

**ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ  
ПОВОЛЖСКИЙ РЕГИОН  
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

№ 2 (26)

2013

**СОДЕРЖАНИЕ**

**ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ  
ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

- Волчихин В. И., Вашкевич Н. П., Бикташев Р. А.* Модели событийных недетерминированных автоматов представления алгоритмов управления взаимодействующими процессами в многопроцессорных вычислительных системах на основе использования механизма монитора..... 5
- Федюнин Р. Н.* Способ реализации аппаратного слоя VLIW-архитектуры на базе систолических структур..... 15
- Финогеев А. Г., Четвергова М. В.* Методика распознавания точечных особенностей на основе рандомных деревьев в системах расширенной реальности ..... 23
- Снегирев Ю. В., Тутарова В. Д.* Анализ механизмов организации параллельных вычислений ..... 34
- Дубинин В. Н.* Операционная семантика функциональных блоков ИЕС 61499 (Часть 2. Циклическая модель выполнения) ..... 45

**ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА  
И РАДИОТЕХНИКА**

- Добровинский И. Р., Медведик Ю. Т., Медведик М. Ю., Чапаев В. С.* Измерение износа резца виброакустическим методом и моделирование напряженности акустического поля внутри режущего инструмента..... 59
- Куликовский К. Л., Толокнова А. Н.* Совершенствование методов и информационно-измерительных систем определения способности водоема к самоочищению ..... 71

**МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ**

- Липов А. В.* Технология механизированной отделочно-зачистной обработки деталей из хрупких материалов ..... 81
- Аверин И. А., Губич И. А.* Анализ моделей формирования и упорядочения пористой структуры оксида алюминия ..... 91

<i>Голембиовский Ю. М., Костерев А. А., Беспалов Н. Н.</i> К вопросу об адаптации структуры многомодульного источника питания индукционной установки .....	101
<i>Кревчик В. Д., Рудин А. В., Кочкин С. В.</i> Определение модуля Юнга тонких пластин и стержней с помощью колебательной системы с присоединенной массой .....	110
<i>Бойков И. В., Кривулин Н. П.</i> Параметрическая идентификация эредитарных систем с распределенными параметрами .....	120
<i>Коновалов В. П., Макатров А. С., Богданов С. А., Герастовский В. Ф., Куцевалов А. Т., Чаплинский В. С.</i> Обеспечение глобальности и оперативности контроля и управления разгонными блоками ракет космического назначения .....	130
<i>Игнатов М. Н., Игнатова А. М., Канина А. Е.</i> Идентификация и изучение свойств неметаллических включений в сварных соединениях .....	140

**UNIVERSITY PROCEEDINGS  
VOLGA REGION  
ENGINEERING SCIENCES**

№ 2 (26)

2013

**CONTENT**

**COMPUTER SCIENCE, COMPUTER  
ENGINEERING AND CONTROL**

---

- Volchikhin V. I., Vashkevich N. P., Biktashev R. A.* Models of event Nondeterministic automata for representation of control algorithms of interacting processes in multiprocessor systems based on the use of the monitor mechanisms ..... 6
- Fedyunin R. N.* Method of realization of a hardware layer of VLIW architecture on the basis systolic structures..... 15
- Finogeev A. G., Chetvergova M. V.* Algorithm scene recognition for augmented reality systems ..... 23
- Snegirev Yu. V., Tutarova V. D.* Analysis of parallel computing organization mechanisms ..... 34
- Dubinin V. N.* An operational semantics of IEC 61499 function blocks (Part 2. Cyclic execution model) ..... 45

**ELECTRONICS, MEASURING EQUIPMENT  
AND RADIO ENGINEERING**

---

- Dobrovinskiy I. R., Medvedik Yu. T., Medvedik M. Yu., Chapaev V. S.* Cutter wear estimation by vibroacoustic method and simulation of acoustic filed intensity inside the cutting tool..... 59
- Kulikovskiy K. L., Toloknova A. N.* Enhancement of methods and information-measuring systems determining the ability of basins to self-purification ..... 71

**MACHINE SCIENCE AND BUILDING**

---

- Lipov A. V.* Technology of power-operated finishing-and-skinning of brittle material parts ..... 81
- Averin I. A., Gubich I. A.* Analysis of formation and ordering models of aluminum oxide's porous structure ..... 91
- Golembiovskiy Yu. M., Kosterev A. A., Bepalov N. N.* On the issue of adaptation of the structure of a multimodular power supply of an induction plant ..... 101

<b><i>Krevchik V. D., Rudin A. V., Kochkin S. V.</i></b> Determination of the Young's modulus for thin plates and rods by vibrating system with the associated mass .....	110
<b><i>Boykov I. V., Krivulin N. P.</i></b> Parametric identification of hereditary systems with distributed parameters.....	120
<b><i>Kononov V. P., Makatrov A. S., Bogdanov S. A., Gerastovskiy V. F., Kutsevalov A. T., Chaplinskiy V. S.</i></b> Securing global and operative control and direction of upper-stage rockets of a space craft .....	130
<b><i>Ignatov M. N., Ignatova A. M., Kanina A. E.</i></b> Identification and properties of nonmetallic inclusions in welded joints .....	140

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

---

УДК 681.3.012

*В. И. Волчихин, Н. П. Вашкевич, Р. А. Бикташев*

## МОДЕЛИ СОБЫТИЙНЫХ НЕДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ АВТОМАТОВ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИМИ ПРОЦЕССАМИ В МНОГОПРОЦЕССОРНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕХАНИЗМА МОНИТОРА<sup>1</sup>

*Аннотация.* Целью работы является создание методики формального описания алгоритма управления взаимодействующими параллельными процессами при обмене сообщениями между ними, выполняющимися с использованием механизма монитора, кольцевого буфера и типовой задачи «производители-потребители». В основу работы положен метод событийных недетерминированных автоматов (СНДА), позволяющий представить алгоритм управления в простой и компактной форме в виде системы рекуррентных канонических бескванторных уравнений, описывающих все реализуемые в системе управления частные события. Отличительная особенность метода СНДА заключается в том, что система уравнений, представляющая функции переходов в управляющем алгоритме, описывается не в терминах состояний детерминированных автоматов (ДА), а в терминах частных событий недетерминированных автоматов, одновременное существование которых и определяет состояние эквивалентного ему ДА. Так как число частных событий недетерминированных автоматов значительно меньше числа состояний эквивалентных ему ДА, то описание управляющего алгоритма на языке СНДА будет отличаться значительной простотой. Представленная методика формального описания частных событий алгоритма управления передачей сообщений в распределенных и многопроцессорных системах на языке СНДА обеспечивает реализацию основных свойств, которыми должны обладать системы управления: отсутствие тупиковых ситуаций (бесконфликтность) и справедливость (отсутствие бесконечного ожидания и нахождения в мониторе процессов, обращающих к общему ресурсу). Аналитическое представление алгоритма управления взаимодействующими параллельными процессами в виде системы рекуррентных канонических бескванторных уравнений позволяет выполнить простую трансформацию описания алгоритма управления на язык описания аппаратуры (например, VHDL) для верификации алгоритма и его аппаратной реализации.

*Ключевые слова:* алгоритм управления, взаимодействующие параллельные процессы, событийные недетерминированные автоматы, задача «производители – потребители», механизмы монитора.

---

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

**MODELS OF EVENT NONDETERMINISTIC AUTOMATA  
FOR REPRESENTATION OF CONTROL  
ALGORITHMS OF INTERACTING PROCESSES  
IN MULTIPROCESSOR SYSTEMS BASED  
ON THE USE OF THE MONITOR MECHANISMS**

*Abstract.* The aim of the paper is to develop the methodology of formal description of the control algorithm for interacting parallel processes during the exchange of messages between them that includes the use of the monitor, the ring buffer and the "producers-consumers" sample task. The study is based on the method of event nondeterministic automata (ENDA), which allows to express the control algorithm in a simple and compact form as a quantifier-free system of recurrent canonical equations (SRCE describes all private events that have been implemented in the control system). A distinctive feature of the method ENDA is that the system (SRCE), which represents the transition function in the control algorithm is not described in terms of states of deterministic automata (DA), and in terms of private events NDA, the simultaneous existence of which determines the status of an equivalent DA. Since the number of ENDA private events is much smaller than the number of states of DA equivalent to it, then the description of the control algorithm in the language of ENDA will be significantly easier. The presented method of the formal description of the private events control algorithm in distributed message-passing multiprocessor system, and the language of the ENDA provides realization of the basic properties necessary for the control system: absence of deadlocks (lack of conflicts) and justice (no endless waiting and searching in the monitor for the processes accessing the shared resource). Analytical representation of the control algorithm by the interacting parallel processes as a system of SRCE allows to perform a simple transformation of the description of the control algorithm for hardware description languages (e. g., VHDL) to verify the algorithm and its hardware implementation using PLD, which in turn provides greater reliability and performance of messages transmission systems.

*Key words:* control algorithm, interacting parallel processes, event nondeterministic automata, «producers-consumers» task, monitor mechanisms.

**Введение**

В параллельных программах неизбежно возникают межпроцессные взаимодействия, проявляющиеся в виде обмена данными между параллельными ветвями алгоритма или параллельными процессами (потоками). Для такого обмена существует множество механизмов, таких как разделяемая память, именованные и неименованные каналы. Все эти механизмы реализуются программно в составе операционной системы, что приводит к снижению производительности операционной системы. Перенесение части функций межпроцессного обмена в аппаратную часть системы может существенно понизить латентность системы, повысить пропускную способность, а также освободить процессор для выполнения прикладной задачи.

Любой процесс обмена происходит с использованием буфера некоторого объема, причем буфером может быть либо разделяемая область в оперативной памяти, либо объект операционной системы. В каждом случае процесс-передатчик формирует данные и записывает их в буфер, т.е. является

производителем, процесс-приемник читает их из него, т.е. является потребителем.

Проектирование средств аппаратной поддержки является сложной технической задачей и требует разработки верифицированных алгоритмов управления передачей сообщений. В статье предлагается использование аппарата событийных недетерминированных автоматов (СНДА) для формального описания и структурной реализации механизмов синхронизации при доступе к общему (критическому) ресурсу.

Будем считать, что используемая модель программирования системы обмена сообщениями является многопоточной. Отсюда следует, что в многопроцессорной системе возможно существование независимых потоков, в том числе и потоков процесса-передатчика. В частности, один поток может формировать данные, а другой поток записывать их в согласующий буфер. Такая постановка приводит к усложнению процедуры управления процессами и требует дополнительных средств ее реализации, однако является наиболее общей.

Для решения задач управления взаимодействующими параллельными процессами используют различные механизмы синхронизации процессов, в том числе и механизм монитора [1, 2], который был впервые предложен в 1974 г. Хоаром [3] и Бринчем Хансеном [4] для организации синхронизации процессов при обращении к общим критическим ресурсам. Применение такого механизма синхронизации процессов по сравнению с механизмами критических интервалов с использованием семафоров позволяет существенно повысить надежность и компактность программного обеспечения реализации информационных систем [1, 5, 6].

В данной работе рассматривается методика формального описания алгоритма управления взаимодействующими параллельными процессами при обмене сообщениями с использованием механизма мониторов и кольцевого буфера в качестве общего критического ресурса. Использование языка СНДА для описания всех реализуемых в алгоритме частных событий позволяет представить алгоритм управления в простой и компактной форме, так как описание алгоритма выполняется не в терминах состояний детерминированных автоматов (ДА), а в терминах частных событий [7, 8]. Такое представление алгоритма управления позволяет просто трансформировать его на другие языки с целью структурной реализации алгоритма (в том числе аппаратно и микропрограммно) и его верификации на моделях [9, 10].

Учитывая, что функции согласующего кольцевого буфера при обмене сообщениями между сервером (производителем) и клиентом (потребителем) рассмотрены подробно в [8], в данной работе указывается только на формирование основных переменных, которые определяют состояние согласующего буфера, а следовательно, и логические условия выполнения операций над ним. В данном случае производитель (сервер) помещает сообщение в кольцевой буфер, а потребитель (клиент) извлекает их оттуда. Таким образом, буфер содержит очередь уже помещенных, но еще не извлеченных сообщений. Эта очередь может быть представлена связным списком или массивом.

Для представления очереди сообщений используются две целочисленные переменные, которые указывают соответственно первую заполненную и первую пустую ячейки буфера. Эти переменные формируются с помощью счетчиков буфера записи (СчБз) и счетчика буфера чтения (СчБчт). Показа-

ния СчБз будут определять номер первой незаполненной ячейки, а счетчика СчБчт – номер первой заполненной ячейки. Для этой цели при инициализации системы управления в указанные счетчики записываются единицы и устанавливается число ячеек буфера. Тогда по показаниям этих счетчиков определяются события: буфер полон ( $S_{БП} = 1$ ) и буфер пуст ( $S_{БО} = 1$ ). Введение таких двух событий позволяет охарактеризовать промежуточное состояние буфера сообщений, когда он может быть и не полон и не пуст. Это может иметь место, когда при очередной записи буфер был заполнен не полностью или когда после очередного чтения буфер не пуст. Для этого варианта использования буфера сообщений вводятся еще два дополнительных счетчика: Сч\*з и Сч\*чт, в которые перед операцией с буфером сообщений заносится число порций информации, записываемой или считываемой из буфера за один раз. По показаниям этих счетчиков определяются события, свидетельствующие о том, что должна быть прекращена операция записи ( $S_{кз} = 1$ ) или чтения ( $S_{кч} = 1$ ).

**Формализация основных событий, реализующих алгоритм  
управления процессами в решаемой задаче при использовании  
механизма монитора и языка СНДА**

Для формального описания основных событий алгоритма управления процессами в решаемой задаче необходимо сформулировать основные свойства и требования к монитору, чтобы обеспечить бесконфликтную реализацию взаимодействия процессов (отсутствие тупиков) и свойства справедливости реализации операций над критическим ресурсом. Такие основные свойства монитора были сформулированы, например, в [5] таким образом:

а) чтобы изменить состояние общего ресурса процесс должен войти в монитор. При этом только один процесс имеет исключительное право доступа в монитор, а вне монитора известны только имена процедур, которые могут изменить состояние общего ресурса и неизвестно состояние общего ресурса;

б) внутри монитора процесс не может обращаться к переменным, объявленным вне монитора;

в) постоянные переменные, характеризующие состояние ресурса, иницируются до вызова его процедур.

Учитывая эти свойства, можно сформулировать основные требования к механизму монитора, которые в принципе идентичны требованиям к критическим интервалам, обеспечивающим отсутствие конфликтных ситуаций (свойство безопасности) и обеспечение справедливости доступа процессов к общему ресурсу, которые были определены Деккером и Дейкстра [1, 11]. Таким образом, эти требования можно представить следующим образом:

1. В любой момент времени только один процесс может находиться внутри монитора.

2. Ни один процесс не может оставаться внутри монитора бесконечно долго.

3. Ни один процесс не должен бесконечно долго ждать входа в монитор.

4. Процесс, вышедший из монитора не обслуженный, имеет преимущественное право на повторный вход в монитор по сравнению с процессами,

находящимися в начальной очереди и требующими выполнить такую же процедуру над общим ресурсом.

Учитывая указанные свойства и требования к монитору, можно сформулировать условия зарождения и сохранения основных событий, реализующих алгоритм управления процессами при обращении к общему ресурсу на основе использования языка СНДА следующим образом.

**Первое и второе требования** к механизму монитора обеспечиваются реализацией событий, позволяющих войти в монитор и находиться в нем в любой момент времени только одному процессу, который не может бесконечно долго находиться в нем. Описание таких событий ( $S_M^i$ ) будет состоять из двух частей: первая составляющая определяет зарождение события, определяющего начальный вход  $i$ -го процесса в монитор ( $S_{M,3}^i$ ), а вторая – его сохранение в мониторе ( $S_{M,C}^i$ ), т.е. имеем

$$S_M^i(t+1) = S_{M,3}^i \vee S_{M,C}^i, \quad (1)$$

где первая составляющая уравнения (1) в свою очередь должна определяться конъюнкцией трех событий:

$$S_{M,3}^i = S_{ВП}^i S_{ВЗ}^i S_{ПР}^i, \quad (2)$$

где  $S_{ВП}^i$  – событие, определяющее прием заявки  $i$ -го процесса на обслуживание;  $S_{ВЗ}^i$  – событие, обеспечивающее взаимоисключение событий  $S_M^i$ ;  $S_{ПР}^i$  – событие, определяющее приоритет  $i$ -го процесса.

Вторая составляющая уравнения (1) в свою очередь должна определяться конъюнкцией из трех событий:

$$S_{M,C}^i = S_M^i \overline{S_n^i} \overline{S_{кр,3}^i}, \quad (3)$$

где  $S_n^i$  – событие, свидетельствующее об окончании одноразовой операции  $i$ -го процесса с общим критическим ресурсом;  $S_{кр,3}^i$  – событие, свидетельствующее о том, что критический ресурс для  $i$ -го процесса занят.

Рассмотрим формальное описание отдельных составляющих в уравнениях (1) и (2).

Событие  $S_{ВП}^i$  обеспечивает реализацию **третьего требования** к механизму монитора, основанного на том, что заявка  $i$ -го процесса на обслуживание воспринимается и сохраняется только в том случае, когда данный процесс не находится в мониторе. Тогда это событие формализуется следующим образом:

$$S_{ВП}^i(t+1) = (S_3^i \vee S_{ВП}^i) \overline{S_M^i} \overline{S_{МП}^i}, \quad (4)$$

где  $S_3^i$  – заявка  $i$ -го процесса;  $S_{МП}^i$  – событие, определяющее повторный вход  $i$ -го процесса в монитор, вышедшего из монитора необслуженным, т.е.

это событие обеспечивает **четвертое требование** к механизму монитора и будет иметь следующий вид:

$$S_{МП}^i(t+1) = S_{МН}^i S_{КР,0}^i \vee S_{МП}^i S_n^i, \quad (5)$$

где  $S_{МН}^i$  – событие, свидетельствующее о выходе  $i$ -го процесса из монитора необслуженным;  $S_{КР,0}^i$  – событие, свидетельствующее об освобождении критического ресурса для операции с ним  $i$ -го процесса после выполнения предыдущей операции.

Событие  $S_{ВЗ}^i$  является основным событием, определяющим вход в монитор в одно и то же время только одного  $i$ -го процесса, и определяется взаимоисключением событий входа процессов в монитор на основе их несовместимости с  $i$ -м процессом. Это событие представляется следующей формулой:

$$S_{ВЗ}^i = \Lambda \left( \overline{S_M^\alpha \vee S_{МП}^\alpha} \right)_{(\forall \alpha)[\alpha \neq i]}. \quad (6)$$

Событие  $S_{ПР}^i$  обеспечивает однозначность входа процессов в монитор, используя их приоритетность, которая определится следующей формулой:

$$S_{ПР}^i = S_{ПР}^i(0) \vee \overline{S_{ВП}^i S_{КР,0}^i S_{МН}^i}, \quad (7)$$

где  $S_{ПР}^i(0)$  – событие, определяющее приоритет  $i$ -го процесса в начальный период. Введение этого события объясняется тем обстоятельством, что в начальный период обращения процессов к общему ресурсу могут быть истинны все события типа  $S_{ВЗ}^i$  и  $S_{ВП}^i$ .

В дальнейшем при описании всех событий алгоритма управления при обращении к критическому ресурсу будем базироваться в качестве примера на варианте решения задачи взаимодействия для двух процессов: один производитель и один потребитель, заявки которых будут фиксироваться в двух очередях – одна начальная очередь, а другая очередь ждущих заявок процессов, вышедших из монитора необслуженными. Для этого варианта полная система уравнений, определяющая доступ процессов к критическому ресурсу и выполнение операций над ними, будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} S_M^1(t+1) &= S_{ВП}^1 S_{ВЗ}^1 S_{ПР}^1 \vee S_M^1 \left( \overline{S_n^1 \vee S_{КР,3}^1} \right), \\ S_M^2(t+1) &= S_{ВП}^2 S_{ВЗ}^2 S_{ПР}^2 \vee S_M^2 \left( \overline{S_n^2 \vee S_{КР,3}^2} \right), \\ S_{МП}^1(t+1) &= S_{МН}^1 S_{КР,0}^1 \vee S_{МП}^1 \overline{S_n^1}, \quad S_{МП}^2(t+1) = S_{МН}^2 S_{КР,0}^2 \vee S_{МП}^2 \overline{S_n^2}, \\ S_{ВП}^1(t+1) &= \left( S_3^1 \vee S_{ВП}^1 \right) \left( \overline{S_M^1 \vee S_{МП}^1} \right), \quad S_{ВП}^2(t+1) = \left( S_3^2 \vee S_{ВП}^2 \right) \left( \overline{S_M^2 \vee S_{МП}^2} \right), \\ S_{ПР}^1 &= S_{ПР}^1(0) \vee \overline{S_{ВП}^1 S_{КР,0}^1 S_{МН}^1}, \quad S_{ПР}^2 = \overline{S_{ВП}^2 S_{КР,0}^2 S_{МН}^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_{\text{ПР}}^1(0) &= S_0 x_n S_{\text{БП}}^1, \quad S_{\text{КР},3}^1 = S_{\text{БП}}, \quad S_{\text{КР},3}^2 = S_{\text{БО}}, \\
 S_{\text{МН}}^1(t+1) &= S_{\text{М}}^1 S_{\text{КР},3}^1 \vee S_{\text{МН}}^1 \overline{S_{\text{КР},0}^1}, \quad S_{\text{МН}}^2(t+1) = S_{\text{М}}^2 S_{\text{КР},3}^2 \vee S_{\text{МН}}^2 \overline{S_{\text{КР},0}^2}, \\
 S_{\text{КР},0}^1(t+1) &= S_n^2 \vee S_{\text{КР},0}^1 \left( \overline{S_{\text{МП}}^1} \vee S_{\text{М}}^1 \right), \quad S_{\text{КР},0}^2(t+1) = S_n^1 \vee S_{\text{КР},0}^2 \left( \overline{S_{\text{МП}}^2} \vee S_{\text{М}}^2 \right), \\
 S_{\text{РЗ}}^1(t+1) &= \left( S_{\text{М}}^1 \vee S_{\text{МП}}^1 \right) S_{\text{КР},\text{C}}^1 \vee S_{\text{РЗ}}^1 \left( \overline{S_{\text{БП}} \vee S_{\text{КЗ}}} \right), \\
 S_{\text{РЧ}}^2(t+1) &= \left( S_{\text{М}}^2 \vee S_{\text{МП}}^2 \right) S_{\text{КР},\text{C}}^2 \vee S_{\text{РЧ}}^2 \left( \overline{S_{\text{БО}} \vee S_{\text{КЧ}}} \right), \\
 S_{\text{КР},\text{C}}^1 &= \left( \overline{S_{\text{БП}}} \vee S_{\text{БО}} \right), \quad S_{\text{КР},\text{C}}^2 = \left( S_{\text{БП}} \vee \overline{S_{\text{БО}}} \right), \\
 S_n^1(t+1) &= S_{\text{РЗ}}^1 (S_{\text{КЗ}} \vee S_{\text{БП}}), \quad S_n^2(t+1) = S_{\text{РЧ}}^2 (S_{\text{КЧ}} \vee S_{\text{БО}}), \quad (8)
 \end{aligned}$$

где  $S_{\text{РЗ}}^1$  и  $S_{\text{РЧ}}^2$  – события, определяющие выполнение операции записи и чтения соответственно;  $S_{\text{КР},\text{C}}^1$  и  $S_{\text{КР},\text{C}}^2$  – комбинационные события, определяющие возможность выполнения операции записи и чтения соответственно;  $S_{\text{КЗ}}$  и  $S_{\text{КЧ}}$  – события, свидетельствующие об окончании операции записи и чтения порций информации, определяемых счетчиками  $S_{\text{Ч}^*3}$  и  $S_{\text{Ч}^*\text{ЧТ}}$  соответственно.

Учитывая представленное аналитическое описание всех основных частных событий (уравнения 8), реализующих управляющий алгоритм взаимодействия процессов в решаемой задаче, можно для наглядности представить рассматриваемый алгоритм в виде графа СНДА (рис. 1).

### Заключение

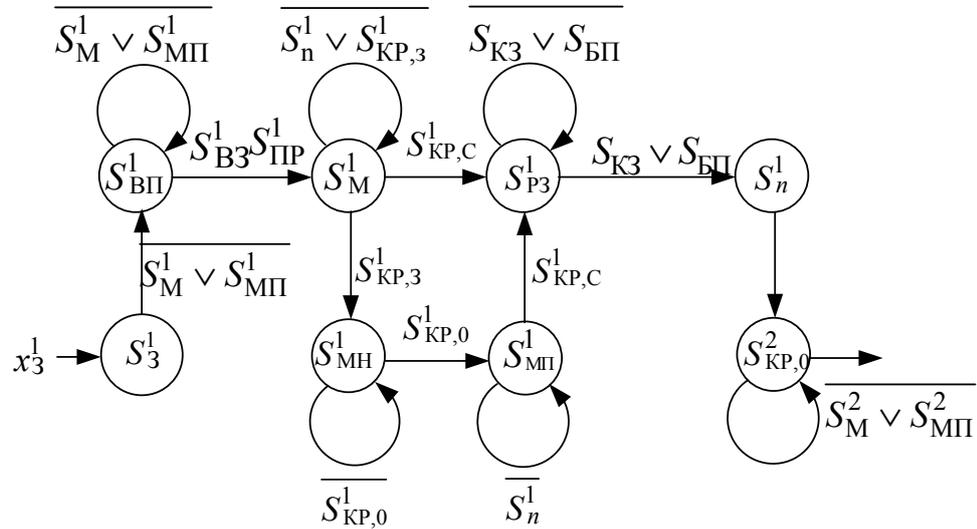
В заключение можно отметить, что полученные уравнения описания алгоритма управления параллельными процессами в виде стандартной системы рекуррентных бескванторных предикатных формул, представляющих все основные частные события в решаемой задаче, отличаются следующими особенностями:

1. Обеспечивается выполнение всех основных требований к монитору, а именно: отсутствие тупиковых ситуаций (свойство безопасности) и учет реализации свойства справедливости.

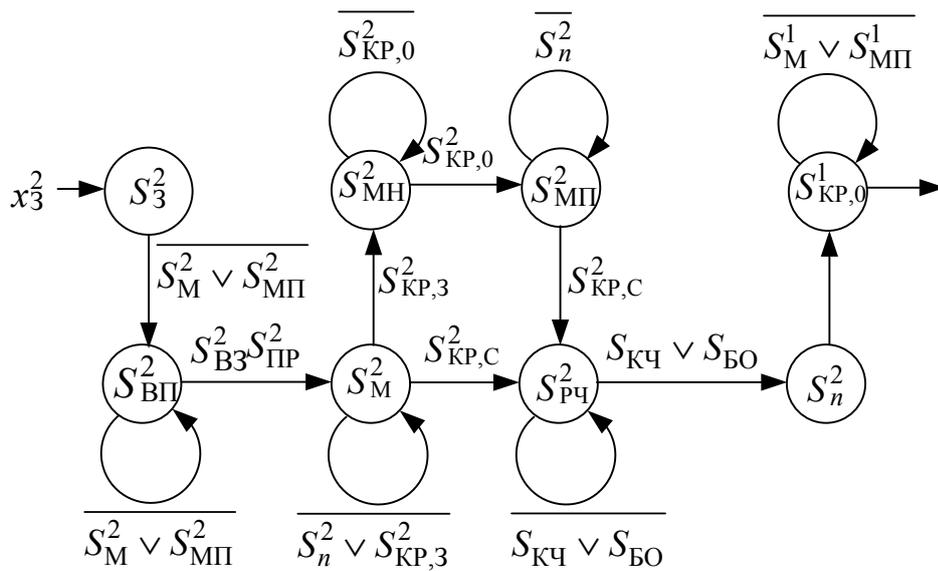
2. Возможна простая трансформация описания алгоритма управления процессами на язык VHDL для моделирования и верификации алгоритма и аппаратной реализации алгоритма управления с использованием ПЛИС, что, в свою очередь, обеспечивает более высокую надежность и производительность систем управления.

