработки предлагается использовать экстремальное комбинированное управление.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи [1]:

- 1) создание математической модели процесса профилирования алмазных шлифовальных кругов, позволяющих эффективно выбрать управляющие воздействия;
- 2) применение алгоритма поиска экстремума статической характеристики инерционного объекта, позволяющего повысить точность поддержания рабочей точки в области экстремума;
- 3) синтез и анализ структуры системы экстремального комбинированного управления процессом электроэрозионной обработки, обеспечивающей повышение стабильности, производительности и снижение энергопотребления рассматриваемого технологического процесса.

На рис. 1 представлена организационная структура автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) электроэрозионного профилирования, где приняты следующие обозначения: APC – advanced process control (усовершенствованное управление); SCADA – supervisory control and data acquisition (диспетчерское управление и сбор данных); z – межэлектродный зазор; I – ток, выделяемый в межэлектродном зазоре;

U – напряжение, выделяемое в межэлектродном зазоре; ω_1 – скорость вращения электрода инструмента; φ – угол поворота алмазного круга; x – линейное перемещение алмазного круга; Q – производительность (съем материала); E – энергопотребление; $p_{БР}$ – стабильность процесса.

Данная структура определяет постановку решаемых задач.

Анализ методов управления технологическим процессом электроэрозионного профилирования позволил установить, что основной причиной, снижающей производительность, стабильность и повышающей энергопотребление данного процесса, является невысокое значение мощности, выделяющейся в межэлектродном зазоре. Установлено, что основное влияние на мощность в межэлектродном зазоре оказывают как электрические, так и электро-механические параметры, которые, в свою очередь, напрямую зависят от управляющих параметров процесса электроэрозионного профилирования. Определяющим фактором, влияющим на технологические показатели, является оптимальное поддержание межэлектродного зазора и амплитуды напряжения генератора импульсов.

Разработку алгоритмов предлагается осуществлять с использованием традиционных систем защиты и базового управления, дополняя их APC – управлением с использованием методов поиска экстремума (максимума) управляемого параметра (мощности в межэлектродном зазоре), интегрируя их в SCADA-систему.

2. Моделирование процесса профилирования

Организационная структура АСУ ТП электроэрозионного профилирования позволяет декомпозировать обобщенную модель этого процесса на три части: модель поверхности алмазного круга, электро-механические модели приводов, электрическую модель межэлектродного зазора.

Для построения топологической модели использовались режущие профили рабочей поверхности алмазного круга. Было проведено ее сканирование профилографом-профилометром «Сейтроник».

Далее было проведено выделение регулярной составляющей методом сингулярного разложения (SVD-разложения), а выделение случайной составляющей – методом формирующего фильтра.

Первые четыре собственных вектора разложения представлены на рис. 2, здесь же показана аппроксимация векторов разложения гармоническими составляющими.

Модель случайной составляющей представлена моделью стационарного и эргодического случайного процесса, полученного методом формирующего фильтра. На рис. 3,*а* показан фрагмент смоделированной поверхности алмазного круга, на рис. 3,*б* – фрагмент профиля этой поверхности, непосредственно взаимодействующего с профилем электрода-инструмента. В результате моделирования и экспериментальных исследований были получены профили поверхности круга различной зернистости, непосредственно влияющие на значение межэлектродного зазора в процессе электроэрозионной обработки.

Гипотеза о нормальном законе распределения профиля поверхности по критерию Колмогорова – Смирнова подтвердилась. Аналогичные выводы получены и для профиля электрода.

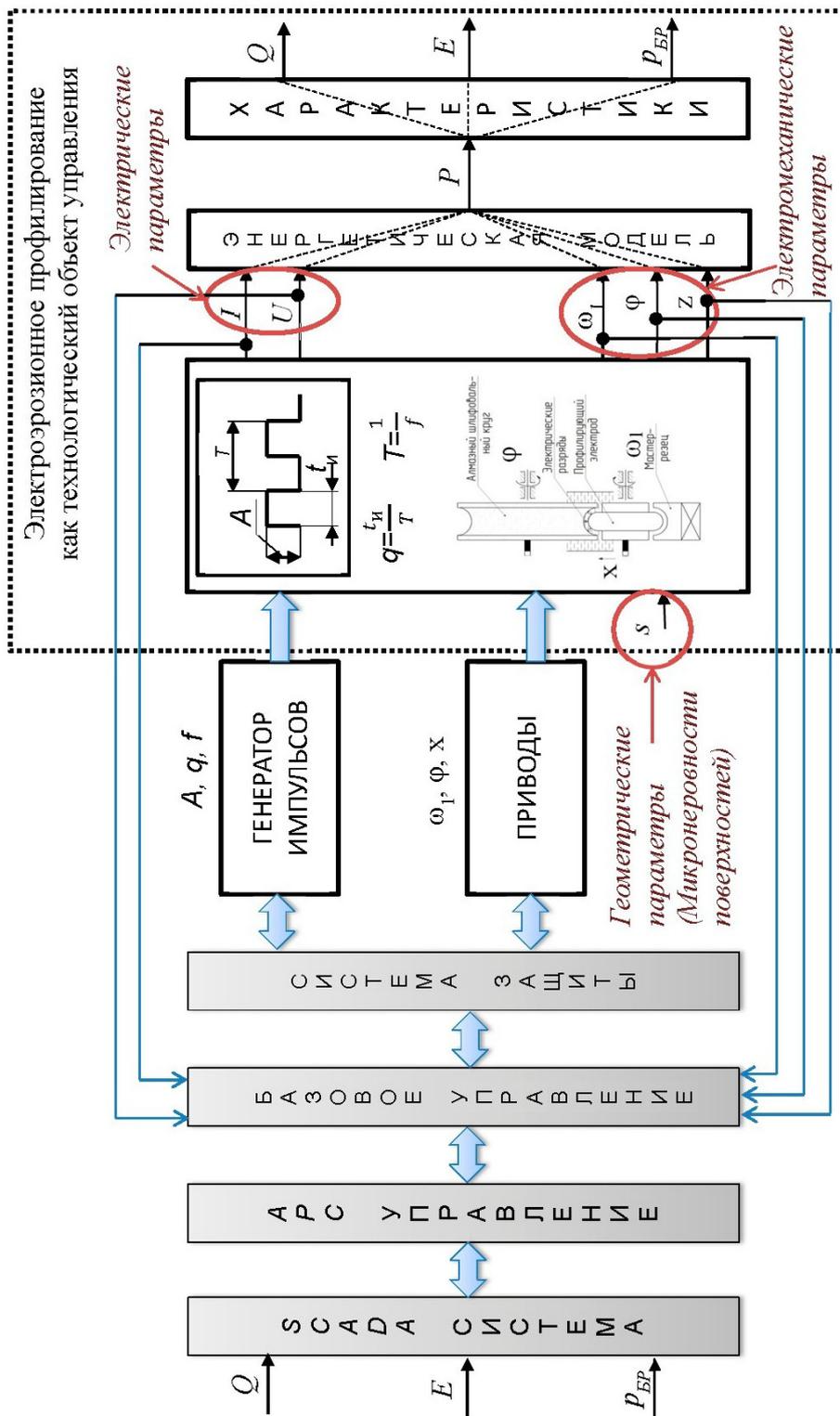


Рис. 1. Организационная структура АСУ ТП электроэрозионного профилирования алмазных шлифовальных кругов

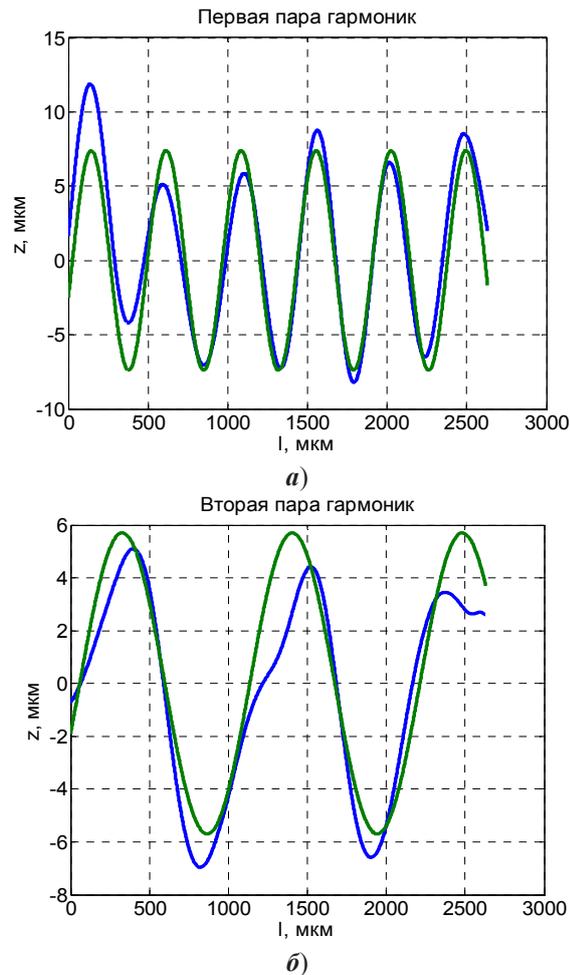


Рис. 2. Гармонические составляющие при сингулярном разложении профиллограммы режущего профиля алмазных шлифовальных кругов