3. Если сравнить формальное описание основных частных событий управления процессами в решаемой задаче с использованием механизма монитора и механизма критических интервалов (участков), то можно отметить, что для второго варианта число уравнений, представляющих алгоритм управления процессами, будет значительно больше, так как каждый процесс должен иметь свой критический участок, который организует обращение про-

цесса к критическому ресурсу. Откуда следует, что для первого варианта при использовании монитора структурная реализация алгоритмов управления процессами в решаемой задаче будет отличаться значительной простотой по сравнению с использованием механизмов критических участков для второго варианта.



а)



б)

Рис. 1. Графы СНДА алгоритмов управления процессов производителя (а) и потребителя (б) при их обращении к общему ресурсу (буферу сообщений)

**Список литературы**

1. Дейтел, Г. Введение в операционные системы : в 2-х т. ; пер. с англ. / Г. Дейтел. – М. : Мир, 1987. – Т. 1. – 359 с.

2. **Соловьев, Г. И.** Операционные системы ЭВМ : учеб. пособие / Г. И. Соловьев, В. Д. Никитин. – М. : Высш. шк., 1988. – 207 с.
3. **Hoare, C. A. R.** Monitors, An Operating System Structuring Concept / C. A. R. Hoare // Erratum in Commun. Of the ACM. – 1975. – V. 18. – P. 95.
4. **Brinch Hansen, P.** The Programming Language Concurrent Pascal / P. Brinch Hansen // IEEE Trans. On Software Engineering. – 1975. – V. SE-1. – P. 199–207.
5. **Эндрюс, Г. Р.** Основы многопоточного и распределенного программирования : пер. с англ. / Г. Р. Эндрюс. – М. : Вильямс, 2003. – 512 с.
6. **Таненбаум, Э.** Современные операционные системы / Э. Таненбаум. – 2-е изд-е. – СПб. : Питер, 2002. – 1040 с.
7. **Вашкевич, Н. П.** Недетерминированные автоматы в проектировании систем параллельной обработки : учеб. пособие / Н. П. Вашкевич. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2004. – 280 с.
8. **Вашкевич, Н. П.** Формальное описание алгоритма управления взаимодействующими параллельными процессами в задаче «производители–потребители» с использованием кольцевого согласующего буфера / Н. П. Вашкевич, Р. А. Бикташев, А. А. Тараканов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2007. – № 4. – С. 98–107.
9. **Кларк, Э. М.** Верификация моделей программы: Model Checking : пер. с англ. / Э. М. Кларк, О. Грамберг, Д. Пелед. – М. : МЦНМО, 2002. – 416 с.
10. **Вашкевич, Н. П.** Аппаратная реализация функций синхронизации параллельных процессов при обращении к разделяемому ресурсу на основе ПЛИС / Н. П. Вашкевич, Р. А. Бикташев, Е. И. Гурин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2007. – № 2. – С. 3–12.
11. **Кейлингер, П.** Элементы операционных систем : пер. с англ. / П. Кейлингер. – М. : Мир, 1985. – 295 с.

### References

1. Deytel G. *Vvedenie v operatsionnye sistemy : v 2-kh t.* [Introduction into operative systems: in 2 vol.]. Moscow: Mir, 1987, vol. 1, 359 p.
2. Solov'ev G. I., Nikitin V. D. *Operatsionnye sistemy EVM : ucheb. posobie* [Computer operational systems: tutorial]. Moscow: Vyssh. shk., 1988, 207 p.
3. Hoare C. A. R. *Erratum in Commun. Of the ACM.* 1975, vol. 18, p. 95.
4. Brinch Hansen P. *IEEE Trans. On Software Engineering.* 1975, vol. SE-1, pp. 199–207.
5. Endryus G. R. *Osnovy mnogopotochnogo i raspredelennogo programmirovaniya* [Basics of multithreaded and dispense programming]. Moscow: Vil'yams, 2003, 512 p.
6. Tanenbaum E. *Sovremennye operatsionnye sistemy* [Modern operational systems]. Saint Petersburg: Piter, 2002, 1040 p.
7. Vashkevich N. P. *Nedeterminirovannye avtomaty v proektirovanii sistem parallel'noy obrabotki: ucheb. posobie* [Nondeterministic automata in parallel processing systems design: tutorial]. Penza: Izd-vo Penz. gos. un-ta, 2004, 280 p.
8. Vashkevich N. P., Biktashev R. A., Tarakanov A. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2007, no. 4, pp. 98–107.
9. Klark E. M., Gramberg O., Peled D. *Verifikatsiya modeley programmy: Model Checking* [Verification of program models: Model checking]. Moscow: MTsNMO, 2002, 416 p.
10. Vashkevich N. P., Biktashev R. A., Gurin E. I. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2007, no. 2, pp. 3–12.
11. Keylingert P. *Elementy operatsionnykh sistem* [Operational system elements]. Moscow: Mir, 1985, 295 p.

***Волчихин Владимир Иванович***

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

E-mail: rectorat@pnzgu.ru

***Volchikhin Vladimir Ivanovich***

Doctor of engineering sciences, professor,  
president of Penza State University  
(Penza, 40 Krasnaya str.)

***Вашкевич Николай Петрович***

доктор технических наук, профессор,  
кафедра вычислительной техники,  
Пензенский государственный  
университет (г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: vt@alice.pnzgu.ru

***Vashkevich Nikolay Petrovich***

Doctor of engineering sciences, professor,  
sub-department of computer science,  
Penza State University  
(Penza, 40 Krasnaya str.)

***Бикташев Равиль Айнулович***

кандидат технических наук, профессор,  
кафедра вычислительных машин  
и систем, Пензенская государственная  
технологическая академия (г. Пенза,  
проезд Байдукова, д. 1а)

E-mail: bra559620@sura.ru

***Biktashev Ravil' Aynulovich***

Candidate of engineering sciences,  
professor, sub-department of computing  
machines and systems, Penza State  
Technological Academy  
(Penza, 1a Baydukova passage)

---

УДК 681.3.012

**Волчихин, В. И.**

**Модели событийных недетерминированных автоматов представления алгоритмов управления взаимодействующими процессами в многопроцессорных вычислительных системах на основе использования механизма монитора / В. И. Волчихин, Н. П. Вашкевич, Р. А. Бикташев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 2 (26). – С. 5–14.**

*Р. Н. Федюнин*

## **СПОСОБ РЕАЛИЗАЦИИ АППАРАТНОГО СЛОЯ VLIW-АРХИТЕКТУРЫ НА БАЗЕ СИСТОЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР**

*Аннотация.* Описывается способ реализации арифметико-логического устройства (АЛУ) специализированных процессоров на базе VLIW-архитектуры. Дается описание функциональных блоков АЛУ для реализации базовых арифметико-логических операций. Показан вариант реализации универсальной ячейки, на базе которой строится вычислительное ядро АЛУ. Приведены примеры вычислительных схем обработки данных АЛУ. Результатом работы являются патентно способные решения, которые нашли практическое отражение в опытно-конструкторских решениях на базе промышленных предприятий г. Пензы. Перспективность решения доказана множеством статей в зарубежной и российской научной прессе и техническими решениями корпораций XILINX и ALTERA.

*Ключевые слова:* систолические вычисления, VLIW, конвейерные вычисления, конвейерное умножение.

*R. N. Fedyunin*

## **METHOD OF REALIZATION OF A HARDWARE LAYER OF VLIW ARCHITECTURE ON THE BASIS SYSTOLIC STRUCTURES**

*Abstract.* The article describes a method of realization of arithmetic logic unit (ALU) of dedicated processors on the basis of VLIW architecture. The author describes ALU functional blocks for realization of basic arithmetic logic operations, introduces a variant of realization of a universal cell which is the base for ALU computing core construction and gives the examples of ALU data processing computing schemes. The results of the research are the patent competitive solutions that have been practically implemented in research and production solution on the basis of industrial enterprises of Penza. Promissory nature of the solution is proved by multiple articles in foreign and Russian scientific press as well as by technical solutions of such corporations as XILINX and ALTERA.

*Key words:* systolic computing, VLIW, pipeline computing, pipeline multiplication.

В настоящий момент VLIW-процессоры составляют ощутимую конкуренцию RISC-процессорам. Это связано с рядом недостатков RISC-архитектуры.

Главный недостаток RISC-процессоров и причина увеличения аппаратных издержек – трудности в поддержании загрузки конвейера. Суперскалярные RISC-процессоры способны обрабатывать за один цикл лишь несколько команд (не более четырех), что ограничивает параллелизм выполнения команд на одном процессоре. Четыре команды за один цикл означают лишь четырехкратный параллелизм. В реальности для некоторых задач число команд параллельной обработки в RISC-ядре еще меньше.

Приведем причины, мешающие RISC-процессору обрабатывать 8 и более команд за цикл:

– мешает ограничение аппаратной технологии: у обычного RISC-процессора для этого просто мало независимых функциональных узлов;

– вторая причина в том, что в цикле конвейера RISC-ядра недостаточно времени, чтобы проанализировать 8–16 команд, определить, какие функциональные устройства не заняты, и отправить каждую команду на соответствующий узел; увеличение же времени цикла сократит производительность процессора;

– третье ограничение – компилятор не способен генерировать для каждого цикла по 8–16 независимых команд.

Развитие аппаратных технологий позволяет создать однокристалльный процессор с 8, 16 и даже большим числом функциональных узлов. Технология компиляторов также развилась достаточно, чтобы распознать многократный параллелизм команд и обеспечить работой больше функциональных узлов.

Но возможность выбирать на выполнение большее число команд бесполезна, если аппаратура суперскалярного RISC-процессора может выполнять одновременно ограниченное число команд.

VLIW-технология решает эту проблему, снимая с аппаратуры процессора задачу распределения команд. Вместо того, чтобы, как в RISC-процессоре, анализировать каждую инструкцию в потоке команд и затем распределять их по одной в функциональные узлы, компилятор VLIW генерирует отдельную команду для каждого функционального узла. Например, если функциональных узлов 16, то компилятор генерирует для каждого процессорного цикла 16 команд; но, в отличие от RISC-процессора, который анализирует, в какой функциональный узел направлять каждую команду, VLIW-процессор просто посылает первую команду в первый узел, вторую – во второй и т.д. Конечно, если на каком-то цикле у компилятора не оказывается команды для некоторого узла, он по-прежнему должен сгенерировать код «нет операции». Так как VLIW-процессор – только блок выполнения, а не анализа команд, то его время цикла меньше, чем время цикла суперскалярного RISC-процессора. Меньшее время цикла и увеличенная степень параллелизма исполнения команд, достигаемая посредством загрузки большего числа функциональных узлов, дает VLIW преимущества перед RISC.

Процессор VLIW, представленный на рис. 1, может выполнять в предельном случае шесть операций за один такт и работать при меньшей тактовой частоте намного эффективнее существующих суперскалярных RISC-аналогов.

Система, представленная на рис. 1, работает следующим образом. Команды из КЭШа-команд одновременно настраивают функциональные блоки (ФБ) на работу с конкретной операцией. Затем каждый ФБ в конвейерном режиме обрабатывает свой массив данных, поступающий из соответствующего банка КЭШ-данных. Данный процесс возможен, так как каждый ФБ – это поле однородных процессорных модулей (ПМ) (рис. 2) [1, 2]. Структура ПМ и поля однородной структуры приведены далее.

Таким образом, система получает масштабируемое операционное поле, готовое выполнить сколь угодно большое число операций. Технологически исполнение такого вида процессоров дешевле и проще [3] по сравнению с RISC-аналогами.

Теперь более подробно опишем операционную часть функциональных блоков процессора (рис. 3, 4) – процессорные модули.

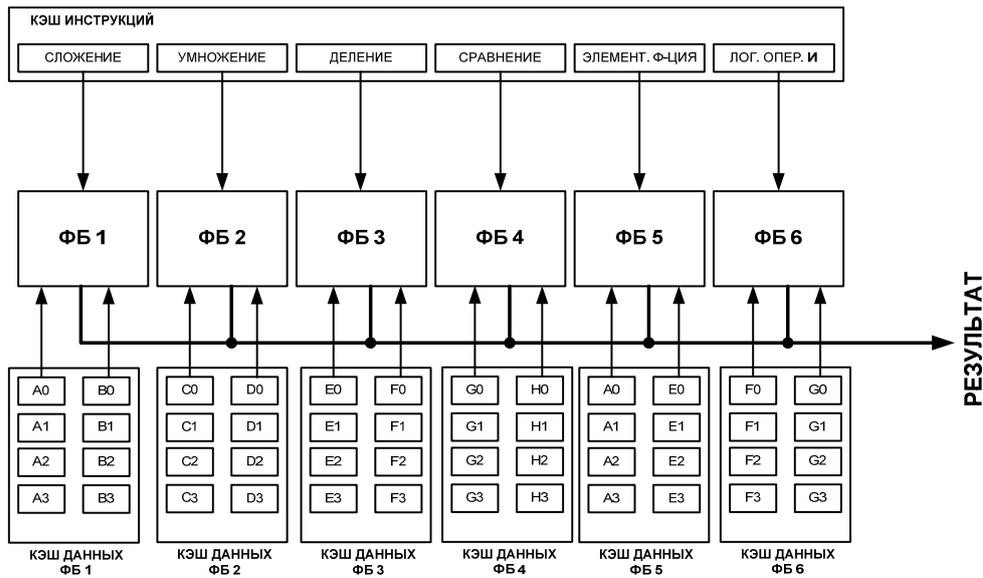


Рис. 1. Организация аппаратной части VLIW-процессора

В состав каждого процессорного модуля введены битовый сумматор, перенастраиваемая комбинационная логика коммутации данных и их элементарных логических преобразований. Функциональные возможности процессорного модуля с данной организацией обеспечивают реализацию системы логических функций от пяти переменных. Аргументами функций являются значения логических переменных, поступающих на обработку по информационным каналам  $t, x, s, p, y$ ; вычисленные значения функций формируются соответственно на информационных выходах процессорного модуля  $t^*, x^*, s^*, p^*, y^*$ .

Настройка оборудования модуля ПМ на выполнение соответствующего типа функций выполняется по каналам управления  $k, z1, z2$ .

Для настройки модуля ПМ на реализацию требуемой операции достаточно сформировать на его управляющих входах  $k, z1, z2$  значение кода соответствующей операции. Для установки и поддержания требуемого кода операции на управляющих входах каждого модуля вычислительной среды можно использовать индивидуальные регистры команд, загружаемые при настройке вычислительной среды.

При формировании на управляющем входе процессорного модуля сигнала  $k = 1$  обеспечивается реализация следующей системы функций алгебры логики:

1	$s^* = s \cdot p;$
2	$p^* = s \vee p;$
3	$x^* = \overline{z_1} \cdot (\overline{z_2} \cdot x \vee z_2 \cdot t);$
4	$t^* = z_1 \cdot \overline{z_2} \cdot x \cdot t \vee z_1 \cdot z_2 \cdot (x \vee t) \vee \overline{z_1} \cdot z_2 \cdot t;$
5	$y^* = y;$

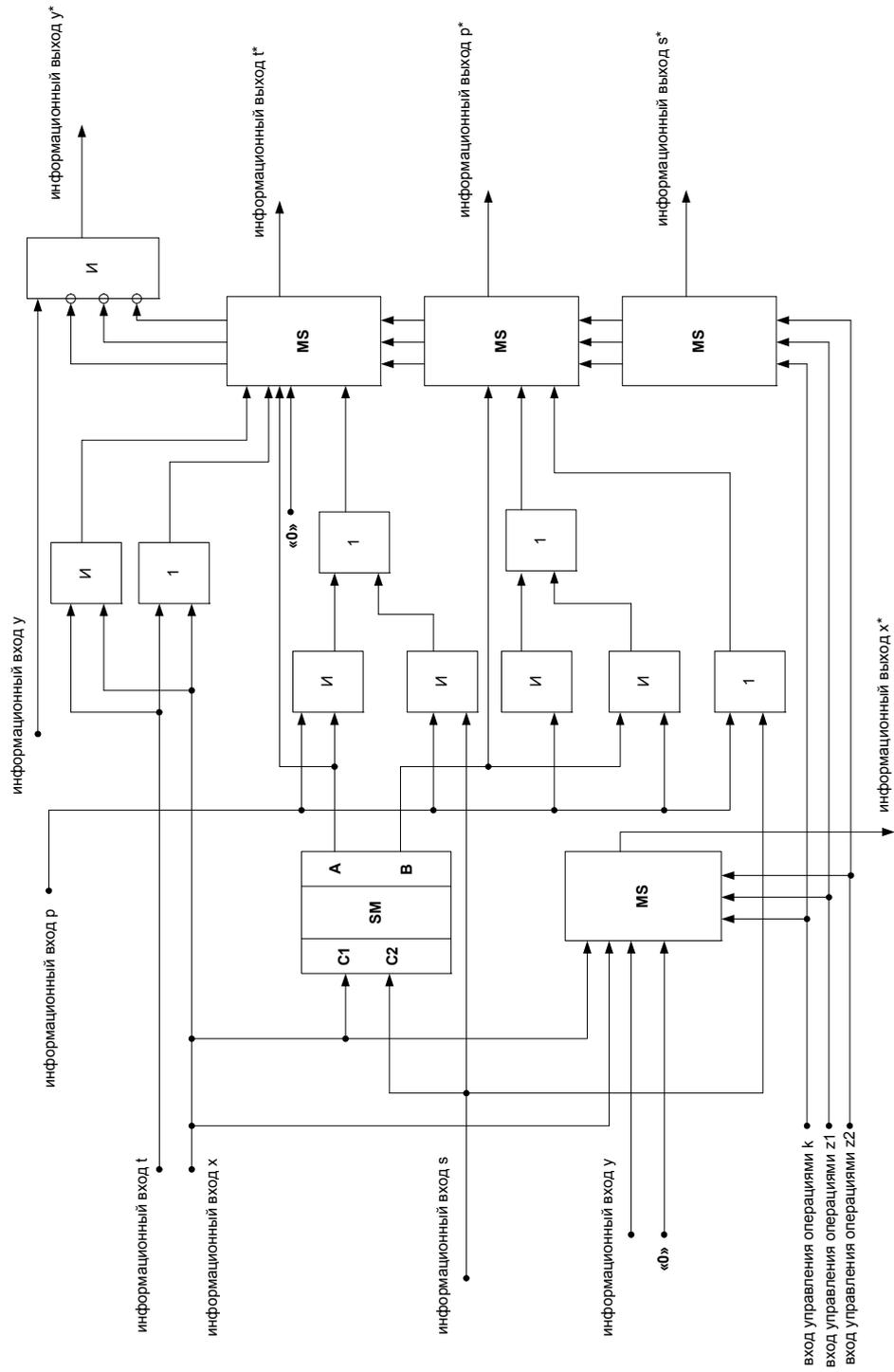


Рис. 2. Ячейка однородной вычислительной структуры

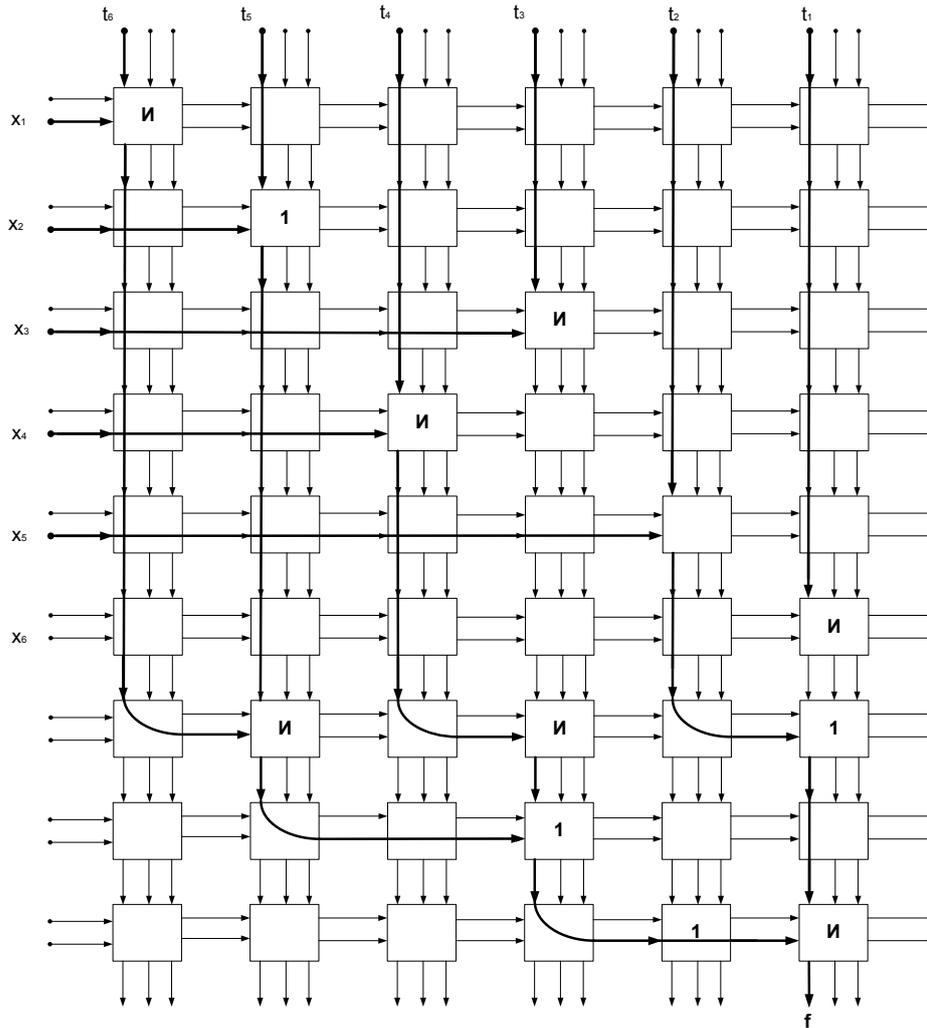


Рис. 3. Пример реализации логической функции в ФБ

Данная система функций позволяет выполнить в вычислительной среде операции вычисления значения логической функции от  $k$ -переменных и операцию определения количества единиц в двоичном векторе.

Вычисление логической функции от  $k$ -переменных выполняется в два этапа. На первом этапе выполняется формирование древовидной схемы вычисления реализуемой функции алгебры логики путем настройки аппаратной среды соответствующих процессорных модулей вычислительной среды на реализацию операций логического умножения, сложения, операций коммутации каналов передачи данных. Настройка модуля ПМ на тот или иной тип операций обеспечивается установкой на их настроечных входах  $z_1$  и  $z_2$  следующих значений:

1	$z_1 = 0$ и $z_2 = 0$	$x^* = x, t^* = t$
2	$z_1 = 0$ и $z_2 = 1$	$x^* = x, t^* = 0$
3	$z_1 = 1$ и $z_2 = 0$	$x^* = 0, t^* = x \cdot t$
4	$z_1 = 1$ и $z_2 = 1$	$x^* = 0, t^* = x \vee t$

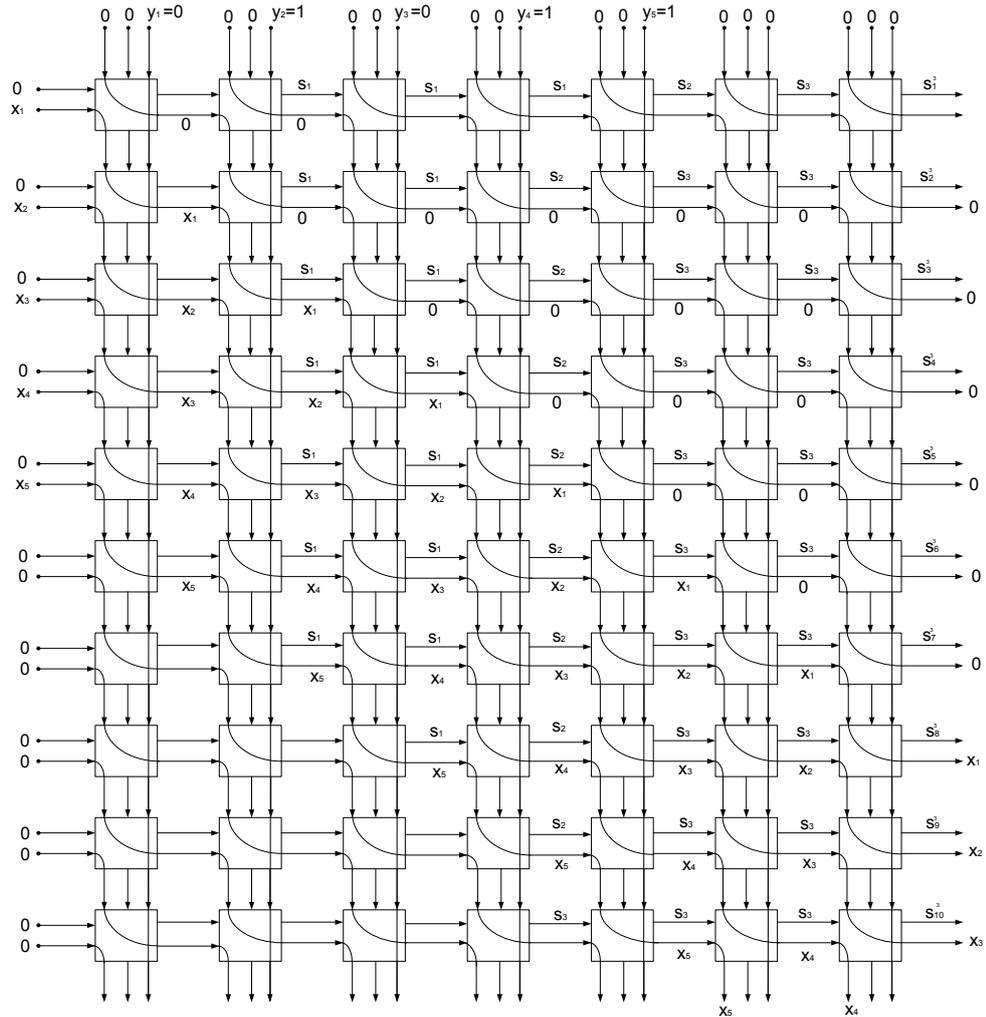


Рис. 4. Пример реализации операции арифметического умножения в ФБ

На втором этапе выполняются операции вычисления термов функции и ее значения. Для этого значения логических переменных в прямой и инверсной формах подаются на соответствующие входы вычислительной среды, являющиеся одновременно и входами комбинационной схемы вычисления функции, построенной на этапе настройки модулей ПМ. По окончании вычислений в модулях ПМ, входящих в состав древовидной схемы вычисления функции, на выходе информационной среды формируется значение логической функции.

Пример построения схемы вычисления логической функции вида

$$f = (x_1 \cdot x_2 \cdot t_6 \vee x_1 \cdot t_5 \cdot t_6 \vee x_3 \cdot x_4 \cdot t_3 \cdot t_4) \cdot (x_5 \cdot t_2)$$

в вычислительной среде из данных процессорных модулей показан на рис. 3.

При формировании на управляющем входе процессорного модуля сигнала  $k = 0$  обеспечивается реализация следующей системы функций алгебры логики:

1	$s^* = s \cdot \bar{y} \vee A \cdot y;$
2	$p^* = B \cdot y \vee p \cdot \bar{y};$
3	$x^* = t;$
4	$t^* = x;$
5	$y^* = y;$
6	$A = \bar{x} \cdot \bar{s} \cdot p \vee \bar{x} \cdot s \cdot \bar{p} \vee x \cdot \bar{s} \cdot \bar{p} \vee x \cdot s \cdot p;$
7	$B = \bar{x} \cdot s \cdot p \vee x \cdot \bar{s} \cdot p \vee x \cdot s \cdot \bar{p} \vee x \cdot \bar{s} \cdot p.$

Данная система функций описывает операции арифметического сложения, умножения и деления двоичных чисел.

Из предложенных вариантов арифметических операций рассмотрим арифметическое умножение двоичных чисел.

Арифметическое умножение двоичных чисел выполняется в вычислительной среде следующим образом. Множимое поразрядно подается на входы  $x_1, x_2, \dots, x_n$  процессорных модулей первого столбца, а разряды множителя устанавливаются на входы  $y_1, y_2, \dots, y_n$  процессорных модулей первой строки вычислительной среды. Причем на входе  $x$  первого модуля первого столбца устанавливается младший разряд множимого, а на входе  $y$  – младший разряд множителя. На остальные входы вычислительной среды устанавливаются значения сигналов, равные 0. Таким образом, на выходах  $s^*$  процессорных модулей столбцов, на входы  $y$  которых поступает разряд множителя, равный 0, формируется копия числа, установленная на входах  $s$ , а на выходах  $x^*$  – сдвинутая на один разряд копия числа, установленного на входах  $x$ . При установке на входах  $y$  процессорных модулей столбца единичного значения разряда множителя на выходах  $s^*$  формируется сумма значений данных, установленных на входах  $s$  и  $x$  модулей ПЭ, а на выходах  $x^*$  – сдвинутая на один разряд вниз копия числа, установленного на входах  $x$ . Пример выполнения операции умножения двух положительных двоичных чисел в вычислительной среде из данных процессорных модулей показан на рис. 4.

В данном случае множимое подается на группу входов  $X$ , а множитель – на группу входов  $Y$ . Результат операции умножения формируется на группе выходов  $S^*$  начиная с модуля первой строки. На соответствующих информационных выходах  $s^*$  ячеек первого столбца формируется первое частичное произведения, а на  $x^*$  – сдвинутая на один разряд копия множимого. На информационных выходах  $s^*$  ячеек второго столбца формируется второе частичное произведения, а на  $x^*$  – сдвинутая на два разряда копия множимого и т.д.

Описанные выше схемы дают возможность реализовать высокоскоростную конвейерно-параллельную систему обработки данных. Новизна блоков подтверждена патентами РФ [1, 2]. Функциональные блоки и процессорные модули прошли тестовую апробацию на базе ОКР ПНИЭИ «Трамплин С» [3] в качестве блоков специализированных устройств обработки данных. В качестве технологической базы для экспериментальной апробации VLIW процессора [4] выбраны ПЛИС фирмы XILINX [5].

#### Список литературы

1. Пат. РФ 2284568. Ячейка однородной вычислительной среды / Федюнин Р. Н., Князьков В. С. Опубл. 27.09.2006, Бюл. № 27.

2. Пат. РФ 2285285. Ячейка однородной среды / Федюнин Р. Н., Князьков В. С. Оpubл. 10.10.2006, Бюл. № 28.
3. **Федюнин, Р. Н.** Современные методы и способы реализации высокоскоростных вычислений / Р. Н. Федюнин // Системный анализ, управление и обработка информации. – 2006. – Спецвыпуск: Специальная техника средств связи. – С. 121–130.
4. URL: [www.transmeta.com](http://www.transmeta.com)
5. URL: [www.xilinx.com](http://www.xilinx.com)

### **References**

1. Pat. RF 2284568. *Yacheyka odnorodnoy vychislitel'noy sredy* [Homogeneous computer medium cell]. Fedyunin R. N., Knyaz'kov V. S. 27.09.2006, no. 27.
2. Pat. RF 2285285. *Yacheyka odnorodnoy sredy* [Homogeneous medium cell]. Fedyunin R. N., Knyaz'kov V. S. 10.10.2006, no. 28.
3. Fedyunin R. N. *Sistemnyy analiz, upravlenie i obrabotka informatsii* [System analysis, control and processing of data]. 2006, Spetsvypusk, pp. 121–130.
4. available at: [www.transmeta.com](http://www.transmeta.com)
5. available at: [www.xilinx.com](http://www.xilinx.com)

---

#### **Федюнин Роман Николаевич**

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра вычислительной техники,  
Пензенский государственный  
университет (г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: [frn\\_penza@mail.ru](mailto:frn_penza@mail.ru)

#### **Fedyunin Roman Nikolaevich**

Candidate of engineering sciences, associate  
professor, sub-department of computer  
science, Penza State University  
(Penza, 40 Krasnaya str.)

---

УДК 004.272.42

#### **Федюнин, Р. Н.**

**Способ реализации аппаратного слоя VLIW-архитектуры на базе систолических структур / Р. Н. Федюнин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 2 (26). – С. 15–22.**

*А. Г. Финогеев, М. В. Четвергова*

## **МЕТОДИКА РАСПОЗНАВАНИЯ ТОЧЕЧНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ НА ОСНОВЕ РАНДОМНЫХ ДЕРЕВЬЕВ В СИСТЕМАХ РАСШИРЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ**

*Аннотация.* Рассматривается технология распознавания особых точек изображений объектов, выделенных в видеоряде для мобильных систем расширенной реальности. Предложена методика определения и сопоставления дескрипторов особых точек на изображениях объектов с дальнейшей возможностью обучения подсистемы распознавания на основе использования леса рандомных деревьев. Проведено сравнительное исследование существующих методик распознавания точечных особенностей, таких как SIFT, SURF и RIFF, приведены их недостатки. С целью повышения качества методики распознавания объектов с выделенными точечными особенностями на мобильных устройствах предложена методика на основе леса рандомных деревьев. Основная идея методики заключается в распознавании объектов на базе статистики распределения классификатора Байеса о возможных сопоставлениях дескрипторов. Предложены две структуры леса рандомных деревьев: базовая и расширенная. Проведены сравнительные аналитические и экспериментальные исследования существующих и разработанной методик распознавания объектов по детектированным точечным особенностям на основе леса рандомных деревьев. Показано, что использование разработанной методики на базе рандомных деревьев дает лучшую оценку качества распознавания при более высоких требованиях к оперативной памяти и минимальном увеличении времени работы системы.

*Ключевые слова:* расширенная реальность, распознавание изображений, особые точки, точечная особенность, детектирование, дескриптор, рандомные деревья.

*А. Г. Finogeev, M. V. Chetvergova*

## **ALGORITHM SCENE RECOGNITION FOR AUGMENTED REALITY SYSTEMS**

*Abstract.* The article considers the technology of critical point recognition in object images taken from a video portion for a mobile system of augmented reality. The authors suggest of determining and matching the descriptors of critical points on the object images with further possibility of recognition system learning on the basis of using a forest of random trees. The study compares the existing methods point feature recognition, such as SIFT, SURF and RIFF, and describes their drawbacks. In order to increase the quality of the method of recognizing the objects with isolated point features on mobile devices the researchers suggest a method on the basis of a forest of random trees. The general idea of the method is recognition of objects on the basis of Bayes classifier distribution statistics on possible descriptors matching. There are two structures of random tree forests suggested: basic and augmented. The authors conducted comparative analytical and experimental research of the existing and the developed methods of object recognition with detected point features on the basis of a forest of random trees. It is shown that the application of the developed method on the basis of random trees lead to a better recognition quality value

in conditions of higher requirements to random-access memory and minimal increase of system work time.

*Key words:* augmented reality, scene recognition, point feature, special point, detecting, descriptor, random tree.

### Введение

На современном этапе развития информационно-вычислительных технологий особое место занимают программно-инструментальные средства автоматизированного создания систем виртуальной и расширенной реальности. Если компоненты системы виртуальной реальности предназначены для «погружения» пользователей в виртуальную среду, создаваемую компьютером, то компоненты расширенной реальности «искусственно» изменяют окружающий мир посредством композиции реальных и виртуально синтезированных виртуальных объектов.

Появление и распространение мобильных коммуникационных устройств с достаточно большой вычислительной мощностью процессоров и видеокамерами высокого разрешения позволило перейти к технологиям получения и обработки видеопотока с одновременным добавлением виртуальных текстовых и графических объектов на трехмерные сцены фактически в режиме реального времени. Это расширяет сферу применения методов искусственного интеллекта, технологий трехмерного моделирования в направлении создания новых принципов и интерфейсов человеко-машинного взаимодействия на основе технологии дополненной или расширенной реальности (augmented reality). Пользователь с ноутбуком, смартфоном или планшетом может непосредственно участвовать в процессе синтеза и визуализации виртуальных объектов расширенной реальности с возможностью встраивания в сцены реального мира и управления ими (рис. 1).

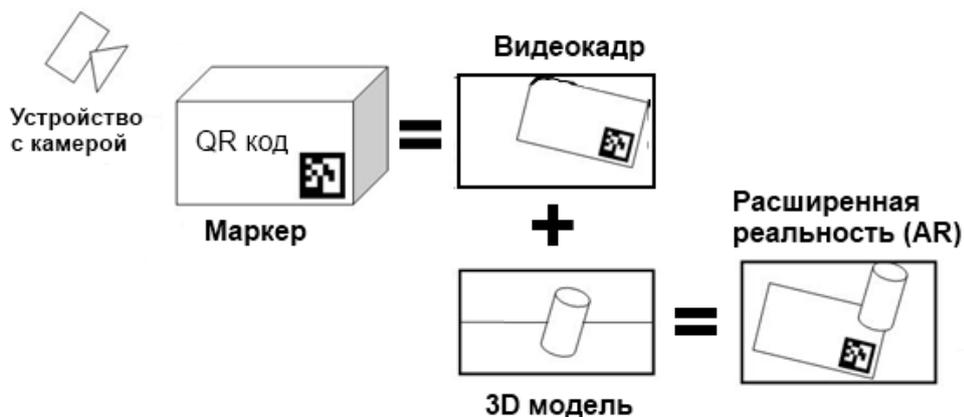


Рис. 1. Схема системы расширенной реальности

Появление новых аппаратных средств для синтеза и использования данных технологий выдвигает задачи разработки моделей и методов автоматизированного проектирования компонент систем расширенной реальности, способов их привязки к объектам реального мира, алгоритмов дистанционного управления виртуальными объектами с использованием возможностей беспроводной мобильной связи.

Согласно стандартам типовыми компонентами систем автоматизированного проектирования компонент расширенной реальности являются аппаратное, информационное, математическое и программное обеспечение.

Аппаратное обеспечение включает различную компьютерную технику с встроенной или подключаемой видеокамерой или мобильные средства связи с встроенной видеокамерой.

Информационное обеспечение включает библиотеки маркеров с их бинарными моделями, базу с шаблонами объектов распознавания, другие информационные ресурсы, включающие видеофайлы, 3D-модели виртуальных объектов и т.п. В качестве маркеров могут выступать искусственно созданные планарные изображения, 3D-модели или изображения частей реальных объектов (точечные особенности), которые могут служить точками привязки виртуальных объектов.

К математическому обеспечению относятся различные алгоритмы и методики получения и обработки входного видеосигнала, идентификации видеок кадров, определения положения камеры, а также оценка: пространственного расположения наблюдаемых объектов, распознавания точечных особенностей маркеров, изображений реальных объектов, сопоставления маркеров информационного объекта, синтеза виртуальных объектов, интеграции виртуальных и реальных объектов в сцены расширенной реальности и т.д.

Одной из сложных задач автоматизированного проектирования компонент расширенной реальности является выделение и распознавание в видеоряде частей объектов реальной сцены (точечных особенностей) с целью привязки к ним синтезированных виртуальных 3D-моделей.

### **1. Определение особых точек на изображениях объектов**

Для объединения виртуальных объектов и сцен реального окружения необходимо решение задачи выделения и распознавания элементов изображения в видеоряде, поступающем с камеры устройства. В общем случае решение задачи сводится к определению точечных особенностей на изображениях объектов реального мира в отдельных кадрах [1]. Вычислительные и коммуникационные возможности современных мобильных компьютерных устройств позволяют использовать более совершенные программные средства анализа изображений, что способствует развитию новых методов и алгоритмов решения задачи распознавания изображений в режиме реального времени. Несмотря на то, что создано достаточно большое количество методик и алгоритмов распознавания, потребность в разработке новых и модернизации старых методик остается, поскольку точность решения данных задач при анализе кадров видеоряда зависит от таких факторов, как условия освещения, сложность текстуры, движение, зашумленность, характеристики видеокамеры и т.п.

Так как поток видеок кадров содержит сложную структурированную информацию о наблюдаемой сцене, то требуется методика извлечения из потока видеоданных в режиме реального времени с камеры устройства, находящейся в движении, информации о точечных особенностях объектов, или методика извлечения из кадра изображения специального маркера, что позволит однозначно идентифицировать данный объект.

В процессе распознавания объектов сцены одной из значимых проблем остается задача сопоставления выделенного из фотоснимка или видеок кадра

изображения объекта с его эталонными образами, хранящимися в базе данных. Существующие средства распознавания изображений используют различные способы соотнесения объектов распознавания и их образов. Однако основной методикой решения задачи является установление соответствия между некоторым подмножеством особых точек изображения (точечных особенностей) и соответствующими подмножествами особых точек эталонных образов объекта распознавания.

Точечная особенность является точкой на изображении, которая имеет четко определенные позиции и может быть надежно обнаружена для последующей идентификации объекта наблюдения. Она должна иметь ряд признаков, существенно отличающих ее от множества соседних с ней точек изображения объекта. Это означает, что особая точка может представлять характерные области на изображениях, например, вершины геометрических фигур, края плоскостей, углы, небольшие окружности и круги, перепады яркости или контрастности, резкие цветовые переходы и т.п. Фактически она может быть изолированной точкой локального максимума или минимума линии интенсивности, точкой на кривой с максимальной локальной кривизной, т.е. представляет собой наиболее простой элемент дискретного представления функции описания объекта распознавания.

В общем случае методика сопоставления точечной особенности изображения  $(xL_1, yL_1)$  особым точкам эталона  $(xR_1, yR_1)$  включает следующие шаги:

- 1) обнаружение особых точек изображения  $(xL_1, yL_1)$ ;
- 2) составление описания особых точек (дескриптора точечной особенности);
- 3) обучение с заполнением «эталонной» базы точечных особенностей;
- 4) сопоставление точечных особенностей объектов на изображении точечным особенностям эталонов  $(xR_1, yR_1)$ ;
- 5) поиск связей или определение расстояний между дескрипторами особых точек на сравниваемых изображениях. Предполагается, что если расстояние между парами дескрипторов точечных особенностей в пространстве классификации меньше заданного предела, то между точечной особенностью изображения исходного объекта и выбранного эталона устанавливается связь с весовым коэффициентом, пропорциональным расстоянию между данными дескрипторами. В дальнейшем при идентификации объекта алгоритм в первую очередь проверяет подобные пары;
- 6) синтез модели преобразования изображений, с помощью которой из одного изображения можно получить другое.

Для определения особых точек будем использовать понятие окрестности. Тогда особой точкой изображения будем называть точку  $p_i$ , окрестность которой  $O(p_i)$  можно отличить от окрестности  $O'(p_j)$  любой другой особой точки изображения  $p_j$ . Процесс выделения этой точки на кадре называется *детектированием*, а программа, реализующая данную функцию, – *детектором*. В настоящее время создано достаточное количество детекторов особых точек с разными подходами к формированию пиксельной оценочной функции выделения точек.

Для реализации нашей методики был выбран детектор Ши-Томаси [2], который, в свою очередь, базируется на угловом детекторе Харриса [3] и учитывает аффинные искажения изображения окрестности особой точки.

## 2. Сравнительный анализ алгоритмов описания и сопоставления дескрипторов особых точек

Для каждой особой точки, найденной с помощью данного детектора, необходимо задать *вектор-дескриптор*, описывающий структуру окрестности точки, выделяющей ее из остального множества точек и инвариантный по отношению к аффинным преобразованиям изображения. Так распознавание происходит в процессе движения камеры по отношению к объектам видеосъемки.

В нашем случае дескриптор определяется как  $d_n = (f_{n,1}, \dots, f_{n,j})$ , где  $f_{n,j}$  – параметры, отвечающие условиям специфики, локальности, устойчивости, простоты вычислений и т.д. Множество дескрипторов особых точек определяет модель объекта на изображении, которая в дальнейшем используется для сопоставления объекта с его эталонными изображениями в базе данных. Решение о том, являются ли сопоставляемые изображения аналогами, принимается на основе анализа множества пар дескрипторов исходного объекта и его эталонных образов.

Сопоставление дескрипторов осуществляется в два этапа. На первом этапе в пространстве классификации выбирается множество пар наиболее близких дескрипторов. Степень близости рассчитывается как расстояние в пространстве изображений:

$$M = \sqrt{\sum (f(xL_1, yL_1) - f(xR_1, yR_1))^2}, \quad (1)$$

где  $(xL_1, yL_1)$ ,  $(xR_1, yR_1)$  – точечные особенности сравниваемых изображений.

На втором этапе отбираются пары наиболее близких дескрипторов и принимается решение о соответствии исходного изображения его образу путем сравнения расстояний относительно некоторого порогового значения.

В настоящее время существует ряд алгоритмов описания изображений по дескрипторам особых точек. К наиболее известным относятся:

1. Алгоритм SIFT (Scale Invariant Feature Transform) [4] – один из наиболее часто используемых алгоритмов описания дескрипторов особых точек. Дескрипторы, полученные с помощью алгоритма, инвариантны к масштабированию и поворотам изображения, устойчивы к изменениям освещения, шумам и изменениям позиции наблюдателя.

2. Алгоритм SURF (Speeded Up Robust Features) [5]. Методика основана на поиске особых точек и создании дескрипторов, инвариантных к масштабированию и вращению с помощью матрицы Гессе. При этом для каждой точки считается градиент максимального изменения яркости и коэффициент масштабирования по матрице Гессе.

3. Метод RIFF (Rotation Invariant Fast Features) [6]. В основу метода положено радиальное и тангенциальное разложение гистограмм градиента и последующая обработка по кольцам. Дескриптор также инвариантен к масштабированию, вращению и изменению освещенности.

Проведенные экспериментальные исследования данных подходов при анализе и идентификации элементов изображений, получаемых от 5-мегапиксельной камеры смартфона при движении наблюдателя и в условиях изменения освещенности в связи с погодными условиями, были определены основные недостатки данных методик.

Основными недостатками методов SIFT и SURF являются нечеткое выделение объекта относительно фона и низкий процент правильного распознавания элементов изображений объектов без ярко выраженной текстуры.

Метод RIFF также показал плохие результаты из-за размытия изображения вследствие движения наблюдателя с камерой относительно неподвижных объектов.

Поэтому для выделения особых точек и идентификации реального объекта в нашем случае разработана методика выделения особых точек с использованием случайных деревьев для подсистемы распознавания в структуре системы проектирования компонент расширенной реальности.

### 3. Методика распознавания объектов на базе случайных деревьев

Основная идея заключается в обучении подсистемы распознавания на базе статистики распределения возможных сопоставлений дескрипторов путем построения леса случайных деревьев. На этапе детектирования предполагаемая особая точка как бы «перебрасывается» по дереву решений (рис. 2), которое строится для каждого изображения распознаваемого объекта, снимаемого с разных ракурсов и при различных условиях. В каждом узле рассчитывается значение вероятности того, что особая точка относится к одной из определенных ранее.

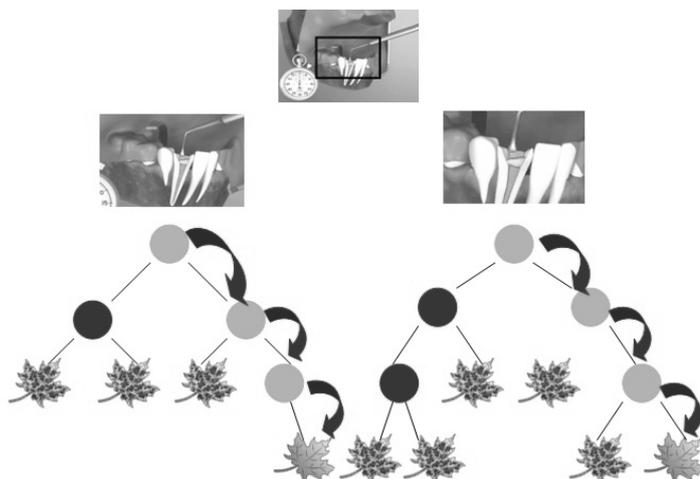


Рис. 2. Примеры случайных деревьев

Процесс выполняется для множества деревьев, причем итоговая вероятность накапливается по каждой предполагаемой гипотезе о принадлежности особой точки к множеству точечных особенностей эталонов распознаваемого объекта. Наибольшая вероятность покажет связь изображения исходного объекта с эталонными образцами.

Рассмотрим подробнее предлагаемую методику. В основе методики лежит идея классификатора Байеса. Она относится к классу алгоритмов выделения окрестности вокруг особой точки для ее фиксации на изображении объекта. Пусть  $(x, y)$  – координаты некоторой точки  $p_i$  на изображении объекта, при этом  $p_i \in \{P\}$ , где  $P$  – множество особых точек.

Пусть  $I(x_i, y_i)$  – цветовое значение пикселя в произвольной точке  $p_i(x_i, y_i)$ , причем  $0 \leq x_i < W_i$  и  $0 \leq y_i < H_i$ , где  $W_i$  и  $H_i$  соответственно ширина и высота изображения в пикселях.

Для снижения размерности изображение первоначально приводится к монотонному в соответствии со шкалой градаций серого. Для того чтобы определить и зафиксировать окрестность особой точки, необходимо ее исследовать по направлениям градиентов яркости. В работе [7] показано, что случайный выбор разностей градиентов яркости для произвольного окружения точки дает устойчивый результат.

Величина градиента вычисляется по формуле

$$G(x, y) = \sqrt{(I(x+1, y) - I(x-1, y))^2 + (I(x, y+1) - I(x, y-1))^2}. \quad (2)$$

Перед выбором подходящей разности необходимо определить множество векторов  $D_{xy}$ , каждый из которых представляет значения разностей для каждой точки  $p_i \in \{P\}$ .

Пусть  $T(D_{xy})$  – множество тестов для определения разности градиента на множестве точек  $P$ . Каждый тест возвращает битовое значение 0 или 1 при выполнении условия в первой  $p_1$  и второй  $p_2$  точках окрестности в каждом направлении:

$$T(D_{xy}) = \begin{cases} 0, & \text{если } I(D_{xy}^n(p_1)) < I(D_{xy}^n(p_2)), \\ 1, & \text{если } I(D_{xy}^n(p_1)) > I(D_{xy}^n(p_2)), \end{cases} \quad (3)$$

где  $n \in [0, D_{xy})$ .

Результатом выполнения множества тестов будет битональная маска направления градиентов вокруг особой точки. Маска представляет собой бинарное дерево решений, в котором каждый элемент множества  $D_{xy}$  рассматривается как узел дерева. Условие перехода «вправо» или «влево» определяется тем, какое значение возвращает тест  $T(D_{xy})$  при выполнении условия (3) в первой и второй точке окрестности  $p_i(x_i, y_i)$ .

Каждая вершина дерева является счетчиком. Переход по дереву решений происходит с увеличением счетчика на 1 согласно случайным разностям градиентов  $D_{xy}$ . В итоге после определения множества образов окрестности одной и той же особой точки для разных изображений одного объекта на множестве вершин дерева получим распределение вероятности соответствия исходного изображения его образу.

Перебор производится для всех деревьев в лесу, соответствующих множеству эталонных образов исходного объекта, а итоговая вероятность накапливается по каждому распознаванию. Максимум вероятности для множества деревьев показывает связь изображения контура исходного объекта и множества его образов, полученных на этапе обучения при различных условиях видеосъемки.

Таким образом, каждое дерево решений строится для сравнения исходного объекта с конкретным эталонным образом из базы данных и представляет собой лес решений для множества образов. В общем случае результатом построения леса является множество  $F$  деревьев с массивом  $P$  вершин раз-

мерностью  $2^{\{D_{xy}\}}$ , где хранятся вероятности распределения решений для конкретного дерева. Для снижения размерности и получения независимых результатов можно выбрать случайное подмножество деревьев  $F_i$ , которое будет включать в себя подмножество случайно выбранных  $D_{xy}$ .

#### **4. Обучение подсистемы распознавания на базе рандомных деревьев**

На этапе обучения для каждой гипотетической точки  $p^*$  найдем индекс вершины для каждого вектора  $D_{xy} \in F_i$ . Тогда  $P_a$  представляет подмножество особых точек, для которых рассчитывается итоговая вероятность по вершинам дерева для каждой новой точки из обучаемой коллекции. В итоге получим вероятность того, что выбранная точка  $p^*$  соответствует какой-либо точке  $p_i \in \{P\}$ , где  $P_a^i$  – вероятность;  $p^* = p^i$ . Пороговое число вероятностей соответствия, близких к 100 %, для множества особых точек изображения исходного объекта  $p_i^* = p_j^i$  подтвердит гипотезу, что данное изображение объекта соответствует некоторому эталонному образу, который есть в базе данных, и, следовательно, это изображение может считаться также образом объекта. Таким образом, после каждого правильного распознавания и в случае, если итоговая вероятность соответствия всех особых точек исходного объекта конкретному образу меньше 100 %, распознанный объект считается эталонным образом, полученным при новых условиях съемки, и может быть добавлен в базу данных, что и является обучением системы распознавания. При следующем распознавании для него строится новое дерево решений.

Однако при таком подходе всегда существует вероятность того, что множество особых точек изображения исходного объекта всегда будет показывать их соответствие множеству особых точек образов данного объекта из обучающей выборки. Поэтому необходимо выполнить соответствующую фильтрацию по заданному априори пороговому значению вероятности соответствия. Для определения гомографии между множествами особых точек изображений, соответствующих одной и той же точке трехмерного объекта, можно использовать метод RANSAC [8].

Поскольку на начальном этапе обучения отсутствует большое число образов окрестностей особых точек для множества изображений объекта, то следует синтезировать множество изображений объекта, применяя различные аффинные преобразования (масштабирование, перенос, поворот) и случайных набор шумов для искажения изображения.

#### **5. Экспериментальное исследование методики распознавания**

В результате экспериментального исследования предложенной методики установлено, что качество распознавания изображений объекта зависит от числа детектированных особых точек изображений  $(xL_1, yL_1)$ ,  $(xR_1, yR_1)$  и множества вершин (глубины) рандомного дерева. Было проведено исследование методики для числа особых точек изображения 200, 500, 1000 и для двух вариантов лесов рандомных деревьев:

1. Вариант RF (базовый) – для леса из 30 деревьев решений с глубиной 8 вершин.

2. Вариант RF (расширенный) – для леса из 30 деревьев решений с глубиной 12 вершин.

Также было проведено сравнение результатов распознавания с методами SURF и SIFT. Результаты сравнительного анализа приведены в табл. 1.

Таблица 1

Аналитическое сравнение результатов распознавания

Метод	Число точек	Качество распознавания, %	Объем требуемой памяти, Мб	Время сопоставления, с
SURF	200	74	0,05	~0,5–1
SIFT		63	0,98	~0,5–1
RF (base)		68	6,1	~0,4–0,8
RF (extended)		88	18,3	~0,8–1,2
SURF	500	76	0,86	~0,8–1,3
SIFT		78	0,93	~0,8–1,3
RF (base)		80	12,5	~1–1,5
RF (extended)		92	26,7	~1–2
SURF	1000	75	1,2	~1–1,2
SIFT		78	1,2	~1–1,3
RF (base)		82	25,6	~2
RF (extended)		94	56,9	~2

Таким образом, результаты сравнения наиболее часто используемых алгоритмов SIFT и SURF с предложенным подходом показывают, что использование методики распознавания на базе леса случайных деревьев дают лучшие оценки качества распознавания при более высоких требованиях к оперативной памяти и большем, но вполне приемлемом времени работы системы в зависимости от размерности дерева. Одним из основных отличий предложенной структуры системы распознавания на базе случайных деревьев является то, что методы SIFT и SURF являются запатентованными.