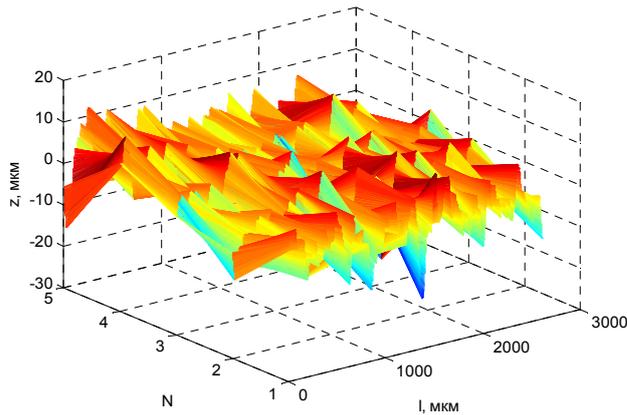
Разработаны модели электропривода вертикальной подачи профилирующего электрода на основе обобщенной теории электрических машин. Механическая часть привода представлена двухмассовой упруго-диссипативной моделью. В результате анализа модели установлено, что время разгона электропривода вертикальной подачи электрода составило 0,01 с, а позиционирование привода вертикальной подачи электрода на 425 мкм – 0,11 с.

Параметры электрической схемы замещения межэлектродного зазора определялись, исходя из осциллограмм токов и напряжений, экспериментально снятых при разных значениях межэлектродного зазора с последующей их обработкой с помощью пакета System Identification Tool, входящего в Matlab. В результате этого получены параметры Т-образной схемы замещения, учитывающей полное выходное сопротивление генератора рабочих импульсов и межэлектродного зазора (рис. 4).

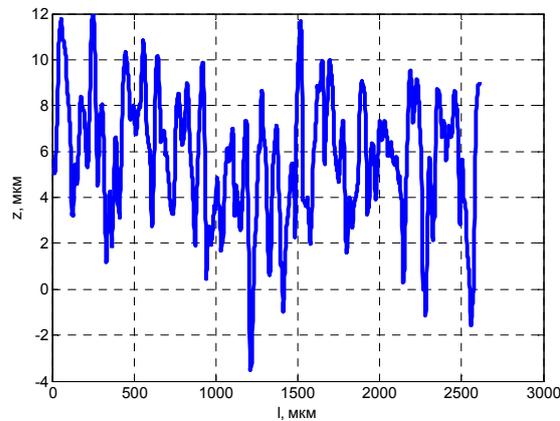
Система дифференциальных уравнений переходных процессов, протекающих в Т-образной схеме замещения, имеет следующий вид:

$$\begin{cases} L_1 \frac{dI_1}{dt} + R_1 I_1 + U_c = U, \\ L_2 \frac{dI_2}{dt} + R_2(z) I_2 = U_c, \\ C \frac{dU_c}{dt} = I_1 - I_2, \end{cases} \quad (1)$$

где L_1, R_1, I_1, U – электрические параметры генератора рабочих импульсов;
 $L_2, R_2(z), I_2, U_c, C$ – электрические параметры межэлектродного зазора.



а)



б)

Рис. 3. Фрагмент модели поверхностей алмазного круга (а)
и фрагмент профиля модели алмазного круга (б)

В результате исследований выявлена нелинейная зависимость активной составляющей полного сопротивления межэлектродного зазора $R_2(z)$, которые представлены в виде

$$R_2(z) = \frac{az}{b-z}, \quad (2)$$

где a , b – коэффициенты, зависящие от электрических параметров схемы замещения межэлектродного зазора; z – значение межэлектродного зазора.

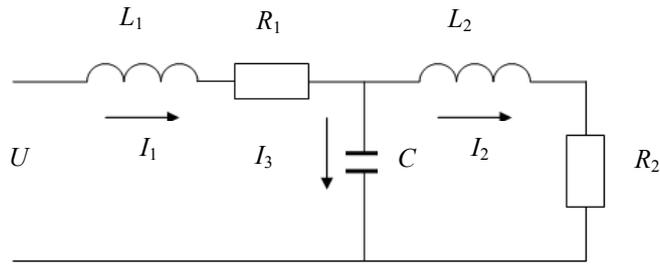


Рис. 4. Схема замещения межэлектродного зазора

Структурная схема динамической модели процесса электроэрозионного профилирования (*Simulink*-модель) представлена на рис. 5.

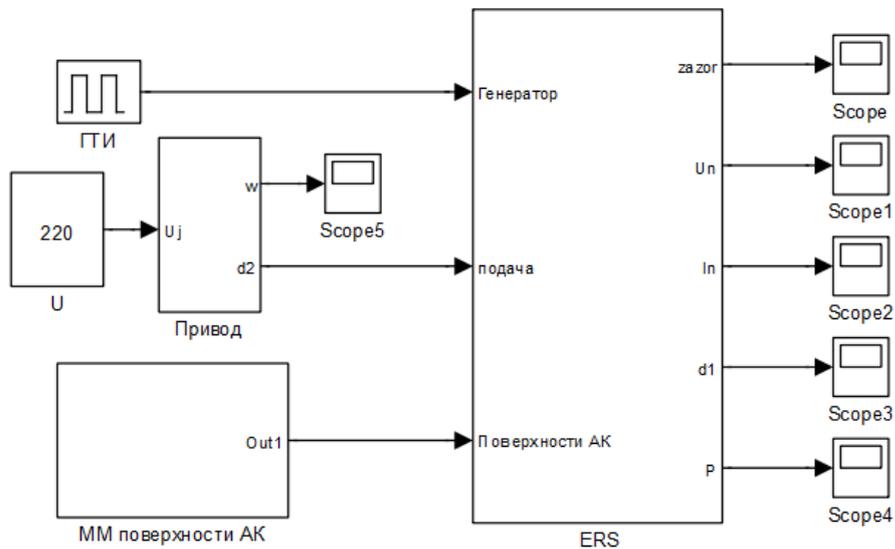


Рис. 5. Структурная схема динамической *Simulink*-модели процесса электроэрозионного профилирования

Результаты моделирования представлены на рис. 6, где $z_{пр}$ – предельное значение межэлектродного зазора, при котором еще возникает электрический разряд; $U_{хх}$ – напряжение холостого хода; $I_{кз}$ – ток короткого замыкания. Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что *Simulink*-модель адекватно отражает реальные электродинамические процессы, происходящие при электроэрозионном профилировании алмазных шлифовальных кругов.

Исследования, проведенные на разработанной модели, позволили установить:

– увеличение шероховатости алмазного круга приводит к уменьшению экстремального значения мощности, не изменяя положение экстремума, равного половине предельного зазора, при котором еще возникают разряды (рис. 7,а);

– несогласованность внутреннего активного сопротивления генератора технологических импульсов и активного сопротивления зазора приводит к снижению мощности, выделяемой в зазоре, и снижению экстремума без изменения его величины (рис. 7,б).