### Заключение

Результаты исследований методики распознавания с использованием случайных деревьев для системы проектирования компонент расширенной реальности демонстрируют допустимое качество работы даже на объектах с небольшим количеством особых точек. При этом на изображениях с достаточно большим количеством особых точек качество и время распознавания являются высокими, что позволяет использовать методику для систем, работающих в режиме реального времени и на мобильных устройствах. Однако большой объем оперативной памяти, затрачиваемой при работе алгоритма, является критичным для реализации алгоритма на мобильных устройствах.

### Список литературы

1. **Васильев, В. Н.** Математические методы и алгоритмическое обеспечение анализа и распознавания изображений в информационно-телекоммуникационных системах / В. Н. Васильев, И. П. Гуров, А. С. Потапов // Всероссийский конкурс обзорно-аналитических статей по приоритетному направлению «Информационно-телекоммуникационные системы». – URL: <http://www.itc.edu.ru/itkonkurs2008/>

2. **Shi, J.** Good features to track / J. Shi, T. Kanade // IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'94), IEEE Computer Society, Sietl. – 1994.
3. **Harris, C.** A combine corner and edge detector / C. Harris, M. Stephens // In Fourth Alvey Vision Conference. – Manchester, UK. – P. 147–151.
4. **Lowe, D. G.** Object Recognition from Local Scale-Invariant Features / David G. Lowe // Proceedings of the International Conference on Computer Vision. – 1999. – V. 2. – P. 1150–1157.
5. **Herbert, B.** SURF: Speeded Up Robust Features / B. Herbert, Andreas Ess, Tinne Tuytelaars, Luc Van Gool // Computer Vision and Image Understanding (CVIU). – 2008. – V. 110, № 3. – P. 346–359.
6. **Takacs, G.** Unified Real-Time Tracking and Recognition with Rotation-Invariant Fast Features / G. Takacs, V. Chandrasekhar, S. Tsai, D. Chen, R. Grzeszczuk, B. Girod. – URL: CVPR2010\_RIFF.pdf
7. **Calonder, M.** BRIEF: Binary Robust Independent Elementary Features / M. Calonder, V. Lepetit, P. Fua. – URL: <http://cvlab.epfl.ch/~lepetit/>
8. **Hartley, R.** Multiple View Geometry In Computer Vision / R. Hartley, A. Zisserman. – 2<sup>nd</sup> edition. – Cambridge : Cambridge University Press, 2003. – P. 670.

### **References**

1. Vasil'ev V. N., Gurov I. P., Potapov A. S. *Vserossiyskiy konkurs obzorno-analiticheskikh statey po prioritetnomu napravleniyu «Informatsionno-telekommunikatsionnye sistemy»* [All-Russia competition of reviewing and analytical articles on the top-priority research field “Information-telecommunication systems”]. available at: <http://www.itc.edu.ru/itkonkurs2008/>
2. Shi J., Kanade T. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'94)*, IEEE Computer Society, Sietl. 1994.
3. Harris C., Stephens M. *In Fourth Alvey Vision Conference*. Manchester, UK, pp. 147–151.
4. Lowe D. G. *Proceedings of the International Conference on Computer Vision*. 1999, vol. 2, pp. 1150–1157.
5. Herbert B., Ess Andreas, Tuytelaars Tinne, Luc Van Gool. *Computer Vision and Image Understanding (CVIU)*. 2008, vol. 110, no. 3, pp. 346–359.
6. Takacs G., Chandrasekhar V., Tsai S., Chen D., Grzeszczuk R., Girod B. *Unified Real-Time Tracking and Recognition with Rotation-Invariant Fast Features*. available at: CVPR2010\_RIFF.pdf
7. Calonder M., Lepetit V., Fua P. *BRIEF: Binary Robust Independent Elementary Features*. available at: <http://cvlab.epfl.ch/~lepetit/>
8. Hartley R., Zisserman A. *Multiple View Geometry In Computer Vision*. 2<sup>nd</sup> edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. p. 670.

---

**Финогеев Алексей Германович**  
доктор технических наук, профессор,  
кафедра систем автоматизированного  
проектирования, Пензенский  
государственный университет  
(г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: [finogeev@sura.ru](mailto:finogeev@sura.ru)

**Finogeev Aleksey Germanovich**  
Doctor of engineering sciences, professor,  
sub-department of CAD, Penza State  
University (Penza, 40 Krasnaya str.)

**Четвергова Мария Владимировна**  
аспирант, Пензенский государственный  
университет (г. Пенза, ул. Красная, 40)

**Chetvergova Mariya Vladimirovna**  
Postgraduate student, Penza State  
University (Penza, 40 Krasnaya str.)

E-mail: marysha85@inbox.ru

---

УДК 004.932:159.9

**Финогеев, А. Г.**

**Методика распознавания точечных особенностей на основе рандомных деревьев в системах расширенной реальности / А. Г. Финогеев, М. В. Четвергова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 2 (26). – С. 23–33.**

## АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ ОРГАНИЗАЦИИ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

*Аннотация.* Рассматриваются средства организации параллельных вычислений на ЭВМ. Приводятся отличия параллельной и конвейерной обработки данных. Содержится подробное описание способов обмена данными между параллельно выполняющимися задачами. Выделяется три основных способа межзадачного обмена данными: на основе разделяемой памяти, передача сообщений, механизма обещаний. Механизм разделяемой памяти крайне прост в реализации, обладает высоким быстродействием, но не лишен определенных проблем: состояний гонок и взаимоблокировок. Приводятся описания способов синхронизации параллельно выполняющихся задач: мьютексов, семафоров и различных видов мониторов. Следует заметить, что межзадачный обмен данными в большинстве промышленно применяемых средах программирования реализован именно этим способом. Описаны различные реализации межзадачного обмена данными на основе передачи сообщений. Как утверждают ранние исследователи данного механизма, он, скорее, базируется на физике, нежели на математической логике, теории множеств, алгебре и иных математических дисциплинах. Передача данных может осуществляться синхронно и асинхронно. Особое внимание уделено модели акторов как наиболее перспективному и глубоко теоретически и практически проработанному способу. Также приведено описание и других примеров организации межзадачного обмена на основе передачи сообщений: аморфные вычисления, программирование потоками данных и SOAP. Описаны два типа межзадачного обмена данными на основе механизма обещаний: явный и неявный. Для всех описываемых средств организации параллельных вычислений приведены примеры программных реализаций. Например, в pthreads – реализации многопоточной обработки для POSIX-совместимых операционных систем – используется разделяемая память, а в языке Erlang – модель акторов. Реализации механизма обещаний существуют для языков Java, LISP и Haskell. Делается вывод о том, что способ, которым организуются параллельные вычисления, следует выбирать исходя из следующих критериев: решаемой задачи, используемой среды программирования, возможности или невозможности совмещения сразу нескольких способов.

*Ключевые слова:* параллельные вычисления, процесс, поток, мьютекс, семафор, актор, конвейер.

*Yu. V. Snegirev, V. D. Tutarova*

## ANALYSIS OF PARALLEL COMPUTING ORGANIZATION MECHANISMS

*Abstract.* The article considers the means of parallel computing organization on a computer. It distinguishes parallel and pipeline data processing and describes in details the mechanisms of data exchange between concurrent run tasks. The authors point out three main methods of intertask data exchange: on the basis of shared memory; message passing; promise mechanisms. The mechanism of shared memory is very simple in realization, has a high speed of operation, however, features certain problems: race condition and deadlocks. The study describes the methods of con-

current run tasks synchronisation: mutexes, semaphores and various monitors. It should be noted that the intertask exchange of data in most of industrially implemented programming field is realized by this method. The article describes various realizations of intertask data exchange on the basis of message passing. According to opinion of the first researchers of this mechanism, it rather based on physics, than on mathematical logic, set theory, algebra and other mathematical disciplines. Data exchange may be carried out synchronously and asynchronously. Specific attention is paid to actor model as to the most promising and deeply theoretically and practically worked through method. The article also describes other examples of intertask exchange organization on the basis of message passing: amorphous computing, data flow programming and SOAP. The article describes two types of intertask data exchange on the basis of promise mechanism: explicit and implicit. For all the described means of parallel computing organization the authors adduce the examples of program realization. For example, in pthreads – realization of multithreading for POSIX-compatible operational systems – shared memory is commonly used, and in Erlang language – actor model. As for promise mechanism there are realizations for Java, LISP and Haskell. The researchers conclude that the method of parallel computing organization should be selected by the following criteria: the problem to be solved; the used programming environment; possibility or impossibility of combining several methods at once.

*Key words:* concurrent computing, process, thread, mutex, semaphore, actor, pipeline.

### **Введение**

На современной ЭВМ многие приложения используют параллельные вычисления, применение которых при создании и/или использовании программных продуктов открывает ряд преимуществ:

- параллельное выполнение участков кода увеличивает производительность приложений в целом;
- улучшение «отзывчивости» ввода/вывода;
- принципиальная возможность реализации классов задач, четко формулируемых в терминах параллельных вычислений.

В качестве недостатка можно указать, что использование параллельных вычислений сопряжено с трудностями, возникающими при синхронизации параллельно выполняющихся задач.

К сожалению, до настоящего момента в отечественной и зарубежной научной литературе информация о механизмах реализации параллельных вычислений весьма разрознена и изложена в недостаточном объеме.

Из вышесказанного вытекает актуальность рассмотрения вопросов организации параллельных вычислений при создании современных приложений как общего, так и научного назначения.

Целью данной работы является систематизация механизмов реализации параллельных вычислений, используемых при создании программных продуктов.

### **1. Основные понятия и разновидности способов параллельной обработки данных**

Несмотря на многообразие форм проявления параллелизма в архитектуре компьютеров, существует лишь два способа параллельной обработки данных: собственно параллельная и конвейерная обработка данных [1].

В данной работе речь пойдет в основном о параллельной обработке данных и механизмах ее реализации сравнительно высокого уровня. **Параллельная обработка данных** сводится к решению нескольких подзадач одновременно. Например, при решении дифференциального уравнения в частных производных с использованием явной разностной схемы значения в соседних точках сетки не зависят друг от друга и могут вычисляться одновременно.

**Конвейерная обработка данных** [1]. Все операции над вещественными числами в компьютере разделяются на последовательности микроопераций. Допустим, какая-то операция (назовем ее для определенности  $O$ ) включает пять таких микроопераций (назовем их  $O1...O5$ ). По условиям задачи требуется выполнить  $O$  над двумя векторами из ста чисел. Если организовать вычисление  $O$  таким образом, что после выполнения  $O1$  над первой парой чисел из векторов результат  $O1$  будет передан на вход  $O2$ , а  $O1$ , в свою очередь, начнет выполняться над следующей парой чисел и т.д., то такой способ обработки данных называется конвейерным.

**Способы передачи информации между параллельными вычислительными процессами.** Между параллельно работающими задачами практически всегда требуется передавать информацию. В большинстве систем организации параллельных вычислений эта задача возложена на программиста, но существуют механизмы, позволяющие скрыть взаимодействие параллельных компонентов от него (например, посредством так называемого механизма обещаний). Можно выделить два способа реализации явной передачи информации между параллельно выполняющимися задачами: взаимодействие посредством разделяемой памяти и взаимодействие посредством передачи сообщений.

## **2. Реализация явного обмена данными между параллельными задачами на основе механизма разделяемой памяти**

Данный способ межзадачного обмена данными появился исторически раньше всех остальных и вплоть до текущего момента является наиболее популярным. Для упрощения дальнейшего изложения материала будем считать понятия задачи и процесса тождественными. В контексте операционных систем это может быть не всегда верно, так как задачи в операционных системах могут быть представлены в форме процессов, потоков (*threads*) или волокон (*fibres*).

Реализация обмена данными параллельных задач на основе разделяемой памяти была впервые предложена Эдсгером Дейкстра, Пером Бринч Хансеном и Чарльзом Энтони Ричард Хоаром.

Хансен в [2] четко приводит классификацию концепций, которые легли в основу параллельных вычислений с обменом данными на основе разделяемой памяти (рис. 1).

Дейкстра в [3] выдвинул концепции абстрактных параллельных вычислений: «Мы оговорили, что процессы должны соединяться достаточно свободно (неплотно); под этим мы подразумеваем, что кроме (редких) моментов принудительного обмена данными отдельные процессы следует считать независимыми друг от друга.



Рис. 1. Классификация концепций Хансена

В особенности мы не позволяем делать предположения об относительной скорости выполнения разных процессов. Также Дейкстра вводит понятие критических секций – участков кода, которые одновременно может исполнять только один процесс.

Следует отметить особую важность этого понятия. Представим, что в ходе вычислений между несколькими процессами разделяется некоторая переменная. Один процесс, считав ее значение, производит на основе его некоторые вычисления. При отсутствии критической секции другой процесс может изменить это значение во время работы первого, вызвав тем самым искажение данных. Классическим примером, иллюстрирующим данную проблему, является пример с операциями над банковским счетом. Допустим, все операции происходят без блокировки. Таким образом, в системе зачисление и списание средств со счета может происходить одновременно. Данная проблема получила название «состояние гонки».

В качестве реализации механизма критических секций Дейкстра предложил концепцию семафоров. Это такие сущности вычислительной системы с параллельными процессами, в которых имеется некоторый счетчик задач, вошедших в критическую секцию. Как только этот счетчик достигает нуля, новые задачи, пытающиеся войти в критическую секцию, «засыпают».

В работе [4] Дейкстра подробно объясняет теорию «слоеной» архитектуры многозадачных систем, доказывает корректность критических секций и реализации ограниченного буфера через семафоры. Здесь же он ставит и решает задачу планирования, которую он назвал задачей об обедающих философах, иллюстрирующую опасности взаимоблокировок и неправильного планирования исполнения. Впоследствии эта задача стала классической в курсе теории вычислительных процессов.

Хансен разработал расширенную версию языка программирования Паскаль (названную *Concurrent Pascal*) [5], в которой ввел концепции параллельных процессов и мониторов. Независимо от него концепцию мониторов также разработал Хоар.

Монитор представляет собой расширенный вариант критической секции. Необходимость в мониторах появляется в ситуации, когда простого взаимного исключения недостаточно. Очень часто задачам требуется ожидать наступления некоторого события перед тем, как они могут предпринять некоторое действие. В такой ситуации не всегда возможно обойтись «занятым ожиданием» (*busy wait*), так как задача, ожидающая наступления события, находится в критической секции, а значит, никакая другая задача не может исполнять этот же код, что может быть крайне нежелательно. Сложившуюся проблему можно разрешить, используя механизм, называемый «переменная типа условие» (*condition variable*). Концептуально механизм представляет собой очередь задач, связанных с монитором, в которой задачи могут ждать, пока некоторое условие не станет истинным.

Хоар и Хансен предложили применять блокирующиеся условные переменные. Мониторы, использующие блокирующиеся условные переменные, часто называют мониторами Хоара. Бур и Ховард предложили применять неблокирующиеся условные переменные. Такие мониторы стали называть мониторами с семантикой *Mesa* [6].

Создатели языка программирования *Java* реализовали еще один вид мониторов, который можно назвать мониторами с неявной условной переменной [7].

Поясним механизмы работы каждого из этих видов мониторов. Введем некоторые обозначения. Обозначим через  $P$  условие, при истинности которого задача продолжает выполняться. С ним связана условная переменная  $c$ . Таким образом,  $Pc$  – утверждение истинности условия  $P$  через переменную  $c$ .

Условные переменные поддерживают две основные операции:

– ожидание (*wait*, в нашем случае – *wait c*) – операция, иницируемая задачей, которой требуется проверка  $Pc$ . Пока задача ожидает наступления  $Pc$ , она не занимает монитор;

– уведомление (*signal*, в нашем случае – *signal c*) – операция, иницируемая задачей, чтобы уведомить других об истинности  $Pc$ .

Поясним работу монитора Хоара. Пусть  $e$  – очередь задач, вошедших в монитор;  $s$  – очередь задач, которые выполнили операцию уведомления. Для каждой условной переменной  $c$   $s.c$  – очередь задач, ожидающих на этой условной переменной (т.е. ожидающих истинности  $Pc$ ).

Поясним работу монитора с семантикой *Mesa*. Так как здесь используется неблокирующаяся условная переменная, операция уведомления не приводит к тому, что задача, из которой она была запущена, теряет блокировку монитора. Вместо этого такая задача перемещается в очередь  $s$ . Соответственно отпадает необходимость в очереди  $s$ . Отметим, что англоязычное название операции уведомления в этом случае заменяется на *notify*. Также появляется операция *notify all* (уведомить всех). Операции над монитором Хоара и *Mesa*-монитором представлены в табл. 1.

Наконец, поясним поведение мониторов в *Java* (заметим, что такой же подход применяется и в языке *C#*). Здесь опускается операция уведомления. Когда какая-либо задача покидает монитор (завершаясь или ожидая освобождения), условия продолжения выполнения всех остальных задач вычисляются заново, пока не будет найдено истинное. В таких системах отпадает потребность в использовании явной условной переменной, однако условия продолжения выполнения должны быть явно закодированы.

Псевдокод операций над мониторами

Операция	Монитор Хоара	Mesa-монитор
Вход в монитор	войти в метод; если монитор заблокирован: добавить текущую задачу в $e$ ; заблокировать текущую задачу; иначе: заблокировать монитор	войти в метод; если монитор заблокирован: добавить текущую задачу в $e$ ; заблокировать текущую задачу; иначе: заблокировать монитор;
Выход из монитора	планирование; выйти из метода	планирование; выйти из метода
Ожидание на $c$	добавить текущую задачу в $c.q$ ; планирование; заблокировать текущую задачу	добавить текущую задачу в $c.q$ ; планирование; заблокировать текущую задачу
Уведомление задачи, ожидающей на $c$	если $c.q$ не пуста: выбрать и извлечь из $c.q$ одну задачу $t$ (такая задача называется уведомленной); добавить $t$ в очередь $s$ ; запустить $t$ заново; (таким образом, $t$ следующей заблокирует монитор) заблокировать текущую задачу	если $c.q$ не пуста: выбрать и удалить задачу $t$ из $c.q$ ; поместить $t$ в $e$
Уведомление всех задач, ожидающих на $c$	отсутствует	переместить все задачи из $c.q$ в $e$
Планирование	если $s$ не пуста: выбрать и извлечь из $s$ одну задачу, запустить ее заново (эта задача следующей заблокирует монитор); иначе, если $e$ не пуста: выбрать и извлечь из $e$ одну задачу, запустить ее заново (эта задача следующей заблокирует монитор); иначе: разблокировать монитор	если $e$ не пуста: выбрать и удалить одну задачу из $e$ и запустить ее заново; иначе: разблокировать монитор;

### 3. Реализация явного обмена данными между параллельными задачами на основе механизма передачи сообщений

Реализации такой модели межзадачного обмена разнообразны, поэтому рассмотрим лишь получившие наибольшее развитие. Но прежде следует пояснить основные положения этого способа межзадачного обмена данными.

В рамках этой модели процессы могут отправлять и принимать сообщения, представляющие собой массивы байт (пустые или непустые), сложные структуры данных или фрагменты кода. Процессы могут синхронизироваться, ожидая получения сообщения.

Передача сообщений может быть синхронной и асинхронной. При синхронной передаче процесс, отправивший сообщение, не продолжает работу, пока процесс, которому было отправлено сообщение, не получит его. При асинхронной передаче сообщений система доставляет сообщение получателю и не ждет, пока тот будет готов получить сообщение.

Синхронная передача сообщений обладает следующими преимуществами:

- простота системы, так как создается точка синхронизации между получателем и отправителем;
- отсутствует потребность в буферизации.

Асинхронная передача сообщений, в свою очередь, позволяет получателю и отправителю выполняться независимо, не ожидая друг друга. Буферизация при асинхронной передаче сообщений может повлечь определенные проблемы, так как сложно определить поведение системы при переполнении буфера.

Наиболее распространенными реализациями систем межзадачного обмена данными на основе обмена сообщениями являются:

- модель акторов;
- аморфные вычисления;
- программирование потоком данных;
- *SOAP*.

**Модель акторов.** Впервые модель акторов упоминается в [8]. Согласно Хьюту, в отличие от всех остальных моделей вычислений, модель акторов базируется на физике, а не на математической логике, теории множеств, алгебре и прочих математических дисциплинах. Ученый утверждает, что из всех разделов физики наибольшее влияние на модель оказали квантовая физика и теория относительности.

Затем Ирен Гриф разработала операционную семантику модели акторов как часть своей диссертации. Далее Хьюит совместно с другими авторами опубликовала несколько аксиоматических законов модели акторов.

В основе модели акторов лежит утверждение о том, что все элементы системы являются акторами. Это утверждение во многом сходно со стратегией объектно-ориентированного подхода («все элементы системы – объекты»), но различается в том, что объектно-ориентированное программное обеспечение очень часто не предполагает параллелизма, тогда как в модель акторов он заложен изначально.

Актор – сущность в вычислительной системе, которая в ответ на получение сообщения может:

- отправить конечное число сообщений другим акторам;
- создать конечное число новых акторов;
- определить свое поведение при получении следующего сообщения.

Ослабление связи отправителя с сообщением стало фундаментальным преимуществом модели акторов, позволяя осуществлять асинхронную передачу сообщений.

Получатели сообщений идентифицируются при помощи некоторого адреса, иногда называемого «почтовым адресом». Таким образом, актор мо-

жет общаться только с теми акторами, адреса которых ему известны. Определить адреса отправителей он может из полученных сообщений; адреса порождаемых им самим акторов ему известны.

В целом модель акторов характеризуется:

- изначальной ориентированностью на многозадачность;
- динамическим созданием акторов;
- включением адресов акторов в сообщения;
- общением между акторами при помощи асинхронной передачи сообщений, порядок получения которых не определен.

**Аморфные вычисления.** Этот термин [9] применим к системам, в состав которых входит большое число одинаковых, параллельных процессов, у каждого из которых ограничена вычислительная мощность и возможности взаимодействия с окружающими.

Примеры естественно происходящих аморфных вычислений можно встретить во многих областях науки, например, в молекулярной биологии, нейронных сетях и химической технологии (неравновесные системы). Изучение аморфных вычислений ведется безотносительно к физической среде, в которой они происходят (например, биологической, электронной и др.). Во главу угла ставится представление аморфных вычислений как абстракций с целью понять аморфные процессы, происходящие в природе и при разработке искусственных систем. Поэтому термин «устройство» в данном контексте не следует понимать буквально: устройством может быть как параллельно выполняющаяся задача, так и клетка организма.

Аморфные вычисления обладают следующими свойствами:

- они реализуются на большом количестве потенциально нестабильных устройствах с высокой степенью параллелизации;
- у этих устройств ограниченная память и вычислительный потенциал;
- устройства работают асинхронно;
- они не имеют априорной информации о своем положении;
- общение между ними локализовано;
- они проявляют недетерминированное или самоорганизующееся поведение (состояний устройств значительно больше, чем самих устройств);
- они отказоустойчивы, особенно в связи с неправильно работающим устройством или неверной последовательностью смены состояний.

В силу новизны подхода упоминание о реальных прототипах вычислительных систем, построенных на основе этой модели, нам найти не удалось.

**Программирование потоками данных** – это парадигма программирования, в рамках которой программа определяется как сеть процессов «черных ящиков», обменивающихся сообщениями по заранее определенным соединениям, задаваемым процессам извне. Эти процессы могут соединяться бесконечным числом способов для создания новых программ без изменения внутреннего поведения самих процессов. Таким образом, программирование потоками данных является изначально компонентно-ориентированным.

Эту парадигму впервые предложил Моррисон. Подробно она описана в [10]. Моррисон предполагал, что упомянутые выше процессы будут выполняться параллельно и время их жизни совпадает со временем жизни системы.

Этот подход был реализован в нескольких коммерческих продуктах и подходит, скорее, для прототипирования, нежели для реализации приложений.

**SOAP** (простой протокол обмена сообщениями – *Simple Object Access Protocol*) – это спецификация протокола обмена структурированной информацией между веб-сервисами в компьютерных сетях. Он использует *XML* в качестве формата сообщений и протоколы *HTTP* и *SMTP* для их передачи. *SOAP* был разработан в 1998 г. в *Microsoft*, но затем стал общедоступным стандартом.

Для данной работы *SOAP* представляет интерес лишь в той мере, что сервисы, поддерживающие *SOAP*, могут быть реализованы на любых языках программирования, у которых есть возможность генерации *XML*-документов и передачи для транспортировки посредством *HTTP* или *SMTP*. То есть *SOAP* значительно лучше унифицирован, чем другие методы межзадачного обмена данными посредством передачи сообщений.

#### **4. Реализация межзадачного обмена данными на основе механизма обещаний**

Этот метод межзадачного обмена данными отличается от описанных ранее тем, что обмен данными между параллельно выполняющимися задачами оказывается скрыт от программиста. Соответственно отпадает необходимость в использовании механизмов синхронизации (как в случае разделяемой памяти) или передачи сообщений.

Обещания также носят название сделок (*futures*) и задержек (*delays*). Они выступают в качестве временного хранилища изначально неизвестного результата в силу того, что он еще не вычислен. Этот механизм был предложен коллективом авторов [11].

Различают явные и неявные обещания. При использовании неявных обещаний этот временный объект просто получает свое значение так, как если бы он был обыкновенной ссылкой. Для получения значения явного обещания требуется вызвать функцию, возвращающую это значение. Явные обещания могут быть реализованы посредством библиотеки, тогда как неявные должны быть встроены в язык. В силу особенностей реализации механизм обещаний в данный момент обладает сравнительно невысоким быстродействием.

#### **Заключение**

Параллельные вычисления на основе разделяемой памяти обладают высоким быстродействием, но при синхронизации параллельно выполняющихся задач могут возникать проблемы, что может отрицательно сказаться на отказоустойчивости таких систем.

Параллельные вычисления на основе механизма передачи сообщений обладают в целом сравнимым быстродействием, повышенной отказоустойчивостью по сравнению с разделяемой памятью, но также не лишены недостатков. Главным из них, на наш взгляд, является недостаточная на данный момент теоретическая проработка, что сказывается на малом количестве реализаций. Лишена этого недостатка лишь модель акторов, но и ее реализации жестко привязаны к конкретным языкам, что может создавать неудобства в решении определенного круга задач.

Параллельные вычисления на основе механизма обещаний на данный момент обладают сравнительно низким быстродействием и в целом недоста-

точно распространены. Но полное отсутствие необходимости какой-либо синхронизации параллельно выполняющихся задач делает их пригодными для реализации определенного круга приложений.

В целом, несмотря на достаточное разнообразие средств реализации параллельных вычислений, выбор конкретного механизма для использования обусловлен задачей, которую предстоит решить.

В таких языках, как *C*, *C++*, многозадачность на основе разделяемой памяти реализуется посредством внешних библиотек (например, *pthread*, *OpenMP*). В *Java* механизмы синхронизации встроены в объекты, но механизмы многозадачности (потoki) содержатся в стандартной библиотеке. То же относится и к языку *C#* и платформе *.Net*.

Одним из наиболее успешных языков, реализующих модель акторов, является *Erlang*.

Механизмы обещаний реализованы в качестве внешних библиотек для таких языков, как *LISP*, *Haskell*, *Java* и *C++* (планируется включить реализацию механизма обещаний в стандартную библиотеку).