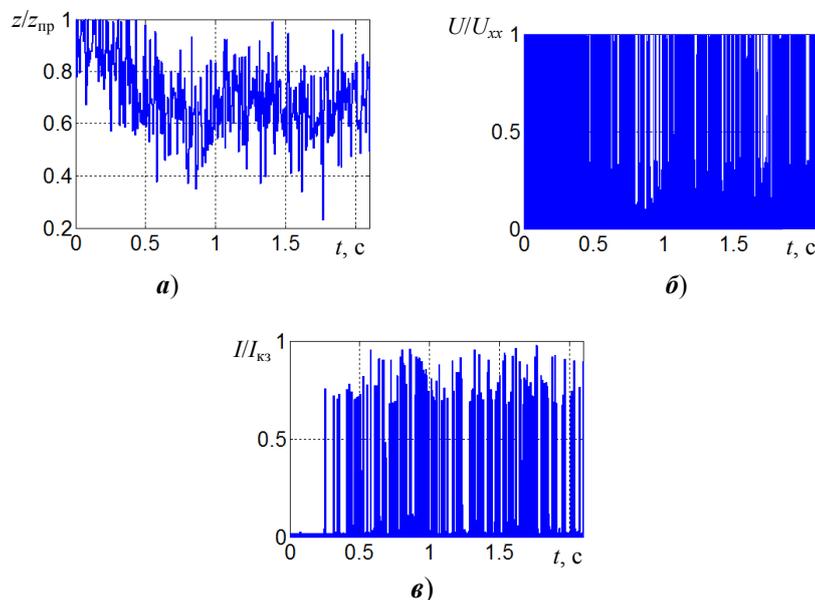


Рис. 6. Осциллограммы переменных динамической модели процесса электроэрозионного профилирования алмазных шлифовальных кругов: межэлектродный зазор (а), напряжение (б) и ток (в), выделяемые в межэлектродном зазоре

Следовательно, для отдачи максимальной мощности в зазор необходимо таким образом выбирать амплитуду разрядных импульсов, чтобы межэлектродный зазор был равен половине его предельного значения (рис. 7,в).

Для совмещения экстремумов необходимо увеличивать амплитуду импульсов напряжения генератора рабочих импульсов. Для исследования экстремальной системы управления процессом электроэрозионной обработки разработанная динамическая модель была аппроксимирована редуцированной инерционной моделью с экстремальной характеристикой.

С наибольшей точностью данную модель можно представить моделью типа Гаммерштейна, которая используется при разработке алгоритма поиска экстремума для достижения максимального значения средней мощности, обеспечивающего повышение производительности, стабильности и снижение энергопотребления.

3. Применение методов экстремального комбинированного управления

С целью повышения производительности процесса электроэрозионной обработки предлагается использовать экстремальный регулятор мощности.

В результате исследований было установлено, что традиционные методы экстремального регулирования в рассматриваемом случае не эффективны, так как процесс электроэрозионной обработки происходит в условиях силь-

ных помех, что приводит к «рысканию» экстремальной системы вплоть до потери устойчивости.

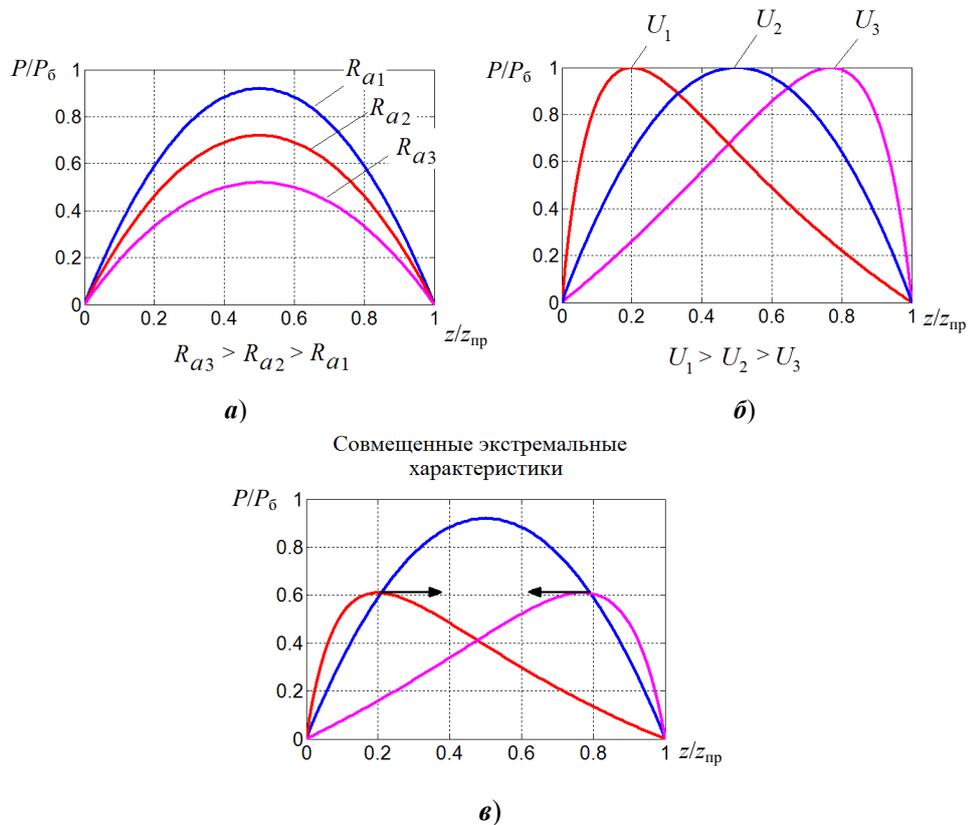


Рис. 7. Смещение экстремальной статической характеристики: характеристика при различных шероховатостях Ra кругов (а); характеристика при различных значениях амплитуды напряжений генератора рабочих импульсов U (б); совмещенная кривая (в)

Для обеспечения устойчивости системы предлагается использовать рекуррентный алгоритм метода наименьших квадратов, с помощью которого вычисляется коэффициент передачи экстремального объекта по изменению его входной и выходной величин с последующим поиском нулевого значения этого коэффициента [2]. Алгоритм экстремального регулирования состоит из следующих этапов:

- 1) считывание входного и выходного сигналов с экстремального объекта;
- 2) вычисление коэффициентов АРСС-модели по рекуррентному методу наименьших квадратов;
- 3) вычисление коэффициента передачи объекта;
- 4) поиск управляющего воздействия, обеспечивающего нулевое значение коэффициента передачи с использованием прямых методов поиска нуля функций.

В результате моделирования работы алгоритма установлено, что он обеспечивает сходящиеся значения оценки коэффициента передачи, устойчи-

во удерживая объект в окрестности точки экстремума даже при наличии сильных возмущений. Относительная погрешность в определении коэффициента передачи объекта не превышает 5 %, отклонение системы от точки экстремума – не более 24 % при отношении сигнал/шум, близком к единице. Время поиска экстремума соизмеримо со временем переходного процесса объекта регулирования.

При анализе работы экстремальной системы регулирования мощности установлено, что максимум мощности в межэлектродном зазоре (МЭЗ) будет выделяться в случае, когда активное сопротивление зазора равно внутреннему активному сопротивлению генератора технологических импульсов. Для этого дополнительно введен внутренний контур по активному сопротивлению межэлектродного зазора R_2 . Внешний экстремальный контур регулирования обеспечивает поддержание оптимального режима профилирования в случае неустойчивости внутреннего сопротивления генератора.

Структурная схема системы показана на рис. 8. Она включает в себя экстремальный регулятор (ЭР), передаточные функции привода подачи $W_{\text{ПР}}$ и его регулятора $W_{\text{рег}}$, а также объект управления, состоящий из нелинейных звеньев: $F_{R_2}(z)$ – статическая характеристика, учитывающая формирование сопротивления в МЭЗ от его значения, $F_P(R_2)$ – статическая характеристика, учитывающая формирование средней мощности от величины сопротивления МЭЗ, W_P – передаточная функция, описывающая динамику процесса преобразования средней мощности, выделяемой в МЭЗ от величины его сопротивления.

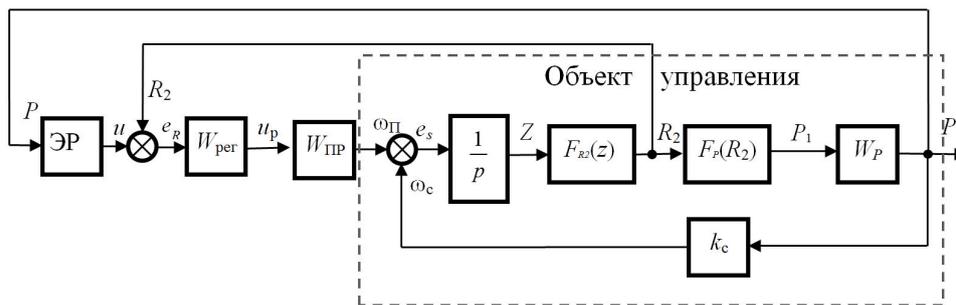


Рис. 8. Структурная схема экстремальной стабилизирующей системы с внутренней обратной связью по съему материала

На рис. 9 приведены сравнительные характеристики экстремальной и экстремальной комбинированной системы управления.

Исследования, проведенные на моделях, показали, что стабильность системы с местной обратной связью по сопротивлению возросла на 18 %, точность поддержания экстремума – на 16 %, производительность возросла на 20 %, энергопотребление снизилось на 10 %.

Заключение

Разработана модель поверхности алмазного круга с использованием сингулярного разложения и метода формирующего фильтра. Доказано, что профиль этой поверхности имеет нормальный закон распределения и оказывает основное влияние на процессы профилирования.

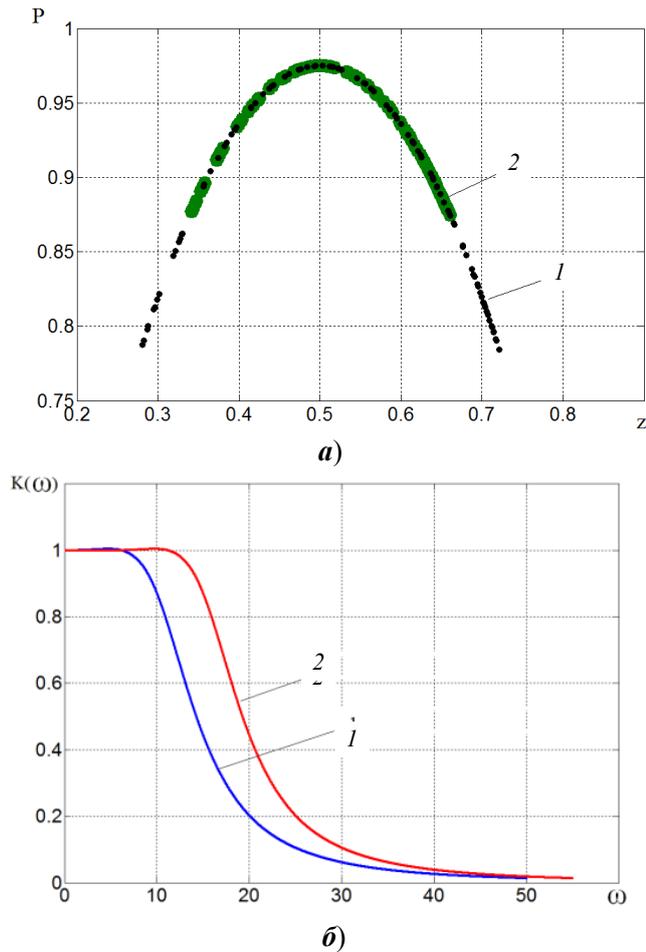


Рис. 9. Фазовые траектории в установившемся состоянии (а) и амплитудо-частотные характеристики (б) экстремальной (1) и экстремальной комбинированной (2) системы

В результате анализа экспериментальных осциллограмм токов и напряжений, возникающих в межэлектродном зазоре, была проведена параметрическая идентификация и предложено остановиться на Т-образной схеме замещения межэлектродного зазора.

На основе обобщенной теории электрических машин получена модель электропривода вращения профилирующего электрода, который позволяет определить его статические и динамические характеристики. В результате анализа модели установлено, что время разгона электропривода вертикальной подачи электрода составило 0,01 с.

Разработана динамическая модель процесса электроэрозионного профилирования алмазных шлифовальных кругов. В результате моделирования установлено смещение экстремума мощности, обусловленное возникновением нежелательных режимов холостого хода и короткого замыкания. Для отдачи максимальной мощности в зазор необходимо таким образом выбирать амплитуду разрядных импульсов, чтобы межэлектродный зазор был равен половине его предельного значения.

Проведена аппроксимация динамической модели процесса электроэрозионной обработки моделью типа Гаммерштейна. Полученная редуцированная модель используется при разработке алгоритма экстремального регулирования с целью повышения производительности данного процесса.

Для повышения быстродействия и помехоустойчивости экстремальной системы управления процессом электроэрозионной обработки предложено использовать экстремальную комбинированную систему с местной обратной связью по активному сопротивлению межэлектродного зазора. Исследования, проведенные на моделях, показали, что стабильность системы с местной обратной связью по сопротивлению возросла на 18 %, точность поддержания экстремума – на 16 %, производительность возросла на 20 %, энергопотребление снизилось на 10 %.

Список литературы

1. **Елисеев, Ю. С.** Электроэрозионная обработка изделий авиационно-космической техники / Ю. С. Елисеев, Б. П. Саушкин ; под ред. Б. П. Саушкина. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. – 437 с.
2. **Семенов, А. Д.** Алгоритм экстремального регулирования на основе рекуррентной процедуры метода наименьших квадратов / А. Д. Семенов, О. В. Авдеева, А. С. Никиткин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 1 (21). – С. 3–11.
3. **Егупов, Н. Д.** Методы робастного, нейронечеткого и адаптивного управления / Н. Д. Егупов. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 744 с.

References

1. Eliseev Yu. S., Saushkin B. P. *Elektroerozionnaya obrabotka izdeliy aviatsionno-kosmicheskoy tekhniki* [Electric erosion machining of aerospace equipment articles]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N. E. Bauman, 2010, 437 p.
2. Semenov A. D., Avdeeva O. V., Nikitkin A. S. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2012, no. 1 (21), pp. 3–11.
3. Egupov N. D. *Metody robastnogo, neyronechetkogo i adaptivnogo upravleniya* [Methods of robust, neurofuzzy and adaptive control]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N. E. Bauman, 2001, 744 p.

Авдеева Ольга Викторовна

старший преподаватель, кафедра автоматизации и телемеханики, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: rasuma@mail.ru

Avdeeva Ol'ga Viktorovna

Senior lecturer, sub-department of automation and remote control, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Артамонов Дмитрий Владимирович

доктор технических наук, профессор, кафедра автономных информационных и управляющих систем, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: aius@pnzgu.ru

Artamonov Dmitriy Vladimirovich

Doctor of engineering sciences, professor, sub-department of autonomous information and control systems, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Никитин Александр Сергеевич

кандидат технических наук, заместитель
начальника управления перспективных
технологий приборостроения,
Производственное объединение «Старт»
им. М. В. Проценко (Россия, Пензенская
область, г. Заречный, пр. Мира, 1)

E-mail: sashanikitkin@rambler.ru

Nikitin Aleksandr Sergeevich

Candidate of engineering sciences, deputy
head of the department of perspective
technologies of instrument engineering,
Production association "Start" named
after M.V. Protsenko (1 Mira avenue,
Zarechny, Penza region, Russia)

Семенов Анатолий Дмитриевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра автоматики и телемеханики,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: sad-50@mail.ru

Semenov Anatoliy Dmitrievich

Doctor of engineering sciences, professor,
sub-department of automation and remote
control, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 681.511.4

Авдеева, О. В.

Автоматизация процесса электроэрозионной обработки с использованием метода экстремального комбинированного управления / О. В. Авдеева, Д. В. Артамонов, А. С. Никиткин, А. Д. Семенов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 4 (28). – С. 212–224.

УДК 544.654.2

С. Ю. Киреев, Ю. П. Перелыгин, С. Н. Киреева, Д. Ю. Власов

**ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ ЦИНКА
В ПОТЕНЦИОСТАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ
ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОЛИЗА
ИЗ МАЛОТОКСИЧНОГО ЛАКТАТНОГО ЭЛЕКТРОЛИТА**

Аннотация. *Актуальность и цели.* С целью интенсификации и уменьшения экологической опасности исследован процесс электроосаждения цинковых покрытий в потенциостатическом режиме импульсного электролиза из малотоксичного лактатного электролита. *Материалы и методы.* Поляризацию электрода осуществляли с помощью потенциостата IPC-Pro. Использовали гальваностатический и потенциостатический режимы импульсного электролиза. Предложена методика определения количества электричества, прошедшего через электрохимическую систему при использовании импульсного тока. *Результаты.* На основании анализа экспериментальных данных выявлены зависимости катодного выхода по току цинка и скорости осаждения от значений потенциалов импульсов тока, частоты, скважности, а также концентрации ионов цинка, молочной кислоты и ионов водорода (pH) в растворе. *Выводы.* Показаны преимущества выбранного режима по сравнению с гальваностатическим режимом импульсного электролиза и стационарным электролизом. На основании проведенных исследований рекомендованы состав электролита и режимы формирования качественных гальванических покрытий цинком со скоростью процесса – 17–78,5 мкм/ч.

Ключевые слова: цинковые покрытия, потенциостатический импульсный электролиз, молочная кислота.