Таким образом, выбор конкретного механизма средств реализации параллельных вычислений зависит от типа задачи, которую предстоит реализовать при создании программного продукта. Наличие четкой классификации таких механизмов позволяет выбрать наиболее подходящий для решения конкретной задачи или же, в определенных случаях, совместить сразу несколько (например, при разработке распределенной системы на языке *Java* внутри отдельных узлов применить параллельные вычисления с разделяемой памятью, а обмен данными между узлами организовать по протоколу *SOAP*).

#### Список литературы

1. **Воеводин, В. В.** Параллельные вычисления / В. В. Воеводин, Вл. В. Воеводин. – СПб. : БХВ-Петербург, 2002. – 608 с.
2. **Per Brinch Hansen.** The Invention of Concurrent Programming / Per Brinch Hansen. – New York : Springer Verlag, 2001.
3. **Dijkstra, E. W.** Cooperating sequential processes Technological University / E. W. Dijkstra. – Eindhoven, The Netherlands, 1965.
4. **Dijkstra, E. W.** Hierarchical Ordering of Sequential Processes / E. W. Dijkstra. – Eindhoven. – The Netherlands Technological University, 1971.
5. **Per Brinch Hansen.** The Architecture of Concurrent Programs / Per Brinch Hansen. – New Jersey, Prentice Hall, 1997.
6. **Buhr, P. A.** Monitor classification / P. A. Buhr, M. Frontier // Dept. of Computer Science, University of Waterloo. – Waterloo, Ontario, Canada, 1995.
7. **Horstmann, C. S.** Core Java Volume I. Fundamentals / C. S. Horstmann, G. Cornell. – New Jersey, Prentice Hall, 2007.
8. **Hewitt, C.** A Universal Modular Actor Formalism for Artificial Intelligence / Carl Hewitt, Peter Bishop, Richard Steiger. – IJCAI, 1973.
9. Communications of the ACM / Harold Abelson, Thomas F. Knight, Gerald Jay Sussman, and friends Amorphous Computing. May 2000. – URL: <http://www.swiss.ai.mit.edu/projects/amorphous/cacm-2000.html>.
10. **Morrison, J. Paul.** Flow-Based Programming / J. Paul Morrison // A New Approach to Application Development. – 2nd Edition. – New Jersey, CreateSpace, 2010.
11. **Friedman, D.** The Impact of Applicative Programming on Multiprocessing / Daniel Friedman, David Wise. – International Conference on Parallel Processing, 1976. – P. 263–272.

**References**

1. Voevodin V. V., Voevodin V. V. *Parallel'nye vychisleniya* [Parallel computing]. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg, 2002, 608 p.
2. Per Brinch Hansen. *The Invention of Concurrent Programming*. New York: Springer Verlag, 2001.
3. Dijkstra E. W. *Cooperating sequential processes* Technological University. Eindhoven, The Netherlands, 1965.
4. Dijkstra E. W. *Hierarchical Ordering of Sequential Processes*. Eindhoven. The Netherlands. Technological University, 1971.
5. Per Brinch Hansen. *The Architecture of Concurrent Programs*. New Jersey, Prentice Hall, 1997.
6. Buhr P. A. Frontier M. *Dept. of Computer Science, University of Waterloo*. Waterloo, Ontario, Canada, 1995.
7. Horstmann C. S., Cornell G. *Core Java Volume I. Fundamentals*. New Jersey, Prentice Hall, 2007.
8. Hewitt C. Bishop Peter, Steiger Richard *A Universal Modular Actor Formalism for Artificial Intelligence*. IJCAI, 1973.
9. Harold Abelson, Thomas F. Knight, Gerald Jay Sussman, and friends *Amorphous Computing*. Communications of the ACM, May 2000. available at: <http://www.swiss.ai.mit.edu/projects/amorphous/cacm-2000.html>.
10. Morrison J. Paul *A New Approach to Application Development. 2nd edition*. New Jersey, CreateSpace, 2010.
11. Friedman D., Wise D. *International Conference on Parallel Processing*, 1976, pp. 263–272.

---

**Снегирев Юрий Владимирович**

аспирант, Магнитогорский  
государственный технический  
университет (г. Магнитогорск,  
пр. Ленина, 38)

E-mail: [y.v.snegirev@gmail.ru](mailto:y.v.snegirev@gmail.ru)

**Snegirev Yuriy Vladimirovich**

Postgraduate student, Magnitogorsk  
State Technical University  
(Magnitogorsk, 38 Lenin Avenue)

**Тутарова Власти Диляуровна**

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра вычислительной техники  
и прикладной математики,  
Магнитогорский государственный  
технический университет  
(г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38)

E-mail: [y.v.snegirev@gmail.ru](mailto:y.v.snegirev@gmail.ru)

**Tutarova Vlasta Dilyaurovna**

Candidate of engineering sciences, associate  
professor, sub-department of computer  
science and applied mathematics,  
Magnitogorsk State Technical University  
(Magnitogorsk, 38 Lenin Avenue)

---

УДК 004.424

**Снегирев, Ю. В.**

**Анализ механизмов организации параллельных вычислений /**  
Ю. В. Снегирев, В. Д. Тутарова // Известия высших учебных заведений. По-  
волжский регион. Технические науки. – 2013. – № 2 (26). – С. 34–44.

**ОПЕРАЦИОННАЯ СЕМАНТИКА  
ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ БЛОКОВ IEC 61499  
(ЧАСТЬ 2. ЦИКЛИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЫПОЛНЕНИЯ)<sup>1</sup>**

*Аннотация.* Международный стандарт IEC 61499 в области промышленной автоматизации вводит класс систем управления нового поколения, которые характеризуются как разумные реконфигурируемые распределенные компонентно-базированные системы. Стандарт IEC 61499 поддерживает парадигму проектирования на основе функциональных блоков (ФБ). Одной из наиболее важных моделей выполнения ФБ является циклическая модель. Отсутствие точно определенной формальной семантики для циклической модели выполнения может негативно отразиться на качестве проектируемого управляющего программного обеспечения, в частности, это может затруднить проведение верификации и имитационного моделирования систем автоматизации. В работе предлагается синтактико-семантическая модель функциональных блоков стандарта IEC 61499, действующих в соответствии с циклической моделью выполнения. Определяется общая структура модели, а также работа каждого из модулей. Кроме того, рассматривается формальная модель системной конфигурации и метод ее развертывания, позволяющие понять правила образования систем ФБ на ресурсах и устройствах. Для определения операционной семантики ФБ используется формальная нотация, основанная на модифицированных машинах абстрактных состояний. При этом формальная модель системы ФБ определяет как схему модели, представляющую набор переменных и набор функций для определения значений переменных, так и динамику модели в виде правил изменения этих функций. Особое внимание уделено функционированию составных ФБ и диспетчера, а также взаимосвязи между модулями модели на уровне переменных. Модуль диспетчера определяет порядок запуска ФБ на выполнение и, таким образом, в основном определяет модель выполнения ФБ. Изменение диспетчера автоматически приводит к смене модели выполнения, что позволяет легко изменять семантику ФБ в целом.

*Ключевые слова:* функциональный блок, стандарт IEC 61499, операционная семантика, абстрактный синтаксис, циклическая модель выполнения, конфигурация.

V. N. Dubinin

**AN OPERATIONAL SEMANTICS OF IEC 61499  
FUNCTION BLOCKS (PART 2. CYCLIC EXECUTION MODEL)**

*Abstract.* The international standard IEC 61499 in the field of industrial automation introduces a class of the new generation control systems which are characterized as smart reconfigurable distributed component-based ones. This standard supports the design paradigm based on the function blocks (FB). One of the most important FB execution model is the cyclic execution model. The lack of a clearly defined formal semantics for this model can negatively impact on the quality of designed control software, in particular, it may hinder the verification and simulation of automation

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

systems. In this paper a syntactic-semantic model of IEC 61499 function blocks working in accordance with the cyclic execution model is proposed. The complete structure of the model and the functioning of each module are defined. Besides, a formal model of the system configuration and its unfolding algorithm making it possible to understand the rules of FB systems building on resources and devices are considered. For the definition of operational semantics of FB the author uses a formal notation based on modified abstract state machine. At that, the formal model of FB defines both a model's scheme, representing a set of variables and a set of functions for changing variables' values, and the dynamics of the model in the form of rules for changing these functions. The special attention is paid to the functioning of modules of composite FB and dispatcher as well as the interconnection between the modules at the variables level. The dispatcher module determines a start order for the execution of FB and thus mainly defines a FB execution model. A change of the dispatcher automatically alters the FB execution model, thus this makes it easy to change the FB semantics in general.

*Key words:* function block, standard IEC 61499, operational semantics, abstract syntax, cyclic execution model, configuration.

### **Введение**

Международный стандарт IEC 61499 в области промышленной автоматизации вводит класс систем управления нового поколения [1]. Это разумные реконфигурируемые распределенные компонентно-базированные системы. Стандарт IEC 61499 поддерживает парадигму проектирования на основе функциональных блоков (ФБ). Эта парадигма вобрала в себя черты компонентного, объектноориентированного и автоматного подходов к проектированию и программированию сложных управляющих систем.

Стандарт IEC 61499 определяет абстрактную модель ФБ, допускающую различные интерпретации. Для того чтобы поведение приложения было полностью определено, необходимо задать так называемую *модель выполнения* ФБ – набор правил, регламентирующих порядок выполнения сети ФБ на ресурсе и устройстве. Модель выполнения должна по максимуму перевести недетерминированную по своей природе модель ФБ в плоскость детерминизма. Было предложено несколько моделей выполнения ФБ, среди которых циклическая, синхронная (параллельная), последовательная и *NPMTR*-модель [2].

Циклическая модель выполнения является одной из трех моделей, предложенных консорциумом O3NEIDA для стандартизации [3]. Она также является единственной моделью, принятой в широко известной системе программирования ПЛК *ISaGRAF* [4]. Суть циклической модели выполнения ФБ заключается в том, что ФБ выполняются последовательно друг за другом в заранее определенном порядке. Существует несколько вариантов циклической модели, например, в зависимости от того, учитывается ли при запуске ФБ наличие сигналов на его входах.

До настоящего времени не разработано общепринятой формальной семантики ФБ. Краткий обзор работ по этому направлению можно найти в работе [5], где предлагается так называемая модульная формальная модель операционной семантики ФБ (ФМОСФБ), представляющая модифицированную машину абстрактных состояний (МАС), которая используется в дальнейшем в качестве формальной нотации. При этом формальная модель системы ФБ

определяет как схему модели, представляющую набор переменных и набор функций для изменения значений переменных, так и динамику модели в виде правил изменения этих функций. С помощью ФМОСФБ определены: 1) операционная семантика ФБ, функционирующих в рамках модели выполнения на основе последовательной гипотезы [6] и двухтактной синхронной модели выполнения [7, 8]; 2) операционная семантика базисных ФБ [9], пригодная для многих моделей выполнения. В работе [10] предлагается подход к определению операционной семантики ФБ, основанной на системах переходов состояний (СПС), для циклической модели выполнения. Недостатком данного подхода является семантический разрыв между иерархическим модульным представлением систем ФБ и «плоским» представлением СПС.

В данной работе предлагается операционная семантика ФБ, функционирующих в соответствии с *циклической моделью* выполнения, основанная на использовании нотации ФМОСФБ.

### 1. Системная конфигурация

Конфигурация системы  $s$  (далее просто система  $s$ ) в стандарте ИЕС 61499 определяется следующим кортежем:

$$s = (D, DT, dtype, RT, FBT, SAT, A, fbmap, SG, rmap),$$

где  $D = \{d_1, d_2, \dots, d_{N_D}\}$  – конечное непустое множество конфигураций устройств (далее просто устройств), входящих в систему  $s$ ;  $DT = \{dt_1, dt_2, \dots, dt_{N_{DT}}\}$  – конечное, возможно пустое, множество типов устройств, используемых в системе  $s$ ;  $dtype: D \rightarrow DT \cup \{none\}$  – функция, назначающая устройствам тип устройств;  $RT = \{rt_1, rt_2, \dots, rt_{N_{RT}}\}$  – конечное, возможно пустое, множество типов ресурсов, используемых в системе  $s$ ;  $FBT = \{fbt_1, fbt_2, \dots, fbt_{N_{FBT}}\}$  – конечное непустое множество типов ФБ, используемых в системе  $s$ ;  $SAT = \{sat_1, sat_2, \dots, sat_{N_{SAT}}\}$  – конечное, возможно пустое, множество типов субприложений, используемых в системе  $s$ ;  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_{N_A}\}$  – конечное, возможно пустое, множество приложений системы  $S$ ;  $fbmap: FB^A \rightarrow FB^S$  – отображение ФБ приложений на ФБ устройств и ресурсов. Здесь под  $FB^A$  понимаются все ФБ, входящие в состав приложений и всех (рекурсивно) вложенных в него субприложений;  $SG$  – множество сегментов локальной вычислительной сети (ЛВС), на которых выполняются приложения;  $rmap: RS \rightarrow SG$  – функция распределения ресурсов системы  $s$  по сегментам ЛВС. Если все ресурсы некоторого устройства относятся к одному и тому же сегменту, то считается, что все устройство в целом относится к этому сегменту.

Устройство  $d_i \in D$  определяется следующим образом:

$$d_i = (R^{d_i}, rtype^{d_i}, FBN^{d_i}),$$

где  $R^{d_i} = \{r_1^{d_i}, r_2^{d_i}, \dots, r_{N_{R^{d_i}}}^{d_i}\}$  – конечное непустое множество ресурсов, входящих в состав устройства  $d_i \in D$ ;  $rtype^{d_i}: R^{d_i} \rightarrow RT \cup \{none\}$  – функция,

ставящая в соответствие ресурсам устройства  $d_i \in D$  тип ресурса;  $FBN^{d_i}$  – сеть ФБ, размещенная на устройстве  $d_i \in D$ .

Тип устройства  $dt_j \in DT$  определяется практически так же, как и устройство:

$$dt_j = \left( R^{dt_j}, rtype^{dt_j}, FBN^{dt_j}, Par^{dt_j} \right).$$

В данном случае дополнительный компонент кортежа  $Par^{dt_j}$  определяет множество параметров типа устройства  $dt_j \in DT$ . Каждый параметр есть некоторая константа определенного типа, подаваемая на какой-либо информационный вход сети ФБ  $FBN^{dt_j}$ .

Ресурс  $r_i \in R$  определяется только своей сетью ФБ:

$$r_i = (FBN^{r_i}).$$

Тип ресурса  $rt_j \in RT$  задается двойкой:

$$rt_j = \left( FBN^{rt_j}, Par^{rt_j} \right),$$

где  $Par^{rt_j}$  – множество параметров типа ресурса  $rt_j \in RT$ .

Сеть ФБ  $FBN$  в общем виде определяется кортежем

$$FBN = (FB, fbtype, EvConn, DataConn),$$

где  $FB$  – непустое множество компонентных ФБ сети  $FBN$ ;  $fbtype: FB \rightarrow FBT$  – функция, назначающая компонентным ФБ тип ФБ;  $EvConn$  – непустое множество событийных связей сети ФБ  $FBN$ ;  $DataConn$  – непустое множество информационных связей сети ФБ  $FBN$ .

Все множество типов ФБ делится на три класса (сорта):

$$FBT = BFBT \cup CFBT \cup SIFBT; \quad BFBT \cap CFBT \cap SIFBT = \emptyset,$$

где  $BFBT$ ,  $CFBT$  и  $SIFBT$  – множества типов базисных, составных и сервисных интерфейсных ФБ соответственно.

## 2. Развертывание системной конфигурации

Изначально в соответствии со стандартом IEC 16499 система управления представляется в «свернутом» виде, скорее, на уровне типов, чем на уровне экземпляров. Для имитационного моделирования системы управления, ее исследования, а также интерпретации в режиме реального времени (для управления реальными объектами) требуется представление системы на уровне экземпляров. Назовем процесс перехода от системы типов к системе экземпляров в IEC 61499 *развертыванием* системной конфигурации. Развертывание системной конфигурации включает: 1) развертывание ресурсов и устройств; 2) развертывание ФБ-подобных элементов, под которыми будем понимать составные ФБ, субприложения, приложения, а также сетей ФБ, ис-

пользуемых на ресурсах и устройствах. Следует отметить, что эти два типа развертываний существенно различаются.

Общий алгоритм развертывания системной конфигурации:

```

procedure unfoldSys(s)
  do forall  $d_i \in D$ 
     $dt_j = dtype(d_i)$ 
     $R_{ext}^{d_i} = R^{d_i} \cup R^{dt_j}$ 
     $FBN_{ext}^{d_i} = FBN^{d_i} \cup FBN^{dt_j}$ 
    do forall  $r_k \in R_{ext}^{d_i}$ 
       $rt_m = rtype(r_k)$ 
       $FBN_{ext}^{r_k} = FBN^{r_k} \cup FBN^{rt_m}$ 
      unfoldFB(FBN_{ext}^{r_k})
    end forall
  end forall
end procedure
  
```

Здесь объекты с нижним индексом *ext* есть исходные объекты (без этого индекса), расширенные в результате развертывания. В соответствии с приведенным алгоритмом развертывание устройства сводится к «миграции» всех ресурсов из типа устройства в множество ресурсов собственно устройства, а также объединению сетей ФБ, определенных в устройстве и в соответствующем ему типе устройства. Развертывание ресурса включает только добавление сети ФБ, принадлежащей типу ресурса, к сети ФБ, расположенной на самом ресурсе. Дальнейший этап развертывания включает развертывание всех сетей ФБ, расположенных на ресурсах, а также развертывание приложений (если таковые имеются).

Развертывание ФБ, приложений и субприложений подробно рассмотрено в [11].

### 3. Функциональная структура операционной модели составного ФБ

На рис. 1 приведена функциональная структура операционной модели составных ФБ (а также субприложений) для циклической модели выполнения, реализованной с использованием иерархически связанных диспетчеров [5].

На рис. 1 используются следующие обозначения:  $bfb_1, \dots, bfb_n$  – модели базисных ФБ;  $cfb_1, \dots, cfb_m$  – модели составных ФБ;  $disp$  – модель диспетчера. Как видно, для удобства и наглядности модель диспетчера включена в состав модели ФБ. На рис. 1 приведены только те входы-выходы и связи, которые влияют на порядок выполнения ФБ.

В циклической модели выполнения (рис. 1) при получении ФБ стартового сигнала  $\alpha$  производятся следующие действия: 1) передвижение сигналов с входов модуля ФБ на входные переменные компонентных ФБ; 2) поочередный запуск всех компонентных ФБ диспетчером; 3) передвижение сигналов между компонентными ФБ и передача сигналов с выходов компонентных ФБ на выходы модуля ФБ; 4) формирование сигнала окончания  $\beta$ .

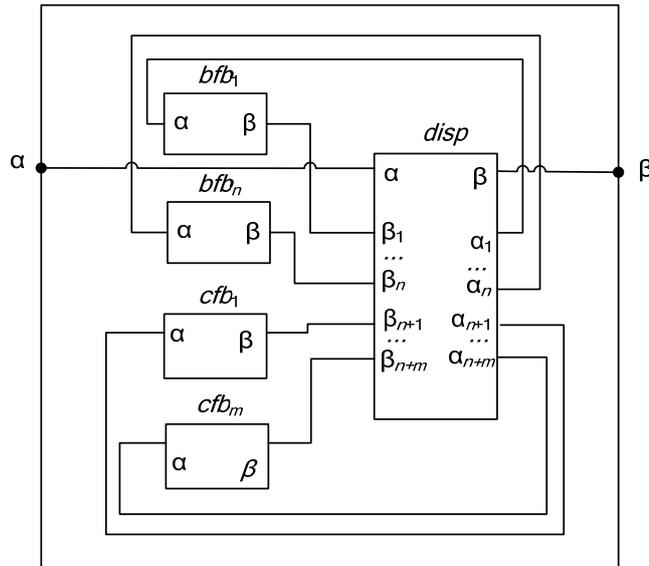


Рис. 1. Структура операционной модели составных ФБ для циклической модели выполнения

В предложенной модели организации вычислений с использованием иерархической системы диспетчеров в каждом составном ФБ порядок межуровневых передач можно варьировать, изменяя порядок выполнения действий на уровне модуля ФБ. Для того чтобы обеспечить «правильную» передачу сигналов с блоков верхнего уровня на блоки нижнего уровня и в обратную сторону, в каждом модуле ФБ необходимо производить передвижение сигналов с входов модуля в начале, а выдачу сигналов на выходы – в самом конце работы модуля.

#### 4. Модель составного функционального блока определения схемы модели

Модуль (или модель) составного ФБ (МСФБ) может быть представлена формально следующим образом:

$$M_C^C = (Synt_C, Sem_C^C),$$

где  $Synt_C$  – синтаксическая часть описания (на уровне абстрактного синтаксиса);  $Sem_C^C$  – семантическая часть описания.

Синтаксическая часть описания МСФБ определяется четверкой:

$$Synt_C = (Interface, FB, EvConn, DataConn),$$

где  $Interface$  – интерфейс составного ФБ (аналогичен интерфейсу базисного ФБ [9]);  $FB = \{fb_1, fb_2, \dots, fb_{N_{FB}}\}$  – множество компонентных ФБ, входящих в составной ФБ,  $fb_i = (Interface^i, fbt^i)$ ,  $i \in [1, N_{FB}]$ , где  $Interface^i = (EI^i, EO^i, VI^i, VO^i)$  – интерфейс компонентного ФБ. В данный интерфейс входят:  $EI^i$  и  $EO^i$  – множества входных и выходных событийных переменных;  $VI^i$  и  $VO^i$  – множества входных и выходных переменных  $i$ -го компонентного ФБ, соответственно;  $fbt^i$  – тип  $i$ -го компонентного ФБ.

$$EvConn \subseteq \left( EI \cup \bigcup_{i=1}^{N_{FB}} EO^i \right) \times \left( EO \cup \bigcup_{i=1}^{N_{FB}} EI^i \right) - \text{множество событийных}$$

связей;

$$DataConn \subseteq \left( VI \cup \bigcup_{i=1}^{N_{FB}} VO^i \right) \times \bigcup_{i=1}^{N_{FB}} VI^i \cup \bigcup_{i=1}^{N_{FB}} VO^i \times VO - \text{множество ин-}$$

формационных связей. Причем для информационных связей должно выполняться следующее условие:

$$\forall (p,t), (q,u) \in EvConn [(t = u) \rightarrow (p = q)].$$

Иными словами, к одному информационному входу нельзя подключить более одного информационного выхода. При использовании событийных связей подобных топологических ограничений на структуру не накладывается, поскольку подразумевается неявное использование блоков  $E\_SPLIT$  и  $E\_MERGE$  для расщепления и слияния событий соответственно.

Семантическая часть описания МСФБ определяется тройкой:

$$Sem_C^C = (VRT_C^C, T_C^C, D_C^C),$$

где  $VRT_C^C$  – набор переменных и условий времени выполнения составного ФБ;  $T_C^C$  – набор функций переходов МСФБ;  $D_C^C$  – диспетчер, определяющий порядок выполнения компонентных ФБ внутри родительского составного ФБ в соответствии с циклической моделью выполнения.

Набор переменных и условий времени выполнения определяется кортежем

$$VRT_C^C = (VIB, VOB, FBD^C, \omega, \alpha, \beta),$$

где  $VIB, VOB, \alpha, \beta$  имеют тот же смысл, что и в модуле базисного ФБ (МБФБ) [9];  $\omega \triangleq \bigwedge_{eo_j^k \in \bigcup_i EO_i} Z_{EO}(eo_j^k) \wedge \bigwedge_{ei_j \in EI} \overline{Z_{EI}(ei_j)}$  – условие окончания передач

сигналов в составном ФБ;  $FBD^C = \{ fbd_1, fbd_2, \dots, fbd_{N_{FB}} \}$  – множество дополнительных (семантических) описаний компонентных ФБ, входящих в состав составного ФБ;  $FB \leftrightarrow FBD^C, fbd_i = (\alpha_i, \beta_i)$ , где  $\alpha_i$  – переменная запуска  $i$ -го компонентного ФБ;  $\beta_i$  – переменная окончания работы  $i$ -го компонентного ФБ.

Набор функций переходов МСФБ определяется как

$$T_C = (t_{EI}, (t_{EI^i})_{i=1, N_{FB}}, (t_{EO^i})_{i=1, N_{FB}}, t_{EO}, t_{VI}, t_{VOB}),$$

где  $t_{EI^i} : [Z_\alpha] \times \left[ \bigcup_{i=1}^{N_{FB}} Z_{EO^i} \right] \times [Z_{EI}] \rightarrow [Z_{EI^i}]$  – функция установки входных событийных переменных  $i$ -го компонентного ФБ;  $t_{EI} : [Z_{EI}] \times [Z_\alpha] \rightarrow [Z_{EI}]$  – функция сброса входных событийных переменных модуля (в результате пе-

передачи сигналов);  $t_{EO^i} : [Z_{EO^i}] \rightarrow [Z_{EO^i}]$  – функция сброса выходных событийных переменных  $i$ -го компонентного ФБ;  $t_{EO} : \left[ \bigcup_{i=1}^{N_{FB}} Z_{EO^i} \right] \times [Z_{EI}] \rightarrow [Z_{EO}]$  – функция установки выходных событийных переменных модуля (в результате передачи сигналов на его выходы);  $t_{VI} : [Z_{\alpha}] \times [Z_{VIB}] \times [Z_{EI}] \rightarrow [Z_{VI}]$  – функция изменения входных переменных (в результате съема данных);  $t_{VOB} : \left[ \bigcup_{i=1}^{N_{FB}} Z_{VO^i} \right] \times [Z_{EI}] \times \left[ \bigcup_{i=1}^{N_{FB}} Z_{EO^i} \right] \rightarrow [Z_{VOB}]$  – функция изменения выходных буферов (в результате выдачи данных).

### Определение динамики модели

Ниже кратко представлены правила функционирования составного ФБ в рамках некоторой типичной последовательной модели выполнения, в которой выбор активного ФБ определяется как функция признаков завершения выполнения ФБ. К данному типу моделей выполнения относится, например, циклическая модель. При выполнении МСФБ будем считать, что все действия по передаче сигналов и данных между компонентными ФБ между собой, а также внешней средой производятся мгновенно, точнее – за один логический такт времени. В том числе одновременно производится съем данных в отношении тех событийных входов, на которых стоят сигналы. Это так называемый «синхронный съем данных». Таким образом, в отличие от базисного ФБ, в данном случае обрабатываются все входные сигналы. Тем не менее это не отвергает возможность использования других дисциплин выбора и обработки входных сигналов, в том числе приоритетных. Передача сигналов и данных на выходы ФБ в данном случае не требует наличия сигнала запуска  $\alpha$ . То есть здесь при передаче данных используется принцип «горячей картошки», в соответствии с которым сигналы передаются дальше сразу, как только они появляются. Следует, однако, заметить, что эти опции являются вариативной частью и могут изменяться от одной модели выполнения к другой. В то же время для передачи сигналов и данных с входов ФБ необходим сигнал запуска ФБ.

Функция передачи сигналов на входы  $j$ -го компонентного ФБ (функция  $t_{EI^j}$ ) может быть определена следующим образом:

$$\left\{ p_{EI^j}^{C,C,1}[k] : Z_{\alpha}(\alpha) \wedge \left( \bigvee_{\substack{ei_m \in EI, \\ (ei_m, ei_k^j) \in EvConn}} Z_{EI}(ei_m) \vee \bigvee_{\substack{eo_n^x \in EO^x, \\ (eo_n^x, ei_k^j) \in EvConn}} Z_{EO^x}(eo_n^{\delta}) \right) \Rightarrow \right. \\ \left. \Rightarrow Z_{EI^j}(ei_k^j) \leftarrow true \mid ei_k^j \in EI^j \right\}, \quad j = \overline{1, N_{FB}},$$

где  $ei_k^j$  –  $k$ -я входная событийная переменная  $j$ -го компонентного ФБ.