S. Yu. Kireev, Yu. P. Perelygin, S. N. Kireeva, D. Yu. Vlasov

**ELECTRODEPOSITION OF ZINC COATINGS
IN THE CONTROLLED POTENTIAL MODE
OF IMPULSE ELECTROLYSIS FROM LOW-TOXIC
LACTIC ELECTROLYTE**

Abstract. *Background.* In order to intensify and decrease ecological hazard the authors examined the process of electrodeposition of zinc coatings in the controlled potential impulse electrolysis from low-toxic lactic electrolyte. *Materials and methods.* Electrode polarization was realized with the help of the IPC-Pro potentiostat. The researchers used galvanostatic and potentiostatic regimes of impulsing electrolysis. The authors suggest a technique of defining the electric charge that passed through an electrochemical system in the process of using impulse current. *Results.* On the basis of the analysis of experimental data the researchers revealed the dependences of cathodic current efficiency of zinc and the deposition rate on the values of potentials of current impulses, frequency, porosity, and ion density of zinc, lactic acid and hydriions (pH) in the solution. *Conclusions.* The article shows the advantages of the chosen regime in comparison with galvanostatic impulse electrolysis and a stationary electrolysis. On the basis of the researches the authors suggest a composition of electrolyte and regimes of formation of qualitative galvanizations by zinc at the rate of 17–78.5 microns/hour.

Key words: zinc coatings, potentiostatic pulse electrolysis, lactic acid.

Введение

Современная машино- и приборостроительная промышленность располагает достаточно большим выбором электролитов цинкования (цианидные, цинкаты, кислые, слабокислые, аммиакатные, пирофосфатные и др.) [1, 2]. Каждый из них обладает рядом достоинств и недостатков [3, 4].

Ранее [5] показана возможность электроосаждения цинковых покрытий из разбавленного по ионам металла раствора, содержащего молочную кислоту. С целью повышения скорости осаждения было исследовано электроосаждение цинка с использованием импульсного тока прямоугольной формы [6].

Использование гальваностатического режима импульсного электролиза (рис. 1,*а*) имеет ряд недостатков, а именно:

– процессы на поверхности электрода протекают при изменяющемся во времени потенциале, причем значение потенциала меняется не только во время импульса (рис. 1,*б*), но и в течение всего процесса (рис. 1,*в*), особенно в начальный момент после включения тока. Это приводит к неоднородности покрытия, а в случае электроосаждения сплава – к осаждению слоев различного состава [7];

– задавая амплитудное значение силы тока в импульсе, исследователь заведомо ограничивает скорость процесса. Причем при больших значениях силы тока в импульсе потенциал электрода изменяется значительно, что приводит к снижению выхода по току (ВТ).

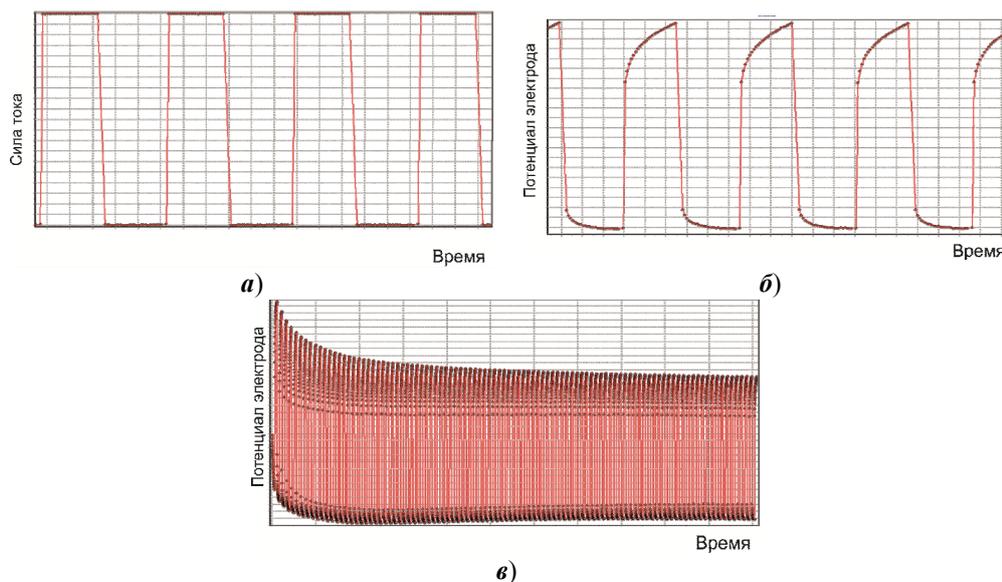


Рис. 1. Зависимости силы тока (I) и потенциала электрода (E) от времени (τ):
 $I = f(\tau)$ (*а*) и $E = f(\tau)$ (*б*, *в*) при гальваностатическом режиме импульсного электролиза

Применение потенциостатического импульсного электролиза (рис. 2,*а*) позволяет, по нашему мнению, устранить отмеченные выше недостатки и вести процесс с максимальной скоростью осаждения (рис. 2,*б*,*в*).

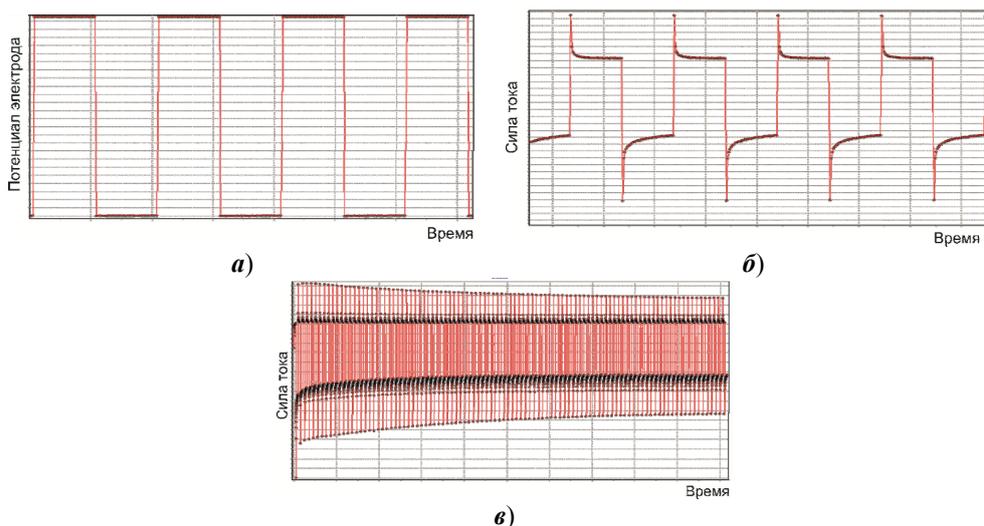


Рис. 2. Зависимости $E = f(\tau)$ (а) и $I = f(\tau)$ (б, в) при потенциостатическом режиме импульсного электролиза

Таким образом, можно предположить, что использование данного режима импульсного электролиза позволит:

- увеличить скорость осаждения покрытий, так как плотность тока процесса осаждения максимальна в любой момент времени и определяется скоростью диффузии электроактивных частиц;
- формировать металлами и сплавами гальванические покрытия однородные по толщине и имеющие строго определенные морфологические особенности.

Методика эксперимента

Определение оптимального режима электролиза проводили в прямоугольной ячейке емкостью 0,2 л с применением в качестве катода медных пластин площадью $4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ и графитовых анодов. Подготовка катода проводилась в соответствии с требованиями [2].

Для приготовления растворов использовали реактивы марки «ч.» или «х.ч.» и дистиллированную воду. Выработка электролита по ионам металла не превышала 5 %.

В качестве источника тока, регистратора зависимости потенциала и силы тока во времени использовали потенциостат ИРС-ProMF, подключенный к персональному компьютеру.

Потенциалы измерены относительно хлоридсеребряного электрода (ЭВЛ-1М) и пересчитаны относительно стандартного водородного электрода; pH электролита определяли pH-метром-иономером И-160.

При работе в потенциостатическом режиме необходимо задавать и поддерживать постоянной величину потенциала рабочего электрода. При этом необходимо учитывать омическое падение напряжения в электролите, которое зависит прежде всего от электропроводности раствора, состояния поверхности электрода и аппаратного оформления процесса, в частности, от расстояния от капилляра Луггина – Габера до поверхности электрода.

Для плоского электрода сопротивление электролита прямо пропорционально зависит от расстояния между капилляром Луггина – Габера и поверхностью электрода и обратно пропорционально – от удельной электропроводности раствора электролита [8]. Таким образом, чем ближе капилляр будет подведен к поверхности электрода, тем меньше омические потери потенциала, однако при слишком близком расположении капилляра возникает экранирование поверхности электрода, а также разрыв цепи пузырьками выделяющегося газа. Для устранения данных проблем и в соответствии с рекомендациями, приведенными в [8], конец капилляра жестко закреплен на расстоянии 2–3 мм от поверхности электрода, и это взаимное положение электродов не менялось в ходе всех нижеописанных экспериментов. Потенциалы приведены относительно стандартного водородного электрода.

Выход по току при осаждении металлов с использованием импульсного тока может определяться несколькими способами, в которых учитывается весь ток, протекающий через электрод или только его часть, идущая на фарадеевские процессы [6, с. 16]. В данной работе катодный выход по току цинка определяли гравиметрическим способом, причем количество электричества, пропущенного через электролит вычисляли интегрированием зависимостей силы тока (I) от времени электролиза (τ) [9]:

$$Q = \int_{\tau_1}^{\tau_2} Id\tau .$$

Следует отметить, что при проведении процесса в потенциостатическом режиме импульсного электролиза часть тока идет на перезарядку двойного электрического слоя, а также может наблюдаться изменение направления протекания тока через электрохимическую систему, если потенциал в импульсе положительнее (менее отрицателен) стационарного значения (рис. 3,а).

В подобных случаях использование газового или медного кулонометров мало оправдано. Решение данной проблемы может быть найдено с помощью специальных электронных интеграторов тока, которые представляют собой приборы, регистрирующие зависимость тока во времени с целью последующего расчета количества электричества.

Для расчета катодного выхода по току металла необходимо использовать общее количество электричества [8], прошедшее через систему вне зависимости от направления. Поэтому при нахождении общего количества электричества необходимо использовать не алгебраическую сумму количества электричества, пропущенного через ячейку (рис. 3,а), а сумму значений за катодный и анодный полупериоды, взятых по модулю (рис. 3,б).

Так, расчет количества электричества, пропущенного через систему в одном из экспериментов по электрохимическому осаждению цинкового покрытия, в котором наблюдается изменение направления протекания тока, (импульс прямой и обратный) (рис. 3,а) дает значение 59,85 Кл, а если взять значения силы тока по модулю (рис. 3,б), то значение количества электричества получается 68,63 Кл. Данная методика позволяет полностью учесть все количество электричества, прошедшее через электрохимическую систему, включая ток, пошедший на нефарадеевские процессы (например, перезарядка

двойного электрического слоя) и исключает возможность получения значительного катодного выхода по току металла более 100 %, как это отмечалось некоторыми авторами при использовании других методик.

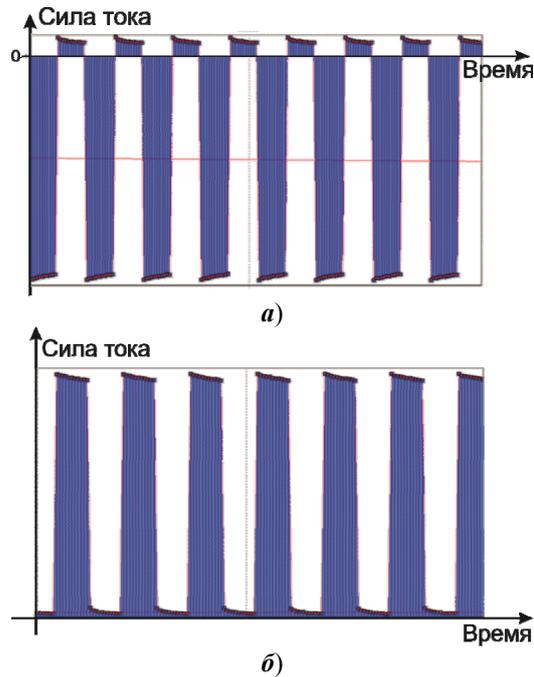


Рис. 3. Демонстрация нахождения общего количества электричества, прошедшего через электрохимическую систему при потенциостатическом режиме импульсного электролиза: *a* – алгебраическая сумма значений, *b* – значения силы тока, взятые по модулю

В ходе данной работы было исследовано влияние основных режимов импульсного электролиза (амплитудных значений потенциалов первого (E_1) и второго (E_2) импульсов, следующих друг за другом), а также их длительностей (τ_1 и τ_2) (рис. 4) и состава электролита на катодный выход по току цинка и качество осаждаемых покрытий.

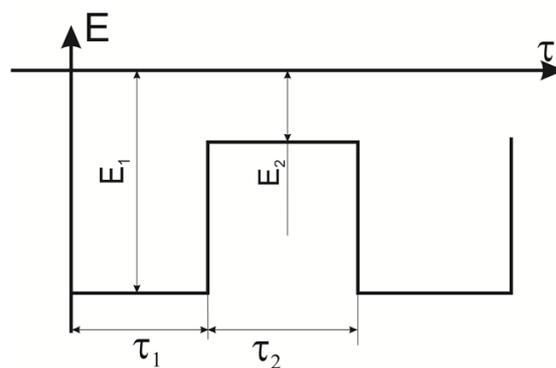


Рис. 4. Параметры потенциостатического режима импульсного электролиза, задаваемые в данном исследовании.

Результаты и их обсуждение

Исследование зависимости катодного выхода по току (ВТ) цинка от технологических параметров процесса проводили в электролите следующего состава: ZnO (на металл) – 0,15 моль/л, молочная кислота – 0,15 моль/л, HCl ($\rho = 1,19$ г/мл) – 0,3 моль/л, при pH равном 3 и температуре 20 °C [5].

Влияние E_1 на катодный выход по току и качество цинкового покрытия исследовали при $E_2 = -800$ мВ, $\tau_1 = \tau_2 = 0,25$ с. Зависимость катодного выхода по току от значения потенциала импульса E_1 (рис. 5, кривая 1) проходит через максимум, соответствующий значениям $-1600 \dots -1800$ мВ. Смещение потенциала электрода в область более отрицательных значений нецелесообразно, так как это приводит к снижению катодного выхода по току и ухудшению качества покрытия (появление дендритов и подгара в углах пластинки).

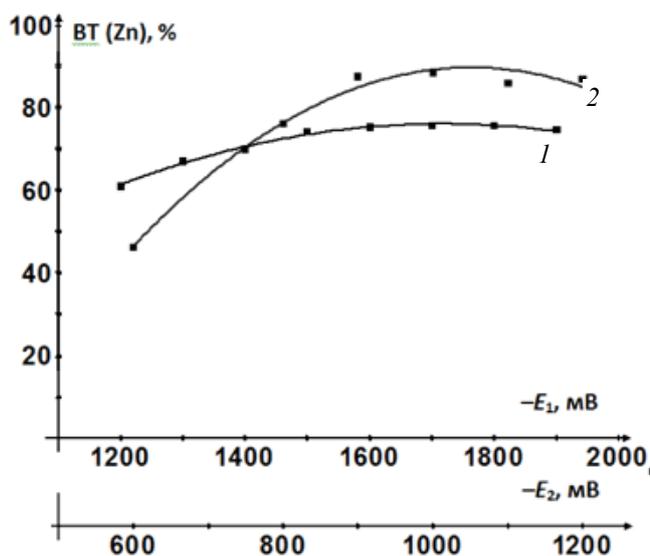


Рис. 5. Зависимость катодного ВТ цинка от значения потенциала первого импульса (E_1) при постоянном $E_2 = -800$ мВ и $\tau_1 = \tau_2 = 0,25$ с (кривая 1) и от значения потенциала второго импульса (E_2) при постоянном $E_1 = -1700$ мВ и $\tau_1 = \tau_2 = 0,25$ с (кривая 2)

Влияние изменения E_2 на ВТ и качество цинкового покрытия было исследовано при $E_1 = -1700$ мВ и $\tau_1 = \tau_2 = 0,25$ с. Зависимость $ВТ(Zn) = f(E_2)$ (рис. 5, кривая 2) проходит через максимум и при значении -1000 мВ осаждаются мелкокристаллические полублестящие равномерные покрытия цинком с максимальным выходом металла по току.

С увеличением частоты следования импульсов от 1 до 2 Гц (при $\tau_1 = \tau_2$) наблюдается рост ВТ цинка до 88 % (рис. 6). Дальнейшее увеличение частоты до 20 Гц приводит к незначительному снижению ВТ цинка. Увеличение частоты импульсного тока в потенциостатическом режиме выше 20 Гц нецелесообразно, так как использование хлорсеребряного электрода сравнения при больших частотах приводит к появлению «шума» на зависимостях ток-время и, следовательно, к потере контроля над процессом.