В соответствии с данным правилом входная событийная переменная компонентного ФБ устанавливается в единицу, если в единицу установлена

хотя бы одна событийная переменная, связанная с данной событийной переменной событийной связью.

Похожим образом может быть определена функция передачи сигналов на выходы МСФБ (функция  $t_{EO}$ ):

$$\{p_{EO}^{C,C,1}[k]: \bigvee_{\substack{ei_m \in EI, \\ (ei_m, eo_k) \in EvConn}} Z_{EI}(ei_m) \vee \bigvee_{\substack{eo_n^x \in EO^x, \\ (eo_n^x, eo_k) \in EvConn}} Z_{EO^x}(eo_n^x) \Rightarrow \\ \Rightarrow Z_{EO}(eo_k) \leftarrow true \mid eo_k \in EO\}.$$

Функция съема данных МСФБ (функция  $t_{VI}$ ) может быть реализована с помощью следующего семейства правил:

$$\{p_{VI}^{C,C,1}[m]: Z_{\alpha}(\alpha) \wedge \bigvee_{\substack{ei_k \in EI, \\ (ei_k, vi_m) \in IW}} Z_{EI}(ei_k) \Rightarrow Z_{VI}(vi_m) \leftarrow Z_{VIB}(vib_m) \mid vi_m \in VI\}.$$

Функция выдачи данных МСФБ (функция  $t_{VOB}$ ) может быть задана следующими правилами:

$$\{p_{VOB}^{C,C,1}[k]: \bigvee_{(eo_k, vob_m) \in OW} \left( \bigvee_{\substack{ei_j \in EI, \\ (ei_j, eo_k) \in EvConn}} Z_{EI}(ei_j) \vee \bigvee_{\substack{eo_n^x \in EO^x, \\ (eo_n^x, eo_k) \in EvConn}} Z_{EO^x}(eo_n^x) \right) \Rightarrow \\ \Rightarrow Z_{VOB}(vob_m) \leftarrow Z_{VO}(repr_{VO}(vo_m)) \mid vob_m \in VOB\}.$$

Здесь в качестве аргумента функции  $Z_{VO}$  используется не выходная переменная из множества  $VO$ , а ее представитель. Целью данной подмены является минимизация числа переменных без потери корректности, что подробнее объяснено ниже.

Функции сброса источников сигналов могут быть представлены следующими правилами:

$$\{p_{EI}^{C,C,1}[j]: Z_{\alpha}(\alpha) \wedge Z_{EI}(ei_j) \Rightarrow Z_{EI}(ei_j) \leftarrow false \mid ei_j \in EI\}; \\ \{p_{EO^j}^{C,C,1}[k]: Z_{EO^j}(eo_k^j) \Rightarrow Z_{EO^j}(eo_k^j) \leftarrow false \mid eo_k^j \in EO^j\}, j = \overline{1, N_{FB}}.$$

## 5. Модель диспетчера

Диспетчер для циклической модели выполнения в общем виде определяется в виде тройки:

$$D_C = (V_D^C, T_D^C, Z_D^{C,0}),$$

где  $V_D^C$  – множество переменных диспетчера;  $T_D^C$  – множество функций переходов диспетчера;  $Z_D^{C,0}$  – множество функций начальных значений переменных диспетчера. Предполагаем, что диспетчер выполняется синхронно с родительским ФБ.

Множество переменных «циклического» диспетчера определяется как

$$V_D^C = \left( \alpha, \beta, (\alpha_i)_{i=1, \overline{N_{NF}}}, (\beta_i)_{i=1, \overline{N_{FB}}} \right),$$

где  $\alpha$  – входная переменная запуска подсистемы (составного ФБ или субприложения) с верхнего уровня;  $\beta$  – выходная переменная окончания выполнения контролируемой сети ФБ;  $(\alpha_i)_{i=1, \overline{N_{NF}}}$  – выходные переменные запуска компонентных ФБ, входящих в контролируемую сеть ФБ;  $(\beta_i)_{i=1, \overline{N_{FB}}}$  – входные переменные окончания выполнения компонентных ФБ контролируемой сети ФБ.

Начальные значения всех переменных равны *false*.

Функции переходов циклического диспетчера определяются в виде кортежа  $T_D^C = (t_\alpha, t_\beta, (t_{\alpha_i})_{i=1, \overline{N_{NF}}}, (t_{\beta_i})_{i=1, \overline{N_{FB}}})$ , где  $t_\alpha : [Z_{\beta_{N_{FB}}}] \rightarrow [Z_\alpha]$  – функция сброса переменной запуска подсистемы;  $t_\beta : [Z_{\beta_{N_{FB}}}] \rightarrow [Z_\beta]$  – функция установки переменной окончания выполнения подсистемы;  $t_{\alpha_i} : [Z_\alpha] \rightarrow [Z_{\alpha_i}]$  и  $t_{\alpha_i} : [Z_{\beta_{i-1}}] \rightarrow [Z_{\alpha_i}]$ ,  $i = \overline{2, N_{FB}}$  – функции установки переменных  $\alpha_i$ ;  $t_{\beta_i} : [Z_{\beta_i}] \rightarrow [Z_{\beta_i}]$ ,  $i = \overline{1, N_{FB}}$  – функции сброса переменных  $\beta_i$ .

Функционирование циклического диспетчера промежуточного уровня определяется следующими правилами:

$$\begin{aligned} p_{\alpha_1}^{D,C,1} : Z_\alpha(\alpha) \Rightarrow Z_{\alpha_1}(\alpha_1) \leftarrow true; \\ \{p_{\alpha_i}^{D,C,2}[i] : Z_{\beta_{i-1}}(\beta_{i-1}) \Rightarrow Z_{\alpha_i}(\alpha_i) \leftarrow true \mid i = \overline{2, N_{FB}}\}; \\ \{p_{\beta_i}^{D,C,1}[i] : Z_{\beta_i}(\beta_i) \Rightarrow Z_{\beta_i}(\beta_i) \leftarrow false \mid i = \overline{1, N_{FB}}\}; \\ p_\beta^{D,C,1} : Z_{\beta_{N_{FB}}}(\beta_{N_{FB}}) \Rightarrow Z_\beta(\beta) \leftarrow true; \\ p_\alpha^{D,C,1} : Z_{\beta_{N_{FB}}}(\beta_{N_{FB}}) \Rightarrow Z_\alpha(\alpha) \leftarrow false. \end{aligned}$$

Следует отметить, что номер  $i$  определяет порядок выполнения ФБ, поэтому перед началом моделирования блоки должны быть упорядочены и им должны быть присвоены порядковые номера.

В отличие от диспетчера промежуточного уровня, диспетчер верхнего уровня является независимым от других диспетчеров. Как только будет выполнен последний ФБ в списке главного диспетчера, он приступает к выполнению первого блока этого списка. Данный процесс повторяется циклически. Модель главного диспетчера определяется аналогично модели диспетчера промежуточного уровня, но в ней отсутствуют переменные  $\alpha$  и  $\beta$ , а также функции их модификации.

Правила функционирования главного диспетчера включают правила  $p_{\alpha_i}^{D,C,2}[i]$ ,  $p_{\beta_i}^{D,C,1}[i]$ , а также правило

$$p_{\alpha_i}^{D,C,3} : Z_{\beta_{N_{FB}}} (\beta_{N_{FB}}) \Rightarrow Z_{\alpha_1} (\alpha_1) \leftarrow true .$$

### 6. Взаимосвязь модулей функциональных блоков

Взаимосвязь модулей ФБ осуществляется через общие (интерфейсные) переменные. Одна и та же переменная может использоваться как в родительском, так и в дочернем модуле. Однако локализация переменной должна быть только в одном модуле, за границами модуля эта же переменная будет использоваться в качестве параметра. Таким образом, для связи модулей используется механизм передачи параметров.

Важным элементом взаимодействия модулей является передача значений переменных, представляющих данные. При выборе оптимальной схемы буферирования можно минимизировать число межмодульных передач данных. При этом возможно избежать прямых передач данных между компонентными ФБ, а также между интерфейсом составного ФБ и компонентными ФБ. Для этого предлагается использовать в качестве точек буферирования переменные из множеств  $VO^i$  (для компонентных базисных и составных ФБ) и множества  $VI$  (для составных ФБ).

На рис. 2 схематично представлены основные переменные, используемые в МБФБ и МСФБ, а также их взаимосвязи. На рис. 2 сплошными окружностями обозначены реальные переменные, а пунктирными – параметры. Взаимосвязи реальных переменных и параметров показаны двунаправленными пунктирными стрелками, а передачи значений переменных – сплошными стрелками.

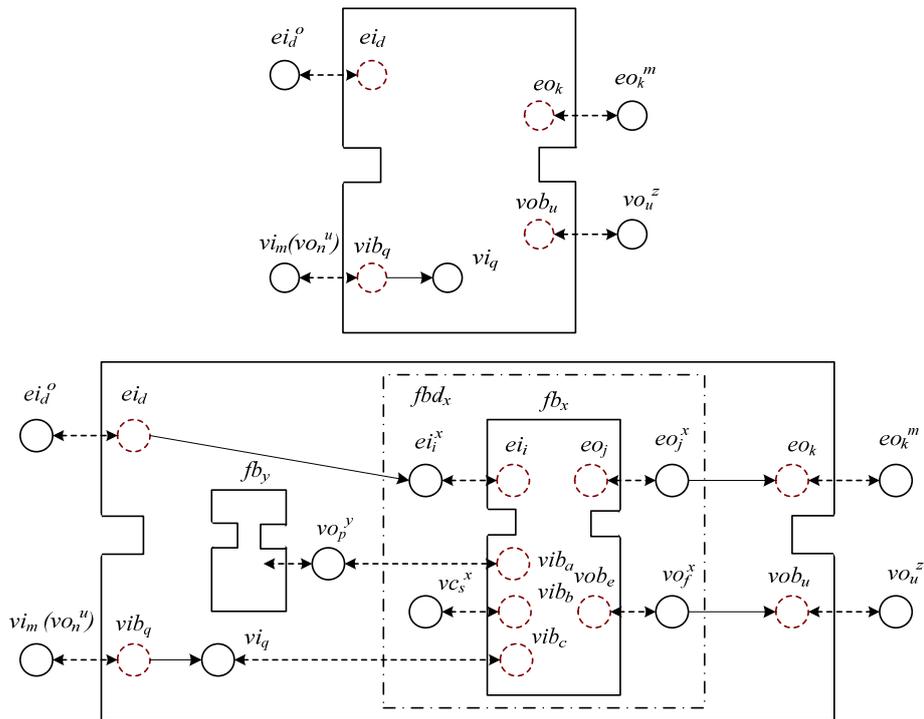


Рис. 2. Переменные МБФБ (сверху) МСФБ (снизу)

Для формального согласования работы МБФБ и МСФБ в принятой системе буферирования необходимо использовать операцию отождествления переменных, используемых в соседних модулях ФБ. Введем функцию  $repr_{VI}$ , позволяющую определить представителей входных переменных компонент-

ных ФБ в МСФБ:  $repr_{VI} : \bigcup_{i=1}^{N_{FB}} VI^i \rightarrow VI \cup \bigcup_{i=1}^{N_{FB}} VO^i$ . Как видно из описания,

входные переменные компонентных ФБ отождествляются с входными переменными самого составного ФБ или выходными переменными внутренних компонентных ФБ.

Введем функцию  $repr_{VO}$ , определяющую представителей выходных переменных МСФБ:  $repr_{VO} : VO \rightarrow \bigcup_{i=1}^{N_{FB}} VO^i$ . Выходные переменные составного

ФБ отождествляются с выходными переменными компонентных ФБ. Таким образом, физически выходные переменные составных ФБ не существуют.

Имеют место следующие взаимно однозначные соответствия между переменными  $i$ -го компонентного ФБ и соответствующего ему модуля  $x$ :

$$EI_i \leftrightarrow EF^x; EO_i \leftrightarrow EO^x; VO_i \leftrightarrow VOB^x; \bigcup_{vi \in VI_i} repr_{VI}(vi) \leftrightarrow VIB^x.$$

### Заключение

В данной работе рассмотрена формальная (на уровне абстрактного синтаксиса) модель системной конфигурации и алгоритм ее развертывания, позволяющие понять на системном уровне правила образования систем ФБ на ресурсах и устройствах, используемых в дальнейшем для интерпретации. Предложена синтактико-семантическая модель ФБ, функционирующих в рамках циклической модели выполнения, причем акцент сделан на работе составных ФБ и диспетчера, описывается взаимосвязь между модулями модели на уровне переменных. Модель базисного ФБ была представлена ранее в [9]. Успешный опыт использования нотации ФМОСФБ [6–9] позволяет рекомендовать ее в качестве унифицированного аппарата для описания операционной семантики ФБ.

### Список литературы

1. International Standard IEC 61499. Function blocks for industrial-process measurement and control systems. Part 1: Architecture // International Electrotechnical Commission. – Geneva, 2005. – 111 p.
2. **Vyatkin, V.** The IEC 61499 Standard and its Semantics / V. Vyatkin // IEEE Industrial Electronics Magazine – 2009. – V. 3, Issue 4. – P. 40–48.
3. IEC 61499 Compliance Profile: Execution Models of IEC 61499 Function Block Applications, draft in progress. URL: [http://www.ooneida.org/standards\\_development\\_Compliance\\_Profile.html](http://www.ooneida.org/standards_development_Compliance_Profile.html), 2009.
4. ICSTriplex ISaGRAF Workbench for IEC 61499/61131. – V. 6. – URL: <http://www.isagraf.com>.
5. **Вашкевич, Н. П.** Вопросы разработки операционной семантики функциональных блоков IEC 61499 / Н. П. Вашкевич, В. Н. Дубинин // Программные системы и вычислительные методы. – 2012. – № 1. – С. 10–16.

6. **Вашкевич, Н. П.** Формализованное описание последовательной модели выполнения функциональных блоков / Н. П. Вашкевич, В. Н. Дубинин, В. В. Вяткин // *Вычислительные системы и технологии обработки информации : межвуз. сб. науч. тр.* – Вып. 10. – Пенза, 2011. – С. 45–61.
7. **Дубинин, В. Н.** Операционная семантика синхронных функциональных блоков IEC 61499 на основе машин абстрактных состояний. Часть 1: Модель диспетчеров / В. Н. Дубинин, В. В. Вяткин // *XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего Плюс.* – Пенза, 2012. – Вып. 4. – С. 233–240.
8. **Дубинин, В. Н.** Операционная семантика синхронных функциональных блоков IEC 61499 на основе машин абстрактных состояний. Часть 2: Модели блоков и представление в SMV / В. Н. Дубинин, В. В. Вяткин // *Современные информационные технологии : тр. Междунар. науч.-техн. конф.* – Вып. 14. – Пенза, 2011. – С. 94–100.
9. **Дубинин, В. Н.** Операционная семантика функциональных блоков IEC 61499. (Часть 1. Модель базисного блока) / В. Н. Дубинин // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки.* – 2012. – № 4. – С. 37–48.
10. **Дубинин, В. Н.** Верификация приложений IEC 61499 на основе метода Model Checking / В. Н. Дубинин, В. В. Вяткин // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки.* – 2011. – № 3. – С. 44–55.
11. **Dubinin, V.** On Definition of a Formal Semantic Model for IEC 61499 Function Blocks / V. Dubinin, V. Vyatkin // *EURASIP Journal on Embedded Systems.* – 2008. – V. Article ID 426713. – P. 10.

### *References*

1. International Standard IEC 61499. Function blocks for industrial-process measurement and control systems. Part 1: Architecture. International Electrotechnical Commission. – Geneva, 2005, 111 p.
2. Vyatkin V. *IEEE Industrial Electronics Magazine.* 2009, vol. 3, Issue 4, pp. 40–48.
3. IEC 61499 Compliance Profile: Execution Models of IEC 61499 Function Block Applications, draft in progress. available at: [http://www.ooneida.org/standards\\_development\\_Compliance\\_Profile.html](http://www.ooneida.org/standards_development_Compliance_Profile.html), 2009.
4. ICSTriplex ISaGRAF Workbench for IEC 61499/61131. vol. 6. available at: <http://www.isagraf.com>.
5. Vashkevich N. P., Dubinin V. N. *Programmnye sistemy i vychislitel'nye metody* [Program systems and computing methods]. 2012, no. 1, pp. 10–16.
6. Vashkevich N. P., Dubinin V. N., Vyatkin V. V. *Vychislitel'nye sistemy i tekhnologii obrabotki informatsii: mezhvuz. sb. nauch. tr.* [Computing systems and technologies of data processing: interuniversity collected papers]. no. 10. Penza, 2011, pp. 45–61.
7. Dubinin V. N., Vyatkin V. V. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego Plyus* [21<sup>st</sup> century: achievements of the past and the problems of the present Plus]. no. 4. Penza, 2012, pp. 233–240.
8. Dubinin V. N., Vyatkin V. V. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii: tr. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Modern information technologies: proceedings of the International scientific-technological conference]. no. 14. Penza, 2011, pp. 94–100.
9. Dubinin V. N. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskije nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2012, no. 4, pp. 37–48.
10. Dubinin V. N., Vyatkin V. V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavdeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskije nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2011, no. 3, pp. 44–55.

11. Dubinin V., Vyatkin V. *EURASIP Journal on Embedded Systems*. 2008, vol. Article ID 426713, p. 10.

---

***Дубинин Виктор Николаевич***

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра вычислительной техники,  
Пензенский государственный  
университет (г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: victor\_n\_dubinin@yahoo.com

---

***Dubinin Viktor Nikolaevich***

Candidate of engineering sciences, associate  
professor, sub-department of computer  
science, Penza State University  
(Penza, 40 Krasnaya str.)

УДК 004.423 : 519.71

**Дубинин, В. Н.**

**Операционная семантика функциональных блоков ИЕС 61499  
(Часть 2. Циклическая модель выполнения) / В. Н. Дубинин // Известия  
высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. –  
2013. – № 2 (26). – С. 45–58.**

# ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

---

УДК 621.317.08

*И. Р. Добровинский, Ю. Т. Медведик, М. Ю. Медведик, В. С. Чапаев*

## ИЗМЕРЕНИЕ ИЗНОСА РЕЗЦА ВИБРОАКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ И МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВНУТРИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

*Аннотация.* Предлагается новый виброакустический метод измерения износа режущего инструмента с использованием трехтактного интегрирования для станков с числовым программным управлением. Виброакустическое устройство, основанное на этом методе, позволяет повысить точность измерения состояния режущей кромки инструмента за счет подавления помех двух некоррелированных между собой частот. Интегрирование производится за два равных первых такта, длительность которых кратна периоду первой сетевой помехи. Поэтому напряжение с частотой первой помехи  $\omega_{п1}$  в моменты окончания первых двух тактов будет полностью подавлено. При длительности интервала времени сдвига этих двух тактов, равном половине периода напряжения второй помехи частотой  $\omega_{п2}$  (вращения заготовки), к моменту окончания второго такта интегрирования будет подавлено и напряжение помехи этой частоты. В течение третьего такта интегрирования происходит разряд конденсатора обратной связи интегратора напряжением опорного источника. Это реализует преобразование «напряжение – время». Заполняя интервал времени третьего такта импульсами образцовой частоты  $T_0$ , получим цифровой эквивалент  $N_x$  напряжения состояния режущей кромки инструмента. Возможность измерения износа инструмента виброакустическим методом подтверждена экспериментальными исследованиями и математическим моделированием акустических полей острого и изношенного резца.

*Ключевые слова:* измерение износа режущего инструмента виброакустическим методом, математическое моделирование, интегральное уравнение, субиерархический метод.

*I. R. Dobrovinskiy, Yu. T. Medvedik, M. Yu. Medvedik, V. S. Chapaev*

## CUTTER WEAR ESTIMATION BY VIBROACUSTIC METHOD AND SIMULATION OF ACOUSTIC FIELD INTENSITY INSIDE THE CUTTING TOOL

*Abstract.* The researchers suggest a new vibroacoustic method for measuring the wear of cutting tools using three-stroke integration for machine tools with computer numerical control (CNC). Double glazing vibroacoustic device improves the accuracy of the tool's cutting edge by suppressing two uncorrelated to each other noise

frequencies. The integration is performed over two equal first strokes, the time period of which is multiple of the first power line disturbance. Therefore, the voltage with the frequency of the first disturbance  $\omega_p1$  in the moments after the first two strokes will be completely suppressed. Having the length of the interval of shift time of two strokes being half the voltage period of the second disturbance frequency  $\omega_p2$  (workpiece rotation), by the end of the second measure of integration the disturbance voltage frequency will be suppressed as well. During the third stroke there occurs the discharge of the feedback capacitor of the integrator by the voltage from the reference source. It fulfils the “voltage-time” conversion. By filling the interval of a third stroke with pulses of exemplary frequency  $T_0$ , we obtain the digital equivalent of  $N_x$  voltage of the tool’s cutting edge state. The possibility of instrument wear estimation by the vibroacoustic method is proved experimentally and by mathematical modeling of acoustic fields of a sharp or worn cutter.

*Key words:* measurement of cutting tool wear, mathematic modeling, three-stroke integration, subhierarchic method.

### Введение

Использование виброакустических методов измерения состояния режущей кромки инструмента в процессе точения возможно только при выделении полезного вибросигнала резания на фоне значительного уровня помех, вызванных вибрациями системы станок-приспособление – инструмент – деталь, изменением в пределах скольжения скорости вращения асинхронного привода станка, некруглостью и неоднородностью материала заготовки [1]. Точность измерения износа режущего инструмента может быть повышена за счет разделения напряжений вибраций станка и инструмента, раздельного их измерения и компенсации напряжений помех. Эти задачи невозможно решить без использования современных средств измерений, таких как интегрирование, синхронизация и др.

Однако для рационального использования современной датчиковой аппаратуры и средств измерений вибросигнала необходимо математическое моделирование картины акустического поля в теле резца в процессе резания. Такое математическое моделирование в первую очередь должно подтвердить существование зависимости между состоянием режущей кромки инструмента и картиной напряженности акустического поля под датчиком вибраций, т.е. ответить, возможно ли в принципе вести виброакустический контроль состояния режущей кромки инструмента на различных режимах резания и при обработке различных материалов.

### 1. Математическое моделирование

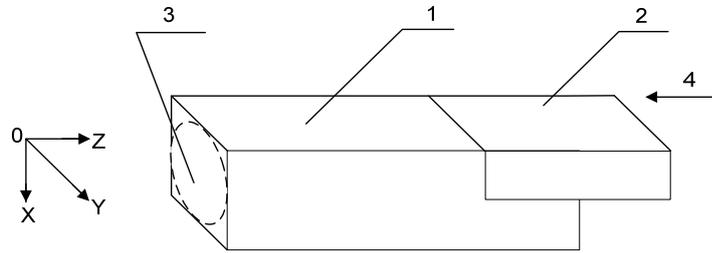
В качестве объекта моделирования был выбран резец, со стальной державкой 1 и твердосплавной режущей кромкой 2, представленный на рис. 1,а, указано место крепления датчика вибросигнала 3, направление виброакустического воздействия на резец в момент резания 4. Для акустического моделирования выбрана акустическая волна длиной, равной размеру резца.

Рассмотрим задачу дифракции акустической волны на теле  $Q$  (резец с твердосплавной режущей кромкой), расположенном в свободном пространстве  $R^3$ .

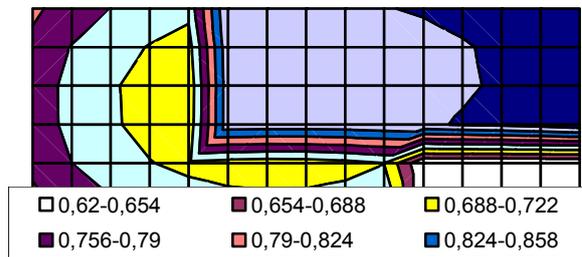
Пусть дано неоднородное уравнение Гельмгольца:

$$\Delta u + k^2(x)u = f(x), \quad (1)$$

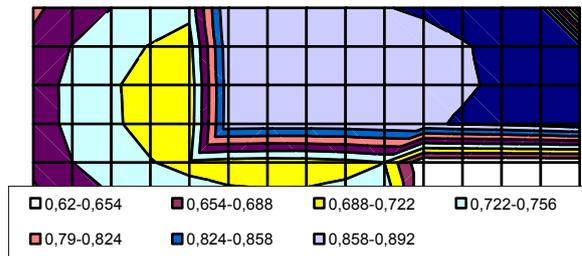
где  $f(x)$  – известная функция с компактным носителем;  $k^2(x)$  – непрерывная функция.



a)



b)



c)

Рис. 1. Резец с твдосплавной режущей кромкой (a); картина напряженности акустического поля в целом твдосплавном резце (X–Z) (b); картина напряженности акустического поля в изношенном твдосплавном резце (X–Z) (c)

Будем предполагать, что на границе раздела двух сред выполняются условия сопряжения

$$[u]_{\partial Q} = 0, \quad \left[ \frac{\partial u}{\partial n} \right]_{\partial Q} = 0 \quad (2)$$

и условия излучения Зоммерфельда

$$\frac{\partial u}{\partial r} = iku + o\left(\frac{1}{r}\right), \quad r := |x| \rightarrow \infty. \quad (3)$$

После ряда преобразований задача в строгой математической постановке сводится к интегральному уравнению Липпмана – Швингера [3–7]:

$$u(x) = f^0(x) + \int_Q G(x,y)(k_0^2 - k^2(y))u(y)dy. \quad (4)$$

Используя метод Галеркина, численно решаем задачу распространения акустического поля внутри неоднородной фигуры простой геометрической формы (резец с твердосплавной режущей кромкой). Используя субиерархический метод [2–6], построим решение поставленной задачи на фигуре, представленной на рис. 1,а. Вопросы сходимости метода, единственности, разрешимости рассмотрены в [3–7].

Для моделирования напряженности акустического поля в различных плоскостях тела резца был разработан пакет программ для анализа напряженности акустического поля в средах различной плотности.

Результаты моделирования представлены на рис. 1,б,в и рис. 2,а,б. Значения модулей акустического поля под датчиком вибраций для целого резца приведены в табл. 1, а для изношенного резца – в табл. 2.