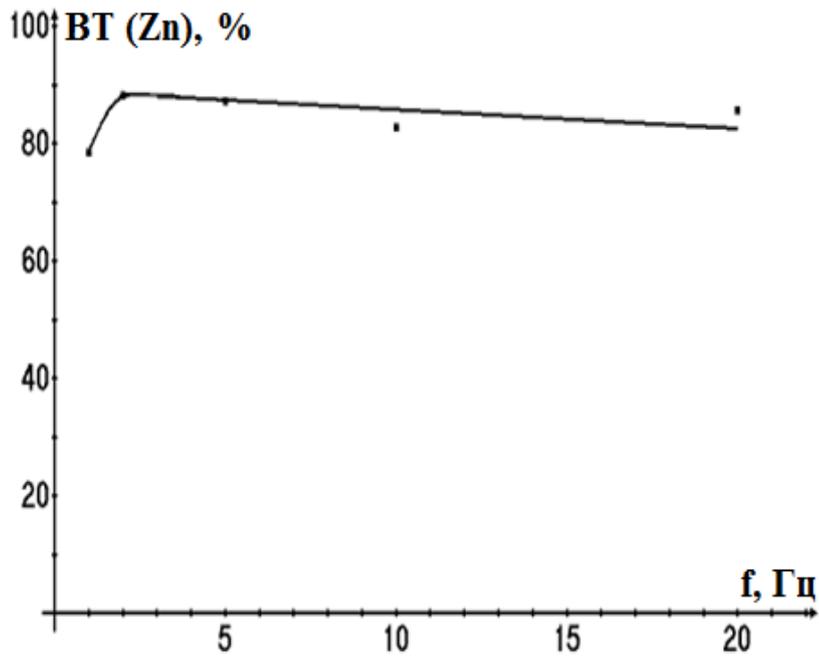


Рис. 6. Зависимость катодного ВТ цинка от частоты импульсного тока (f) при потенциостатическом режиме

Исследование зависимости катодного выхода по току цинка от скважности импульсного тока проводили при длительности первого импульса 0,1 и 0,25 с (табл. 1).

Таблица 1

Зависимость катодного выхода по току цинка от скважности

Длительность первого импульса (τ_1), с	Длительность второго импульса (τ_2), с	Период ($\tau_1 + \tau_2$), с	Скважность $\left(Q = \frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_1}\right)$	ВТ (Zn), %
0,25	0,025	0,275	1,1	58,07
0,25	0,05	0,3	1,2	75,08
0,25	0,1	0,35	1,4	75,45
0,25	0,25	0,5	2	88,18
0,25	0,5	0,75	3	84,20
0,25	1	1,25	5	80,30
0,1	0,1	0,2	2	87,27
0,1	0,25	0,35	3,5	89,24
0,1	0,5	0,6	6	93,15
0,1	1	1,1	10,1	73,56

При длительности первого импульса 0,25 с с увеличением скважности от 1,1 до 2 происходит возрастание ВТ цинка от 58 до 88 %, дальнейший рост скважности снижает ВТ цинка. Аналогичная зависимость получена для длительности первого импульса 0,1 с.

Дальнейшие исследования проводились при $E_1 = -1700$ мВ, $E_2 = -1000$ мВ, $\tau_1 = \tau_2 = 0,25$ с.

Увеличение концентрации ионов цинка в растворе от 0,015 до 0,92 моль/л (в пересчете на металл) приводит к увеличению катодного выхода потока цинка (ВТ (Zn)) от 29,8 до 94,5 %, дальнейшее повышение содержания цинка практически не изменяет ВТ (Zn).

Скорость осаждения цинкового покрытия (v_{oc} , мкм/ч) линейно возрастает при увеличении содержания ионов цинка ($C_{(Zn^{2+})}$) в растворе от 0,015 до 0,765 моль/л. Данная зависимость достаточно точно (коэффициент корреляции 0,989) описывается следующим уравнением:

$$v_{oc} = 1,48 + 101,1 \cdot C_{(Zn^{2+})}$$

Дальнейшее увеличение содержания цинка приводит к менее значительному повышению скорости процесса, а также, учитывая экологические аспекты связанные с выносом электролита с деталями, повышение концентрации металла в растворе нецелесообразно.

При содержании ионов цинка в растворе 0,153 моль/л изменение концентрации молочной кислоты от 0,1 до 0,43 моль/л приводит к снижению скорости осаждения цинка от 78,5 до 40 мкм/ч и практически не изменяет катодный выход по току металла (95–93 %). Экспериментально установлено, что покрытия наилучшего качества получаются при эквимолярном соотношении молочной кислоты и ионов цинка в растворе.

Изменение pH электролита от 1,0 до 5,0 незначительно увеличивает выход по току цинка от 87 до 95 %. Дальнейшее повышение pH раствора электролита приводит к выпадению осадка в объеме раствора. Покрытия наилучшего качества осаждаются при pH 3, при этом катодный выход по току цинка составляет 94 %.

На основании приведенных выше результатов исследований для электролитического осаждения светло-серых, равномерных, мелкокристаллических покрытий цинком можно рекомендовать следующий состав электролита и режим электролиза:

Оксид цинка, моль/л	0,015 до 0,92
Молочная кислота, моль/л	эквимолярное ионам цинка
HCl, моль/л	0,3
pH	2,8-3,3
Температура, °C	20–30
E_1^* , мВ	-1700
E_2^* , мВ	-1000
τ_1 , с	0,25
τ_2 , с	0,25

Примечание. * – потенциалы электродов приведены относительно стандартного водородного электрода.

При указанных режимах скорость электроосаждения цинковых покрытий составляет 17–78,5 мкм/ч, что превосходит значения скорости, приведенные в [2, 5] для кислых электролитов с таким же содержанием ионов цинка при стационарном режиме электролиза.

Вопрос о причинах интенсификации процесса осаждения металла, в частности цинка, при импульсном электролизе по сравнению со стационарным электролизом в настоящее время остается дискуссионным.

Скорость электрохимического осаждения металлических покрытий определяется преимущественно допустимой катодной плотностью тока и выходом металла по току. Причем допустимая плотность тока меньше предельной диффузионной плотности тока, так как при больших значениях плотности тока наблюдается ухудшение качества покрытий.

Использование импульсного тока, как известно [6], благоприятно влияет на условия электрокристаллизации, что влечет за собой улучшение морфологии покрытий. Это обстоятельство позволяет проводить процессы при более высоких значениях катодной плотности тока, приближающихся к предельной диффузионной плотности тока.

В зависимости от природы лимитирующей стадии процесса причинами повышения скорости могут быть:

– уменьшение толщины диффузионного слоя [6, 10], что позволяет вести процесс при более высоких значениях катодной плотности тока без диффузионных ограничений;

– изменение кинетических параметров электрохимической реакции (например, увеличение плотности тока обмена и уменьшение эффективной энергии активации) [6, 11].

Таким образом, использование импульсного тока позволяет интенсифицировать процесс электроосаждения по сравнению со стационарным режимом, независимо от природы лимитирующей стадии.

Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. На процесс осаждения цинка из указанного электролита оказывают влияние как состав электролита, так и значения потенциалов первого и второго импульсов, их длительности, а также скважность.

2. Применение потенциостатического режима импульсного электролиза позволяет повысить скорость осаждения цинковых покрытий по сравнению с осаждением на постоянном токе и в гальваностатическом режиме импульсного электролиза, при сохранении их высокого качества.

3. Использование данного режима электролиза в комплексе с применением молочной кислоты позволяет получать равномерные, полублестящие, мелкокристаллические покрытия цинком без дополнительного введения в электролит блескообразующих или выравнивающих добавок, что имеет как экологические, так и экономические преимущества.

Список литературы

1. Кудрявцев, Н. Т. Электролитические покрытия металлами / Н. Т. Кудрявцев. – М. : Химия, 1979. – 352 с.