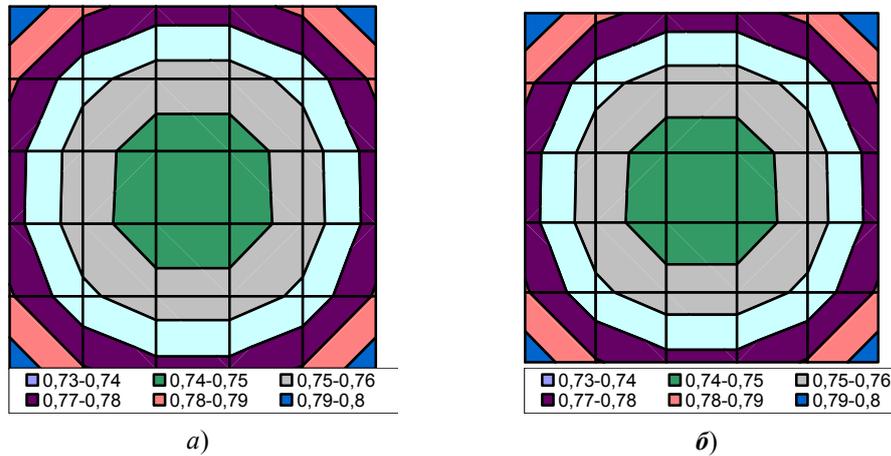


Рис. 2. Картина напряженности акустического поля в теле целого твердосплавного резца под датчиком вибраций (X–Y) (а); картина напряженности акустического поля в теле изношенного твердосплавного резца под датчиком вибраций (X–Y) (б)

Таблица 1

Нормированные значения модулей акустического поля под датчиком вибраций для целого резца (Z = 0)

X\Y		Координаты разбиения по оси Y					
		Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	Y <sub>5</sub>	Y <sub>6</sub>
Координаты разбиения по оси X	X <sub>1</sub>	0,79677	0,78117	0,77414	0,77455	0,78235	0,79864
	X <sub>2</sub>	0,7808	0,7622	0,75388	0,7543	0,76343	0,78276
	X <sub>3</sub>	0,77338	0,75347	0,74452	0,74495	0,75474	0,77538
	X <sub>4</sub>	0,77338	0,75347	0,74452	0,74495	0,75474	0,77538
	X <sub>5</sub>	0,7808	0,7622	0,75388	0,7543	0,76343	0,78276
	X <sub>6</sub>	0,79677	0,78117	0,77414	0,77455	0,78235	0,79864

Таблица 2

Нормированные значения модулей акустического поля под датчиком вибраций для изношенного резца ( $Z = 0$ )

XY		Координаты разбиения по оси Y					
		$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$Y_5$	$Y_6$
Координаты разбиения по оси X	$X_1$	0,7969	0,78129	0,77426	0,77466	0,78246	0,79875
	$X_2$	0,78092	0,76231	0,754	0,75441	0,76354	0,78287
	$X_3$	0,77349	0,75359	0,74463	0,74506	0,75484	0,77549
	$X_4$	0,77349	0,75358	0,74462	0,74505	0,75484	0,77548
	$X_5$	0,78091	0,7623	0,75399	0,75441	0,76353	0,78286
	$X_6$	0,79688	0,78128	0,77425	0,77465	0,78245	0,79874

Результаты моделирования картины напряженности акустического поля в теле резца позволили определиться с расположением датчика вибраций на инструменте, а также создать устройство, использующее виброакустический метод измерения износа режущей кромки инструмента.

## 2. Разработка метода трехтактного последовательного интегрирования для виброакустического устройства измерения износа инструмента

В виброакустическом устройстве измерения состояния режущей кромки инструмента подавление помех двух некоррелированных между собой частот производится за два равных первых такта, длительность которых кратна периоду первой сетевой помехи [8]. Поэтому напряжение с частотой первой помехи  $\omega_{п1}$  в моменты окончания первых двух тактов будет полностью подавлено. При длительности интервала времени сдвига этих двух тактов, равного половине периода напряжения второй помехи частотой  $\omega_{п2}$ , к моменту окончания второго такта интегрирования будет подавлено и напряжение помехи этой частоты. В течение третьего такта интегрирования происходит разряд конденсатора обратной связи интегратора напряжением опорного источника. Это реализует преобразование «напряжение – время». Заполняя интервал времени третьего такта импульсами образцовой частоты  $T_0$ , получим цифровой эквивалент  $N_X$  измеряемого напряжения.

В качестве датчиков числа полуоборотов (ДЧПО) шпинделя станка могут использоваться как оптический, так и магнитоиндукционный датчики. В первом случае при использовании оптического датчика последний содержит светодиод и фотодиод, закрепленные на неподвижной скобе, а между ними находится диск с двумя диаметрально расположенными прорезями, закрепленный в торце шпинделя станка. Поэтому за каждый оборот вращения шпинделя станка в момент нахождения прорезей диска между свето- и фотодиодами появляются два синхроимпульса с выхода оптического датчика.

Во втором случае в качестве датчика числа полуоборотов используется магнитоиндукционный датчик следующей конструкции. Подвижная часть датчика содержит диск, закрепленный в торце шпинделя станка, и два постоянных магнита, расположенных диаметрально на диске и вращающихся вместе с ним. Неподвижной частью магнитоиндукционного датчика является измерительная катушка, закрепленная на неподвижной скобе к станине станка.

В момент прохождения магнитов вблизи неподвижной измерительной катушки в последней наводятся два синхронизирующих импульса за каждый оборот вращения диска.

Сравнение данных двух вариантов ДЧПО показывает, что оптический датчик проще, надежнее и имеет меньшие габариты, чем магнитоиндукционный датчик.

Возможны два варианта реализации метода трехтактного интегрирования, основанные на использовании одного или двух счетчиков импульсов и двух дешифраторов. Рассмотрим схему реализации на одном счетчике импульсов и дешифраторе как наиболее простую.

Исходя из результатов моделирования полосу пропускания фильтров выбираем в пределах 3–4 кГц;  $f = 340 / \lambda$ , где  $\lambda$  – длина волны, равная размеру резца (0,1 м), а  $f = 3400$  Гц.

Структурная схема устройства представлена на рис. 3,а. Устройство содержит: датчик числа полуоборотов шпинделя станка – ДЧПО; усилитель-ограничитель – УО; датчик вибраций – ДВ; усилитель – У; фильтр – Ф; детектор – Дг; два триггера Т1 и Т2; две схемы совпадения на три входа И1 и И2; схему собирания на два входа – ИЛИ1; инвертор – Инв; счетчик импульсов – Сч; блок цифрового отсчета – БЦО; устройство управления – УУ; генератор образцовой частоты – ГОЧ; две схемы совпадения на два входа – И3 и И4; три схемы собирания на два входа – ИЛИ2, ИЛИ3, ИЛИ4; дешифратор – ДШ; два аналоговых ключа – Кл1, Кл2; интегратор – Инт; устройство сравнения – УС и источник опорного напряжения – ИОН.

В устройстве используется метод трехтактного последовательного интегрирующего преобразования. Интегрирование входного сигнала, содержащего помехи двух частот, производится за два первых последовательных равных такта, длительность которых кратна периоду сетевой помехи с частотой  $\omega_{п1}$ . Поэтому напряжение первой помехи с частотой  $\omega_{п1}$  будет полностью подавлено за время интегрирования первых двух тактов. При времени сдвига этих двух тактов, равном половине периода напряжения второй помехи с частотой  $\omega_{п2}$ , к моменту окончания второго такта интегрирования будет подавлено и напряжение помехи этой частоты. В течение третьего такта интегратор разряжается от источника опорного напряжения, что реализуется преобразованием «напряжение – время». Заполняя этот интервал времени импульсами образцовой частоты, получим цифровой эквивалент  $N_x$  измеряемого напряжения. Для получения времени сдвига начала первых двух тактов интегрирования, равного половине периода второй частоты помехи  $\omega_{п2}$ , необходимо, чтобы начало второго такта интегрирования совпадало с приходом первого четного импульса второй частоты помехи. В качестве датчика числа полуоборотов шпинделя станка используется оптический датчик. Синхронизация работы устройства производится импульсами с выхода оптического датчика при вращении шпинделя станка.

Действительно, результат интегрирования напряжения  $U_x$  полезного сигнала от процесса резания резца и помехи  $U_{п2} \sin \omega_{п2} t$  за первых два такта от вращения заготовки равен

$$U_1 = \frac{1}{\tau} \int_0^{T_1} (U_x + U_{п2} \sin \omega_{п2} t) dt + \frac{1}{\tau} \int_{T_1+\Delta t}^{2T_1+\Delta t} (U_x + U_{п2} \sin \omega_{п2} t) dt, \quad (5)$$

где  $\tau$  – постоянная времени входной цепи интегратора;  $\Delta t$  – интервал времени после окончания первого такта интегрирования до момента появления первого четного импульса с выхода ДЧПО.

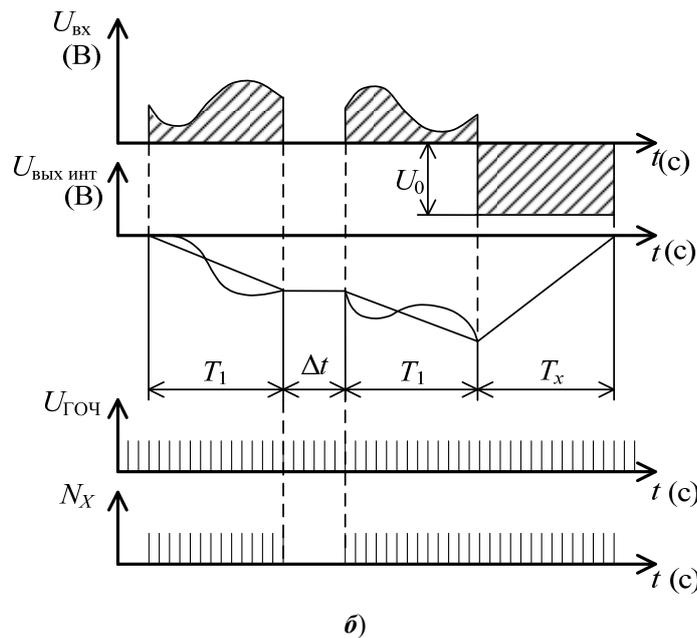
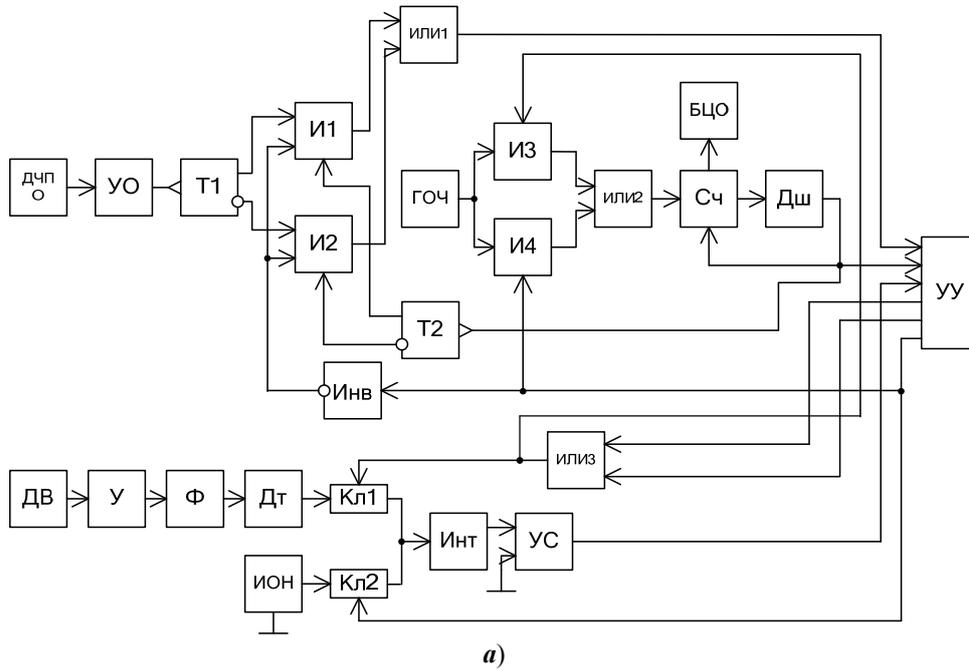


Рис. 3. Структурная схема устройства трехтактного интегрирования (а); временная диаграмма работы устройства трехтактного интегрирования (б)

Интервал времени  $\Delta t$  находится в диапазоне  $0 < \Delta t < T_{п2}$ , где  $T_{п2}$  – период вращения шпинделя станка. Причем если момент окончания первого такта

интегрирования попадает на нечетный полуоборот вращения шпинделя станка, то  $\Delta t < T_{п2}/2$ , а если момент окончания первого такта интегрирования попадает на четный полуоборот вращения шпинделя станка, то  $T_{п2}/2 < \Delta t < T_{п2}$ .

После подстановки пределов интегрирования в выражение (5) сумма вторых слагаемых обращается в нуль, тогда

$$U_1 = 2U_x T_1 (\tau)^{-1}. \quad (6)$$

Из выражения (6) видно, что напряжение на выходе интегратора пропорционально измеряемому напряжению  $U_x$  и длительности двух первых тактов интегрирования  $T_1$ . Разряжая интегратор в течение третьего такта интегрирования от источника опорного напряжения  $U_0$ , получим

$$U_1 = 2U_x T_1 \frac{1}{\tau} - \frac{1}{\tau} \int_0^{T_x} U_0 dt = 0. \quad (7)$$

Откуда значение интервала времени будет равно  $T_x = 2T_1 U_x (U_0)^{-1}$ . Заполняя его частотой генератора образцовой частоты  $T_0$ , получим цифровой эквивалент измеряемого напряжения:

$$N_x = T_x (T_0)^{-1} = 2T_1 (U_0 T_0)^{-1} U_x. \quad (8)$$

Работает устройство следующим образом. При включении напряжения питания устройством управления УУ производится сброс триггеров Т1, Т2 и счетчика импульсов Сч в нулевое состояние. Наличие двух разрешающих сигналов с выходов триггера Т2 и инвертора Инв, поступающих на входе схемы совпадения на три входа И1, подготавливает ее к работе. При появлении первого импульса на выходе датчика числа полуоборотов шпинделя станка ДЧПО через усилитель – ограничитель УО – взводится первый триггер Т1, и сигнал с его выхода через схему совпадения на три входа И1 и схему собирания на два входа ИЛИ1 синхронизирует работу устройства управления УУ. Чтобы импульсы с выхода датчика числа полуоборотов вращения шпинделя станка ДЧПО не влияли на работу устройства управления УУ, сигнал первого такта интегрирования  $\phi_1$  с выхода устройства управления УУ через схемы собирания на два входа ИЛИ3 и ИЛИ4 подается на вход инвертора Инв, который закрывает схемы совпадения на три входа И1 и И2 на длительность тактов интегрирования  $\phi_1$ ,  $\phi_2$  и  $\phi_3$ . Тем же сигналом  $\phi_1$  через схему собирания на два входа ИЛИ3 открывается схема совпадения на два входа И3. Импульсы с выхода генератора образцовой частоты ГОЧ через схему совпадения на два входа И3 и схему собирания на два входа ИЛИ2 начнут проходить на вход счетчика Сч в течение всего первого такта.

Одновременно с этим замыкается первый аналоговый ключ Кл1, и напряжение  $U_{вх}$  с выхода виброакустического датчика ДВ через усилитель У, фильтр Ф и детектор Дт подается на вход интегратора Инт и интегрируется.

По окончании первого такта  $\phi_1$  срабатывает дешифратор Дш, который сбрасывает счетчик Сч в состояние «0», а триггер Т2 – в состояние «1». Одновременно сигнал дешифратора Дш подается на второй вход устройства управления УУ, регистрируя окончание первого такта интегрирования. По-

этому сигналы состояния «1» с выходов инвертора Инв и триггера Т2 подготавливают к работе схему совпадения на три входа И2. При появлении с выхода датчика числа полуоборотов шпинделя станка первого четного импульса триггер Т1 перейдет в состояние «0», и сигнал с его инверсного выхода через открытую схему совпадения на три входа И2 и схему собирания на два входа ИЛИ1 синхронизирует начало второго такта интегрирования  $\varphi_2$  устройством управления УУ. Со сдвигом в полпериода частоты вращения шпинделя станка относительно начала первого такта интегрирования аналогично происходит интегрирование входного сигнала во втором такте  $\varphi_2$ .

После его окончания при повторном срабатывании дешифратора Дш сигналом с его выхода выполняется повторный сброс счетчика импульсов Сч, подается сигнал на устройство управления УУ об окончании второго такта интегрирования  $\varphi_2$  и выдается сигнал  $\varphi_3$  – начало третьего такта интегрирования. Аналоговый ключ Кл1 размыкается, интегратор Инт отключается от источника входного сигнала. Сигнал управления  $\varphi_3$  подключает источник опорного напряжения ИОН через аналоговый ключ Кл2 к входу интегратора Инт. Напряжение  $U_0$  начнет разряжать интегратор Инт. Одновременно с этим открывается дополнительная схема совпадения на два входа И4, и импульсы генератора образцовой частоты ГОЧ начнут проходить на вход счетчика Сч до тех пор, пока интегратор Инт не разрядится до нуля. Сигнал об окончании третьего такта интегрирования с выхода устройства сравнения УС подается на третий вход устройства управления УУ. На этом измерение заканчивается. Код в счетчике импульсов Сч регистрируется блоком цифрового отсчета БЦО и соответствует износу режущего инструмента.

Временная диаграмма работы устройства трехтактного интегрирования входного сигнала представлена на рис. 3,б.

Напряжение сетевой помехи будет подавлено, так как длительность тактов  $T_1$  кратна периоду сетевой помехи (20 мс). Как видно из временной диаграммы, за время двух тактов общей длительностью  $2T_1$  будет полностью подавлено и напряжение частоты  $\omega_{п2}$ , а к окончанию третьего такта вольт-секундные площади равны  $U_0 T_x = 2U_x T_1$ .

При реализации второго варианта устройства трехтактного интегрирующего преобразования, основанного на использовании двух счетчиков импульсов и двух дешифраторов, схема прибора несколько усложнится при сохранении тех же метрологических и эксплуатационных характеристиках.

Для выявления возможностей виброакустического контроля состояния режущего инструмента по анализу вибраций зоны резания была проведена серия экспериментов (при этом использовался стандартный пьезоакселерометр типа АНС-31). Были сняты виброакустические амплитудно-частотные характеристики от режимов резания и размерного износа режущей кромки резца. В эксперименте в широких пределах изменялась глубина резания  $t$ , подача  $S$  и число оборотов  $n$ , использовались заготовки из различных металлов с разными физико-механическими свойствами: сталь, латунь, дюралюминий. Точение заготовок проводилось однолезвийным резцом Т15К6 на станках типа 16К20 и ТПК-125.

Резец имел следующие геометрические размеры: ширина 10 мм, толщина 12 мм, углы:  $\alpha = 12^\circ$ ,  $\gamma = 18^\circ$ ,  $\varphi = 60^\circ$ ,  $\varphi_1 = 15^\circ$ .

Прибор реагировал только на виброакустические колебания, возникающие при точении деталей. Размерный износ резца регистрировался по показаниям микрометрической головки.

Зависимость выходного напряжения вибросигнала от величины размерного износа резца  $h_p$  при точении стали приведена на рис. 4.

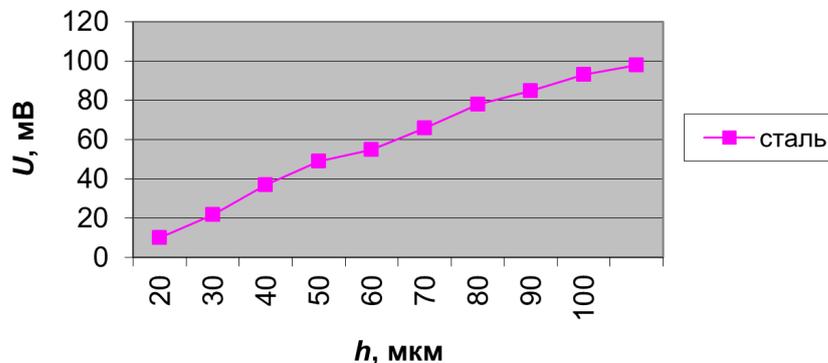


Рис. 4. Зависимость виброакустического сигнала от размерного износа режущего инструмента при точении стальной заготовки

### Заключение

Результаты математического моделирования напряженности акустического поля в теле резца и экспериментальные исследования изменения напряжения вибросигнала от величины износа режущего инструмента подтвердили возможность измерения размерного износа. Полученные результаты позволили создать приборы измерения размерного износа резцов для станков с ЧПУ.

### Список литературы

1. Добровинский, И. Р. Автоматический контроль состояния режущего инструмента на станках с ЧПУ/ И. Р. Добровинский и др. // Станки и инструмент. – 1987. – № 3. – С. 16–18.
2. Медведик, М. Ю. Субиерархический метод решения интегрального уравнения на плоских экранах произвольной формы / М. Ю. Медведик // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2009. – № 4. – С. 49–55.
3. Медведик, М. Ю. Субиерархический метод решения интегрального уравнения Липпмана – Швингера / М. Ю. Медведик // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2010. – № 4. – С. 82–88.
4. Субиерархический метод решения задачи дифракции электромагнитных волн на диэлектрическом теле в прямоугольном волноводе / М. Ю. Медведик, Ю. Г. Смирнов // Радиотехника и электроника. – 2011. – Т. 56, № 8. – С. 940–945.
5. Медведик, М. Ю. Субиерархический параллельный вычислительный алгоритм для решения задач дифракции электромагнитных волн на плоских экранах / М. Ю. Медведик, Ю. Г. Смирнов // Радиотехника и электроника. – 2008. – Т. 53, № 4. – С. 441–446.
6. Медведик, М. Ю. Применение субиерархического метода в задачах электродинамики / М. Ю. Медведик // Вычислительные методы и программирование. – 2012. – Т. 13. – С. 87–97.

7. **Медведик, М. Ю.** Субиерархический метод решения интегрального уравнения Липпмана – Швингера на телах сложной формы / М. Ю. Медведик // Радиотехника и электроника. – 2012. – Т. 57, № 2. – С. 175–180.
8. Пат. № 2263300 Россия. Устройство для измерения износа режущего инструмента / Добровинский И. Р., Белолопотков Д. А., Медведик Ю. Т., Чувькин Б. В. – Опубл. 27.10.2004, Бюл. № 30.

### References

1. Dobrovinskiy I. R., et al. *Stanki i instrument* [Machine tools and instruments]. 1987, no. 3. pp. 16–18.
2. Medvedik M. Yu. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Fiziko-matematicheskie nauki* [University proceedings. Volga region, Physical and mathematical sciences]. 2009, no. 4, pp. 49–55.
3. Medvedik M. Yu. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Fiziko-matematicheskie nauki* [University proceedings. Volga region, Physical and mathematical sciences]. 2010, no. 4, pp. 82–88.
4. Medvedik M. Yu., Smirnov Yu. G. *Radiotekhnika i elektronika* [Radio engineering and electronics]. 2011, vol. 56, no. 8, pp. 940–945.
5. Medvedik M. Yu., Smirnov Yu. G. *Radiotekhnika i elektronika* [Radio engineering and electronics]. 2008, vol. 53, no. 4, pp. 441–446.
6. Medvedik M. Yu. *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye* [Computing methods in programming]. 2012, vol. 13, pp. 87–97.
7. Medvedik M. Yu. *Radiotekhnika i elektronika* [Radio engineering and electronics]. 2012, vol. 57, no. 2, pp. 175–180.
8. Пат. № 2263300 Russian Federation. *Ustroystvo dlya izmereniya iznosa rezhushchego instrumenta* [Device for cutting tool wear estimation]. Dobrovinskiy I. R., Belolapotkov D. A., Medvedik Yu. T., Chuvykin B. V. 27.10.2004, no. 30.

---

#### **Добровинский Игорь Рувимович**

доктор технических наук, профессор,  
кафедра информационно-измерительной  
техники, Пензенский государственный  
университет (г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: idobr@tl.ru

#### **Dobrovinskiy Igor' Ruvimovich**

Doctor of engineering sciences, professor,  
sub-department of information measuring  
technology, Penza State University  
(Penza, 40 Krasnaya str.)

#### **Медведик Юрий Тимофеевич**

кандидат технических наук, старший  
преподаватель, кафедра электротехники  
и транспортного электрооборудования,  
Пензенский государственный  
университет (г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: yura.medvedik@mail.ru

#### **Medvedik Yuriy Timofeevich**

Candidate of engineering sciences, senior  
lecturer, sub-department of electrical  
engineering and transport electrical  
equipment, Penza State University  
(Penza, 40 Krasnaya str.)

#### **Медведик Михаил Юрьевич**

кандидат физико-математических наук,  
доцент, кафедра математики  
и суперкомпьютерного моделирования,  
Пензенский государственный  
университет (г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: medv@mail.ru

#### **Medvedik Mikhail Yur'evich**

Candidate of physical and mathematical  
sciences, associate professor,  
sub-department of mathematics  
and supercomputer modeling, Penza State  
University (Penza, 40 Krasnaya str.)

**Чапаев Вячеслав Сергеевич**

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра электротехники и транспортного  
электрооборудования, Пензенский  
государственный университет  
(г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: [chapaev@mail.ru](mailto:chapaev@mail.ru)

**Chapaev Vyacheslav Sergeevich**

Candidate of engineering sciences, associate  
professor, sub-department of electrical  
engineering and transport electrical  
equipment, Penza State University  
(Penza, 40 Krasnaya str.)

---

УДК 621.317.08

**Добровинский, И. Р.**

**Измерение износа резца виброакустическим методом и моделирование напряженности акустического поля внутри режущего инструмента / И. Р. Добровинский, Ю. Т. Медведик, М. Ю. Медведик, В. С. Чапаев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 1 (25). – С. 59–70.**

К. Л. Куликовский, А. Н. Толокнова

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СПОСОБНОСТИ ВОДОЕМА К САМООЧИЩЕНИЮ

*Аннотация.* Определение способности водоема к самоочищению дает возможность перспективного прогнозирования состояния его экосистемы, что важно при решении народнохозяйственных задач. Для определения способности водоема к самоочищению используют метод *Eh*-метрии, основанный на оценке распределения окислительно-восстановительного потенциала в слое донного осадка, который является интегральным параметром, комплексно характеризующим способность к естественному самоочищению водоема в целом. Представленный анализ методических погрешностей определения способности водоема к самоочищению методом *Eh*-метрии позволяет сделать вывод, что для их корректировки необходимым является получение информации не только о распределении окислительно-восстановительного потенциала в слое донного осадка, но и о температуре, толщине защитного слоя и угле отклонения внедрения измерительного электрода датчика *Eh* от вертикали.

*Ключевые слова:* самоочищение водоема, перспективное прогнозирование, информационно-измерительная система, погрешности, корректировка.

К. Л. Kulikovskiy, A. N. Toloknova

## ENHANCEMENT OF METHODS AND INFORMATION- MEASURING SYSTEMS DETERMINING THE ABILITY OF BASINS TO SELF-PURIFICATION

*Abstract.* Determination of basin's ability to self-purification allows prospective forecasting of its ecosystem condition, which is important in solving economic problems. To determine the ability of the reservoir to self-purification the authors use *Eh*-metrics method, based on the assessment of the oxidation-reduction potential distribution in a layer of sediment, which is an integral parameter comprehensively characterizing the ability of water reservoir natural self-purification in general. The presented analysis of methodological inaccuracies in determining the self-purification ability of the reservoir applying *Eh*-metrics method allows us to conclude that for their adjustment it is necessary to obtain information not only about the distribution of the oxidation-reduction potential in a layer of sediment, but also about the temperature, thickness of the protective layer and about the inclination angle of the measuring *Eh*-electrode sensor implantation from the vertical line.

*Key words:* reservoir self-purification, perspective forecasting, information measuring system, inaccuracy, correction.

### Введение

Определение способности водоема к самоочищению делает перспективное прогнозирование естественного восстановления водной экосистемы возможным.

Выявить тенденцию изменения экологического состояния водоема в условиях постоянно возрастающей антропогенной нагрузки становится актуальной задачей как при решении народнохозяйственных задач (например,

рыбоводство), так и при утилизации отходов или сброса сточных вод в водоемы, находящиеся в промышленной зоне предприятий и на близлежащих территориях.

### 1. Определение способности водоема к естественному самоочищению

Для определения способности водоема к естественному самоочищению необходимо измерение и оценка следующих параметров [1]: распределение окислительно-восстановительного потенциала в слое донного осадка, толщина защитного слоя донного осадка и температура.

Оценка окислительно-восстановительного потенциала  $Eh$  и его пространственное распределение определяет напряженность окислительно-восстановительных условий биогеохимических процессов на последней стадии переработки органических остатков и загрязнения в донных осадках, таким образом, окислительно-восстановительный потенциал  $Eh$  является интегральным параметром, комплексно характеризующим способность водоема к самоочищению.