2. ГОСТ 9.305–84. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Операции технологических процессов получения покрытий. – М. : Госстандарт, 1988. – 183 с.
3. **Лайнер, В. И.** Основы гальваностегии / В. И. Лайнер, Н. Т. Кудрявцев. – М. : Химия, 1936. – 368 с.
4. Гальванические покрытия в машиностроении. Справочник : в 2 т. / под ред. М. А. Шлугера. – М. : Машиностроение, 1985. – Т. 1. – 240 с. ; Т. 2. – 248 с.
5. **Киреев, С. Ю.** Электроосаждение цинка из кислого лактатного электролита / С. Ю. Киреев, Ю. П. Перелыгин, Н. В. Ягниченко // Гальванотехника и обработка поверхности. – 2011. – XIX, № 3. – С. 30–32.
6. **Костин, Н. А.** Импульсный электролиз / Н. А. Костин, В. С. Кублановский, В. А. Заблудовский. – Киев : Наук. думка, 1989. – 168 с.
7. **Феттер, К.** Электрохимическая кинетика / К. Феттер. – М. : Химия, 1967. – 856 с.
8. **Костин, Н. А.** Импульсный электролиз сплавов / Н. А. Костин, В. С. Кублановский. – Киев : Наук. думка, 1996. – 207 с.
9. К методике определения выхода металла по току при импульсном режиме электроосаждения ВИНТИ / Киреев С. Ю., Татаева С. Н., Перелыгин Ю. П. 2001. – 6 с. – Деп. в ВИНТИ от 19.07.2001, № 1710-B2001.
10. **Chandrasekar, M. S.** Malathy / M. S. Chandrasekar // *Electrochimica Acta*. – 2008. – № 53. – P. 3313–3322
11. **Березин, Н. Б.** Химия и компьютерное моделирование / Н. Б. Березин, К. А. Сагдеев, Ж. В. Межевич // Бутлеровские сообщения. – 2004. – Т. 5, № 1. – С. 44–47

References

1. Kudryavtsev N. T. *Elektroliticheskie pokrytiya metallami* [Electrolytic metallization]. Moscow: Khimiya, 1979, 352 p.
2. GOST 9.305–84. *Pokrytiya metallicheskie i nemetallicheskie neorganicheskie. Operatsii tekhnologicheskikh protsessov polucheniya pokrytij* [Metallic and nonmetallic nonorganic coatings. Technological processes of coating obtainment]. Moscow: Gosstandart, 1988, 183 p.
3. Layner V. I., Kudryavtsev N. T. *Osnovy gal'vanostegii* [Fundamentals of galvanostegy]. Moscow: Khimiya, 1936, 368 p.
4. *Gal'vanicheskie pokrytiya v mashinostroenii. Spravochnik: v 2 t.* [Galvanic coatings in machine building. Reference book: in 2 volumes]. Ed. M. A. Shluger. Moscow: Mashinostroenie, 1985, vol. 1, 240 p.; vol. 2, 248 p.
5. Kireev S. Yu., Perelygin Yu. P., Yagnichenko N. V. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverkhnosti* [Electroplating and surface treatment]. 2011, Vol. XIX, no. 3, pp. 30–32.
6. Kostin N. A., Kublanovskiy V. S., Zabudovskiy V. A. *Impul'snyy elektroliz* [Impulse electrolysis]. Kiev: Nauk. Dumka, 1989, 168 p.
7. Fetter K. *Elektrokhimicheskaya kinetika* [Electrochemical kinetics]. Moscow: Khimiya, 1967, 856 p.
8. Kostin N. A., Kublanovskiy V. S. *Impul'snyy elektroliz spлавov* [Impulse electrolysis of alloys]. Kiev: Nauk. dumka, 1996, 207 p.
9. Kireev S. Yu., Tataeva S. N., Perelygin Yu. P. *K metodike opredeleniya vykhoda metalla po toku pri impul'snom rezhime elektroosazhdeniya VINITI* [Towards the method of determination of metal fall by current in the course of impulse mode electrodepositing of the All-Russian Institute of Scientific and Technical Information]. 2001, 6 p. Deposited in the All-Russian Institute of Scientific and Technical Information 19.07.2001, no. 1710-V2001.
10. Chandrasekar M. S. *Electrochimica Acta*. 2008, no. 53, pp. 3313–3322.

11. Berezin N. B., Sagdeev K. A., Mezhevich Zh. V. *Butlerovskie soobshcheniya* [Butlerovskie proceedings]. 2004, vol. 5, no. 1, pp. 44–47

Киреев Сергей Юрьевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра химии, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: Sergey58_79@mail.ru

Kireev Sergey Yur'evich

Candidate of engineering sciences, associate
professor, sub-department of chemistry,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Перельгин Юрий Петрович

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой химии, декан
естественнонаучного факультета,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: pyp@pnzgu.ru

Perelygin Yuriy Petrovich

Doctor of engineering sciences, professor,
head of sub-department of chemistry,
dean of the Faculty of natural sciences,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Киреева Светлана Николаевна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра химии, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: pyp@pnzgu.ru

Kireeva Svetlana Nikolaevna

Candidate of engineering sciences, associate
professor, sub-department of chemistry,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Власов Дмитрий Юрьевич

аспирант, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: pyp@pnzgu.ru

Vlasov Dmitriy Yur'evich

Postgraduate student, Penza State
University (40 Krasnaya street, Penza,
Russia)

УДК 544.654.2

Киреев, С. Ю.

Электрохимическое осаждение цинка в потенциостатическом режиме импульсного электролиза из малотоксичного лактатного электролита / С. Ю. Киреев, Ю. П. Перельгин, С. Н. Киреева, Д. Ю. Власов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 4 (28). – С. 225–235.

Вниманию авторов!

Редакция журнала «Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки» приглашает специалистов опубликовать на его страницах оригинальные статьи, содержащие новые научные результаты в области информатики, вычислительной техники, управления, электроники, измерительной техники, радиотехники, машиностроения, машиноведения, а также обзорные статьи по тематике журнала.

Статьи, ранее опубликованные, а также принятые к опубликованию в других журналах, редколлегией не рассматриваются.

Редакция принимает к рассмотрению статьи, подготовленные с использованием текстового редактора Microsoft Word for Windows (тип файла – RTF, DOC).

Необходимо представить статью в электронном виде (VolgaVuz@mail.ru) и дополнительно на бумажном носителе в двух экземплярах. Оптимальный объем рукописи 10–14 страниц формата А4. Основной шрифт статьи – Times New Roman, 14 pt через полуторный интервал. Статья **обязательно** должна содержать индекс УДК, ключевые слова и развернутую аннотацию объемом от 100 до 250 слов, имеющую четкую структуру **на русском** (Актуальность и цели. Материал и методы. Результаты. Выводы) **и английском языках** (Background. Materials and methods. Results. Conclusions).

Рисунки и таблицы должны быть размещены в тексте статьи и представлены в виде отдельных файлов (растровые рисунки в формате TIFF, BMP с разрешением 300 dpi, векторные рисунки в формате Corel Draw с минимальной толщиной линии 0,75 pt). Рисунки должны сопровождаться подрисуночными подписями.

Формулы в тексте статьи **обязательно** должны быть набраны в редакторе формул Microsoft Word Equation (версия 3.0) или MathType. Символы греческого и русского алфавита должны быть набраны прямо, нежирно; латинского – курсивом, нежирно; обозначения векторов и матриц прямо, жирно; цифры – прямо, нежирно. Наименования химических элементов набираются прямо, нежирно. Эти же требования **необходимо** соблюдать и в рисунках. Допускается вставка в текст специальных символов (с использованием шрифтов Symbol).

В списке литературы **нумерация источников** должна соответствовать **очередности ссылок** на них в тексте ([1], [2], ...). Номер источника указывается в квадратных скобках. **Требования к оформлению списка литературы** на русские и иностранные источники: **для книг** – фамилия и инициалы автора, название, город, издательство, год издания, том, количество страниц; **для журнальных статей, сборников трудов** – фамилия и инициалы автора, название статьи, полное название журнала или сборника, серия, год, том, номер, страницы; **для материалов конференций** – фамилия и инициалы автора, название статьи, название конференции, город, издательство, год, страницы.

К материалам статьи **должна** прилагаться следующая информация: фамилия, имя, отчество, ученая степень, звание и должность, место и юридический адрес работы (на русском и английском языках), e-mail, контактные телефоны (желательно сотовые).

Обращаем внимание авторов на то, что перевод имен собственных на английский язык в списке литературы осуществляется автоматически с использованием программы транслитерации в кодировке BGN (сайт translit.ru). Для обеспечения единообразия указания данных об авторах статей во всех реферируемых базах при формировании авторской справки при подаче статьи необходимо предоставить перевод фамилии, имени, отчества каждого автора на английский язык, или он будет осуществлен автоматически в программе транслитерации в кодировке BGN.

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается. Рукопись, полученная редакцией, не возвращается. Редакция оставляет за собой право проводить редакторскую и допечатную правку текстов статей, не изменяющую их основного смысла, без согласования с автором.

Статьи, оформленные без соблюдения приведенных выше требований, к рассмотрению не принимаются.