В настоящее время для определения способности водоема к самоочищению используют метод  $Eh$ -метрии<sup>1</sup>. На основании этого метода способность к самоочищению определяется по формуле

$$K_{co} = \frac{(Eh > 0)_{cp}}{Eh_{max}} \cdot \frac{h}{H}, \quad (1)$$

где  $(Eh > 0)_{cp}$  – среднее значение  $(Eh > 0)$ ;  $h$  – толщина слоя окисленных осадков с микроаэрофильными условиями с  $(Eh > 0)$ ;  $Eh_{max}$  – максимальная величина окислительно-восстановительного потенциала в слое донного осадка, которая составляет +650 мВ;  $H$  – теоретическая толщина слоя осадка с активной биотурбацией.

Использование окислительно-восстановительного потенциала, который в воде и в донных осадках прямо или косвенно связан со всеми химическими характеристиками, физико-химическими свойствами осадков, со скоростью биогеохимических процессов, а также отражает численный и видовой состав макро- и микроорганизмов, в качестве оценочного параметра позволяет говорить о достоверности метода  $Eh$ -метрии.

Величина  $Eh$  характеризует окислительно-восстановительные процессы, протекающие в донной системе, дает интегральную оценку состояния водной среды, вызванную кумулятивными действиями присутствующих в воде загрязняющих веществ.

#### Методические погрешности определения способности водоема к самоочищению методом $Eh$ -метрии

В методе  $Eh$ -метрии не учитывается температура, что является одной из причин возникновения погрешности определения способности водоема к самоочищению. Проводимые экспериментальные исследования показали [2], что температура влияет на электродный потенциал, следовательно, и на окис-

---

<sup>1</sup> А.с. 1818583 СССР, МКИ<sup>3</sup> в 23 Р 33/18. Способы определения способности водоемов к самоочищению / В. Г. Токарев, И. И. Трибрат (СССР).

лительно-восстановительный потенциал. Было установлено, что данное влияние не приводит к уменьшению или увеличению самоочищающейся способности, т.е. влияние температуры на окислительно-восстановительный потенциал осуществляется в пределах данной способности. Однако температуру необходимо учитывать для точного определения толщины защитного слоя, т.е. глубины залегания «нулевой» точки ( $Eh = 0$ ).

Сравнительный анализ значений окислительно-восстановительного потенциала ( $Eh$ ), приведенный в [1] (без учета температуры), и значений окислительно-восстановительного потенциала, полученных экспериментально с учетом температуры ( $Eh_t$ ), показал, что максимальная разница  $\Delta_t$  ( $\Delta_t = Eh - Eh_t$ ) составляет 20 мВ (табл. 1), т.е. 2 % от диапазона изменения окислительно-восстановительного потенциала (от минус 350 до плюс 650 мВ).

Таблица 1

$t, ^\circ\text{C}$	$Eh_t, \text{мВ}$	$\Delta_t, \text{мВ}$	$\delta_t, \%$
0	297	20	6,73
5	293	16	5,46
10	289	12	4,15
15	285	8	2,81
20	281	4	1,4
25	277	0	0
30	273	-4	-1,46
35	269	-8	-2,97

Максимальное относительное значение разницы между значениями окислительно-восстановительного потенциала, полученными с учетом и без учета температуры,  $\delta_t$  равно

$$\delta_t = \frac{\Delta_t}{Eh_t} \cdot 100 \%$$

и составляет 6,73 %.

На рис. 1 представлен график зависимости относительной температурной погрешности  $\delta_t$  от распределения температуры и окислительно-восстановительного потенциала в слое донного осадка.

Из рис. 1 видно, что в температурном диапазоне от 0 до +25 °С погрешность  $\delta_t$  уменьшается при сохраняющейся тенденции понижения потенциала. В от +25 до +35 °С модуль погрешности  $\delta_t$  наоборот возрастает пропорционально уменьшению в диапазоне от 0 до +25 °С. При температуре  $t = 25$  °С значение  $\delta_t$  равно нулю (перегиб поверхности на графике). Это обусловлено тем, что при данной температуре потенциал электрода сравнения, относительно которого измеряется окислительно-восстановительный потенциал, равен нулю.

Уменьшить или компенсировать эту составляющую можно посредством измерения температурного режима в защитном слое донного осадка с последующей поправкой на температуру получаемых в процессе измерения

значений потенциала. Измерение температуры должно проводиться в той же точке, что и измерение потенциала. Однако организовать такую измерительную процедуру невозможно. Температуру можно измерить в точке, близлежащей к точке измерения потенциала, что также вносит погрешность в конечный результат измерений.

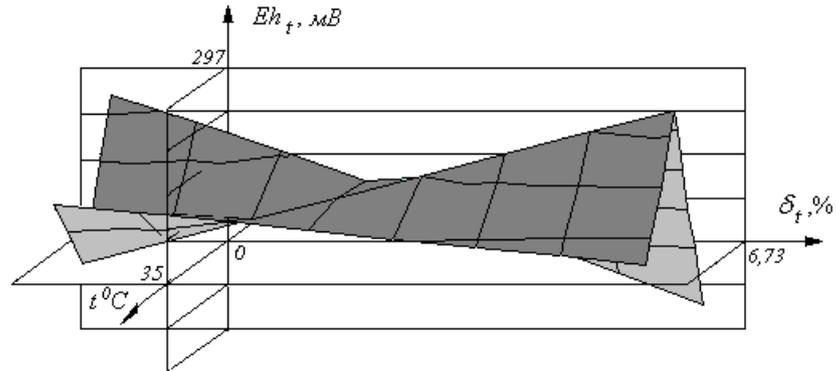


Рис. 1

Также причиной возникновения погрешности является ситуация, когда измерение распределения окислительно-восстановительного потенциала в слое донного осадка проводится не вертикально, а с некоторым углом отклонения. Тогда возникает вопрос об определении реальной толщины защитного слоя и о распределении истинных значений потенциала в донном осадке. Связанные с такой ситуацией погрешности заслуживают более пристального внимания.

Метод *Eh*-метрии предполагает измерение вертикального ( $\alpha = 0$ ) распределения окислительно-восстановительного потенциала в слое донного осадка заглублением в него датчика *Eh* (рис. 2).

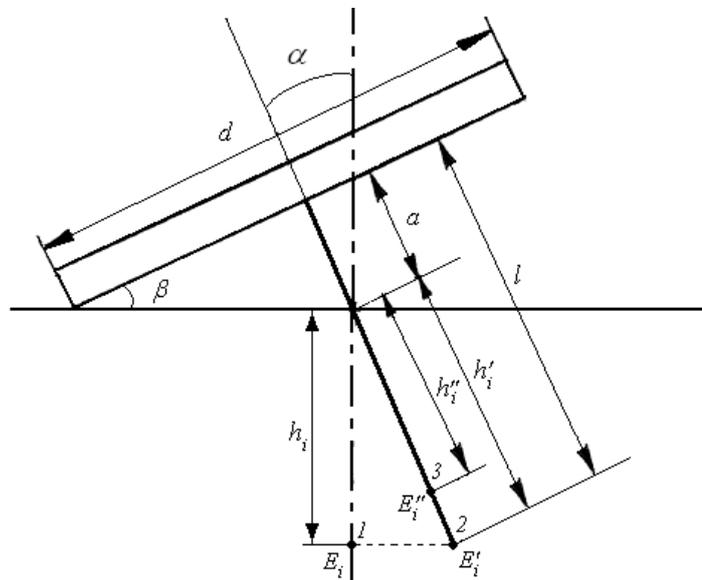


Рис. 2

На рис. 2 использованы следующие обозначения:  $\alpha$  – угол отклонения заглубления измерительной части датчика  $Eh$  от вертикали;  $l$  – длина измерительной части электрода датчика  $Eh$ ;  $d$  – длина основания, в котором перпендикулярно закреплен датчик  $Eh$  ( $l$  и  $d$  задаются конструктивно);  $h_i$  – реальная глубина нахождения  $i$ -й точки (реальная толщина защитного слоя донного осадка);  $h'_i$  – глубина, на которую заглублена измерительная часть электрода датчика  $Eh$  в слой донного осадка под углом  $\alpha$  в  $i$ -й точке;  $\beta$  – угол между плоскостью основания, в которой перпендикулярно закреплен датчик  $Eh$  и плоскостью поверхности дна;  $a$  – длина незаглубленной измерительной части датчика  $Eh$ .

Датчик  $Eh$  представляет собой электродную пару, состоящую из измерительного электрода и электрода сравнения, который погружают в слой донного осадка. На практике часто возникает ситуация, когда датчик  $Eh$  внедряется в защитный слой осадка с некоторым отклонением от вертикали ( $\alpha \neq 0$ ) из-за различных механических препятствий (камней, мусора и т.д.) или неровности поверхности самого дна водоема. Это влечет за собой ошибку определения реальной глубины  $h_i$  нахождения  $i$ -й точки (реальной толщины защитного слоя) и ошибку определения истинного значения потенциала  $E_i$  в каждой  $i$ -й точке реальной толщины слоя.

Проблема определения реальной глубины  $h_i$  нахождения  $i$ -й точки может быть решена следующим образом.

В идеале угол  $\alpha$  должен быть равен нулю. Если  $\alpha \neq 0$ , то возникает отклонение от вертикали измерения, что влечет появление ошибки в определении реальной глубины  $h_i$  нахождения  $i$ -й точки и, как следствие, реальной толщины защитного слоя осадка. Для компенсации данной погрешности необходимо, учитывая угол  $\alpha$ , проводить пересчет для определения реальной толщины.

При заглублении измерительной части датчика  $Eh$  длиной  $l$  в слой донного осадка под некоторым углом  $\alpha$  между плоскостью основания, в которой он перпендикулярно закреплен, и плоскостью поверхности дна образуется угол  $\beta$  ( $\beta = 0$  при  $\alpha = 0$ ,  $\beta \neq 0$  при  $\alpha \neq 0$ ). При  $\beta \neq 0$  измерительная часть датчика  $Eh$  не полностью входит в слой донного осадка на глубину  $l$ .

Некоторая часть  $a$  измерительного элемента остается незаглубленной. Тогда возникает вопрос о глубине  $h'_i$ , на которую измерительная часть датчика  $Eh$  вошла в слой донного осадка. Глубина  $h'_i$  будет равна разности длин всей измерительной части электрода датчика  $Eh$   $l$  и ее незаглубленной части  $a$ :

$$h'_i = l - a.$$

Зная градусную меру угла  $\beta$  и длину основания, в котором перпендикулярно закреплен датчик  $Eh$ , можно найти длину  $a$  незаглубленной измерительной части:

$$a = \frac{d}{2} \operatorname{tg} \beta.$$

Также длину незаглубленной измерительной части  $a$  можно найти как произведение половины длины основания  $d$  на тангенс угла отклонения за-глубления от вертикали при  $\alpha = \beta$ :

$$a = \frac{d}{2} \operatorname{tg} \alpha;$$

найдем глубину  $h'_i$ :

$$h'_i = l - \frac{d}{2} \operatorname{tg} \alpha. \quad (2)$$

Затем найдем реальную глубину  $h_i$  нахождения  $i$ -й точки, т.е. реальную толщину защитного слоя осадка:

$$h_i = h'_i \cos \alpha. \quad (3)$$

Подставим в выражение (3) выражение (2) и получим

$$\begin{aligned} h_i &= \left( l - \frac{d}{2} \operatorname{tg} \alpha \right) \cos \alpha = l \cos \alpha - \frac{d}{2} \operatorname{tg} \alpha \cos \alpha = \\ &= l \cos \alpha - \frac{d}{2} \sin \alpha. \end{aligned} \quad (4)$$

При организации измерительной процедуры величина  $h'_i$  известна. Она определяется как величина, равная произведению числа шагов заглубления на ширину шага. При полном заглублении измерительной части датчика  $Eh$  в слой донного осадка  $h'_i = l$ .

Из этого можно сделать следующий вывод: для компенсации погрешности, возникающей при отклонении заглубления измерительной части датчика  $Eh$  от вертикали, необходимо использовать формулу (3) для определения реальной толщины защитного слоя донного осадка.

Однако при  $\alpha \neq 0$  возникает вопрос об определении истинного значения потенциала  $E_i$  в каждой  $i$ -й точке реальной толщины слоя.

На рис. 2 потенциал, измеренный в точке 2, находящейся на глубине  $h'_i$  в слое донного осадка при внедрении датчика  $Eh$  с некоторым отклонением от вертикали, равен  $E'_i$ . Значение измеренного потенциала  $E'_i$  в точке 2 отличается от значения потенциала  $E_i$  в точке 1. При определении реальной глубины  $h_i$  нахождения  $i$ -й точки получаем, что в точке 1 значение потенциала равно  $E'_i$ . Это является причиной возникновения погрешности определения значения потенциала  $\Delta_{Ei}$  в каждой  $i$ -й точке при отклонении внедрения датчика  $Eh$  в слой донного осадка от вертикали:

$$\Delta_{Ei} = E'_i - E_i. \quad (5)$$

На основании выражений (1) и (3) получаем, что потенциал  $E'_i$  равен

$$E'_i = \frac{K_{\text{со}} \cdot 6500}{h'_i \cdot \cos \alpha_i}, \quad (6)$$

где  $\alpha_i$  – градусная мера угла  $\alpha$  в каждой  $i$ -й точке.

Тогда погрешность определения значения потенциала  $\Delta_{Ei}$  в каждой  $i$ -й точке при отклонении внедрения датчика  $Eh$  в слой донного осадка от вертикали равна

$$\Delta_{Ei} = \frac{K_{co} \cdot 6500}{h_i \cdot \cos \alpha_i} - E_i. \quad (7)$$

Также из рис. 2 видно, что своего максимального значения  $\Delta_{Ei}$  достигнет при максимальной реальной толщине защитного слоя ( $h = 10$  см) и будет зависеть от угла  $\alpha$ . Чем больше значение градусной меры угла  $\alpha$ , тем дальше находится точка, в которой измеряется потенциал  $E'_i$ , от точки с истинным значением потенциала  $E_i$ , тем значение погрешности  $\Delta_{Ei}$  больше. Если принять за максимальное отклонение от вертикали угол в  $30^\circ$ , то можно определить погрешность  $\delta_{Ei}$ :

$$\delta_{Ei} = \frac{\Delta_{Ei}}{E_i} \cdot 100\% = \left[ \frac{K_{co} \cdot 6500}{E_i \cdot h_i \cdot \cos \alpha_i} - 1 \right] \cdot 100\%.$$

При максимальной толщине защитного слоя 10 см значение погрешности  $\delta_{Ei}$  составит 0,5 % от всего диапазона измерения окислительно-восстановительного потенциала в слое донного осадка природных водоемов. На рис. 3 представлена поверхность, отображающая зависимость погрешности  $\delta_{Ei}$  от угла отклонения от вертикали и толщины слоя донного осадка.

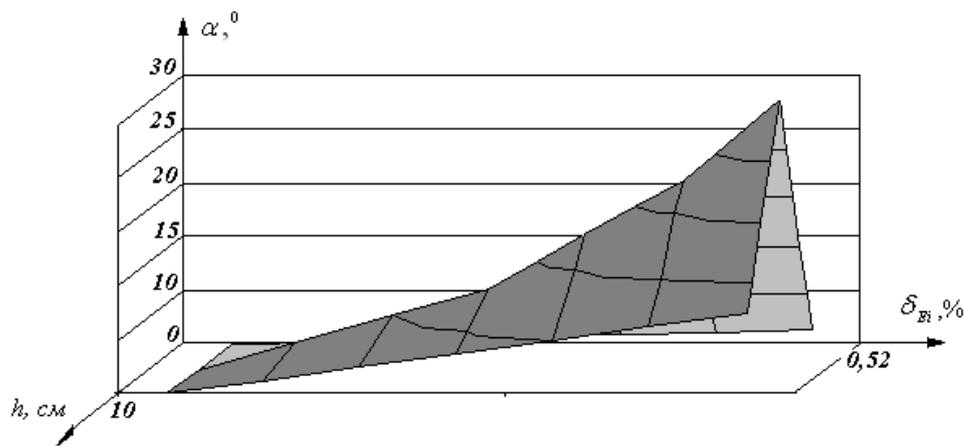


Рис. 3

Из рис. 3 видно, что с увеличением угла  $\alpha$  отклонения от вертикали погрешность  $\delta_{Ei}$  будет увеличиваться на протяжении всего процесса заглубления датчика  $Eh$  в слой донного осадка.

Компенсировать данную погрешность можно при условии  $\alpha \rightarrow 0$ , т.е. при вертикальном измерении распределения окислительно-восстановительного потенциала в защитном слое донного осадка.

Кроме того, заглублиение датчика  $Eh$  в слой осадка осуществляется пошагово. Длина каждого шага заглублиения  $\Delta_{\emptyset}$  равна

$$\Delta_{\emptyset} = h_i - h_{i-1}, \text{ где } i = 1, 2, \dots, n,$$

и при равномерном заглублиении постоянна  $\Delta_{\emptyset} = \text{const}$ .

На практике часто возникает ситуация, когда заглублиение неравномерно ( $\Delta_{\emptyset} \neq \text{const}$ ). При измерении потенциала  $E_i'$  на глубине  $h_i'$  (точка 2) на самом деле получаем значение потенциала  $E_i''$  на глубине  $h_i''$  (точка 3) (рис. 2). Это является причиной возникновения погрешности заглублиения в каждой  $i$ -й точке измерения потенциала:

$$\Delta_{Eih} = E_i'' - E_i'. \quad (8)$$

Погрешность шага заглублиения  $\Delta h$  равна

$$\Delta h = h_i'' - h_i'. \quad (9)$$

На основании выражений (1) и (3) получаем, что потенциал  $E_i''$  равен

$$E_i'' = \frac{K_{\text{co}} \cdot 6500}{h_i''} = \frac{K_{\text{co}} \cdot 6500}{h_i' + \Delta h}. \quad (10)$$

Подставим в (8) выражения (6) и (10), получим:

$$\Delta_{Eih} = \frac{K_{\text{co}} \cdot 6500}{h_i' + \Delta h} - \frac{K_{\text{co}} \cdot 6500}{h_i' \cos \alpha_i} = K_{\text{co}} \cdot 6500 \cdot \left( \frac{1}{h_i' + \Delta h} - \frac{1}{h_i' \cos \alpha_i} \right). \quad (11)$$

При аппаратурной реализации [3] равномерного заглублиения погрешность заглублиения в каждой  $i$ -й точке будет зависеть от физической неоднородности донного осадка. Анализ показал, что при заглублиении датчика  $Eh$  в слой донного осадка на ширину одного шага с ошибкой в 1 мм погрешность заглублиения составляет 0,034 %.

Общая погрешность измерения потенциала  $\Delta_E$  в каждой  $i$ -й точке будет включать в себя обе составляющие: погрешность определения значения потенциала  $\Delta_{Ei}$  в каждой  $i$ -й точке при отклонении внедрения датчика  $Eh$  в слой донного осадка от вертикали и погрешность заглублиения в каждой  $i$ -й точке измерения потенциала  $\Delta_{Eih}$ :

$$\begin{aligned} \Delta_E = \Delta_{Ei} + \Delta_{Eih} &= \frac{K_{\text{co}} \cdot 6500}{h_i' \cos \alpha_i} - E_i + K_{\text{co}} \cdot 6500 \cdot \left( \frac{1}{h_i' + \Delta h} - \frac{1}{h_i' \cos \alpha_i} \right) = \\ &= K_{\text{co}} \cdot 6500 \cdot \frac{\cos \alpha_i}{h_i' + \Delta h} - E_i. \end{aligned} \quad (12)$$

Из выражения (12) видно, что на погрешность измерения потенциала  $\Delta_E$  в каждой  $i$ -й точке оказывает влияние угол отклонения заглублиения измерительной части датчика  $Eh$  от вертикали и неравномерность шага заглублиения датчика  $Eh$  в слой донного осадка.

### Заключение

На основании вышесказанного можно сделать вывод, что разрабатываемая информационно-измерительная система для определения способности водоемов к естественному самоочищению должна проводить измерения не только окислительно-восстановительного потенциала в слое донного осадка, но и его температуры, толщины защитного слоя и угла отклонения внедрения измерительного электрода датчика  $Eh$  от вертикали.

### Список литературы

1. **Куликовский, К. Л.** Построение прогнозной модели способности водных экосистем к самоочищению / К. Л. Куликовский, А. Н. Толокнова // Радиотехника, электротехника и энергетика : тезисы XXIII Междунар. науч.-техн. конф. – М., 2006. – Т. 2 – С. 263–265.
2. **Толокнова, А. Н.** Донная информационно-измерительная система определения способности водоемов к самоочищению : автореф. дис. канд. техн. наук / А. Н. Толокнова. – Самара : СамГТУ, 2007.
3. **Толокнова, А. Н.** Разработка концепции определения самоочищающейся способности водных экосистем и ее аппаратурная реализация / А. Н. Толокнова // Исследовано в России 107. – 2006. – С. 1012–1016. – URL: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2006/107.pdf>

### References

1. Kulikovskiy K. L., Toloknova A. N. *Radioelektronika, elektrotehnika i energetika: tezisy XXIII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Radioelectronics, electrical engineering and power engineering: theses of the 23<sup>rd</sup> International scientific technical conference]. Moscow, 2006, vol. 2, pp. 263–265.
2. Toloknova A. N. *Donnaya informatsionno-izmeritel'naya sistema opredeleniya sposobnosti vodoemov k samoochishcheniyu : avtoref. dis.* [Bottom information measuring system determining the ability of a basin to self-purification: author's abstract of dissertation]. Samara: SamGTU, 2007.
3. Toloknova A. N. *Issledovano v Rossii* 107 [Explored in Russia 107]. 2006, pp. 1012–1016, available at: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2006/107.pdf>

---

#### **Куликовский Константин Лонгинович**

доктор технических наук, профессор,  
кафедра информационно-измерительной  
техники, Самарский государственный  
технический университет (Самара,  
ул. Молодогвардейская, 244)

E-mail: [ant683@mail.ru](mailto:ant683@mail.ru)

#### **Kulikovskiy Konstantin Longinovich**

Doctor of engineering sciences, professor,  
sub-department of information measuring  
technique, Samara State Technical  
University (Samara,  
244 Molodogvardeyskaya str.)

#### **Толокнова Анна Николаевна**

кандидат технических наук, кафедра  
организации перевозок и технического  
сервиса, Самарская государственная  
сельскохозяйственная академия  
(Самарская область, г. Кинель,  
п. Усть-Кинельский, ул. Учебная, 2)

E-mail: [ant683@mail.ru](mailto:ant683@mail.ru)

#### **Toloknova Anna Nikolaevna**

Candidate of engineering sciences,  
sub-department of transportation  
organization and technical service,  
Samara State Agricultural Academy  
(Samara region, Kinel, Ust-Kinel,  
2 Training str.)

УДК 681.2.088

**Куликовский, К. Л.**

**Совершенствование методов и информационно-измерительных систем определения способности водоема к самоочищению** / К. Л. Куликовский, А. Н. Толокнова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 1 (25). – С. 71–80.

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

---

УДК 621-2.002.2

*А. В. Липов*

## ТЕХНОЛОГИЯ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ ОТДЕЛОЧНО-ЗАЧИСТНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ

*Аннотация.* Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований вибрационной обработки деталей из хрупких материалов. Технологические параметры такой обработки в настоящее время определяются на основании предварительных экспериментальных исследований, что значительно повышает ее стоимость и время проведения. Обрабатываемые материалы разделены на две группы. К первой относятся те, которые являются хрупкими при обычных условиях (реактопласты, твердые сплавы и др.), ко второй – которые перед обработкой следует охлаждать до хрупкого состояния (термопласты и резины). Экспериментальные исследования проведены на вибрационном станке с объемом рабочей камеры 12 дм<sup>3</sup>, которая для возможности обработки деталей из термопластов и резин может быть теплоизолирована и герметично закрываться крышкой. Необходимые зависимости получены на основе теорий резания материалов и разрушения полимеров с использованием метода математического планирования. Разработка технологии проведена на примере округления режущих кромок сменных многогранных пластин инструмента, изготовленных из твердого сплава, и удаления грата на деталях из термопластов. Приведены зависимости и рекомендации, позволяющие расчетом определять технологические параметры вибрационной обработки деталей из хрупких материалов, что позволяет значительно сократить время ее проведения без трудоемких предварительных экспериментальных исследований.

*Ключевые слова:* сменные многогранные пластины режущего инструмента, термопласты, грат, вибрационный станок, сколы, выкрашивания, режимы обработки.

*А. В. Липов*

## TECHNOLOGY OF POWER-OPERATED FINISHING-AND- SKINNING OF BRITTLE MATERIAL PARTS

*Abstract.* The article gives the results of theoretical and experimental research of vibromechanical treatment of brittle material parts. Technological parameters of such treatment are determined at the present time on the basis of preliminary experimental research, which considerably increases its cost and conduction time. The processed materials are divided into two groups. The first group includes the materials that are brittle in normal conditions (thermosetting plastics, hard alloys etc.), the second includes the materials that require to be cooled down to brittle state before treatment (thermoplasts and rubbers). Experimental research was conducted on a vi-

bration tool with working chamber volume of 12 dm<sup>3</sup>, which can be heat-insulated and sealed in order to process the parts made of thermoplasts and rubbers. The required dependencies are achieved on the basis of the theory of metal cutting and polymer destruction using mathematical planning. Development of the technology is conducted by the example of rounding the cutting edge of the replaceable multifaceted tool plates, produced from hard alloys, and by the example of burr removal from thermoplast parts. The article adduces the dependencies and recommendations, allowing through calculation to determine technological parameters of vibration treatment of brittle material parts, which significantly decreases the conduction time avoiding labour-consuming preliminary experimental research.

*Key words:* removable multifaceted plate (NSR) of the cutting tool, thermoplastics, burr, vibrating machine, chips and chipping, processing modes.

### **Введение**

Детали из хрупких материалов благодаря их разнообразным свойствам широко применяются в различных отраслях промышленности и быту.

К хрупким относятся те материалы, которые при механическом воздействии на них разрушаются без видимых остаточных деформаций. Это различные твердые сплавы, чугуны, стекла, реактопласты, полупроводниковые материалы. Ввиду невозможности получения относительно точных размеров и форм деталей из хрупких материалов при литье, спекании, точении лезвийным инструментом, обработке абразивным инструментом и т.д. более 90 % их подвергают отделочно-зачистным операциям. При выполнении таких операций удаляют грат, облой, нагар после литья, зачищают заусенцы, доводят ответственные поверхности, режущие кромки и др.

Одним из современных методов механизированного выполнения отделочно-зачистных операций деталей из хрупких материалов является воздействие на их элементы наполнителем, например, в виде гранулированного абразива, фарфоровых, металлических шаров и др., обычно с использованием рабочей жидкости, в камерах различного оборудования для объемной обработки (галтовочных барабанов, центробежно-планетарных и центробежно-ротационных станков и др.). При этом в отдельную группу деталей следует выделить детали, изготовленные из термопластов и резин, которые при нормальных условиях являются высокоэластичными, а перед обработкой должны быть предварительно охлаждены до хрупкого состояния грата или облоя.

### **1. Общие подходы при отделочно-зачистных операциях деталей из хрупких материалов**

Общеизвестным фактом при выполнении механизированных отделочно-зачистных операций деталей из хрупких материалов является то, что при воздействии наполнителя на их элементы образование лунок в зоне контакта происходит по схеме скалывания, без образования буртов и навалов. При последующем воздействии наполнителя происходит зачистка острых граней. Удаление материала на таких деталях происходит из-за появления микротрещин на их элементах. Характерным браком деталей при такой обработке являются сколы и выкрашивания на их кромках, которые появляются либо из-за столкновения деталей между собой, либо вследствие значительного уменьшения площади контакта наполнителя с обрабатываемой поверхностью, при-

водящего к увеличению удельного давления на поверхности контакта и глубины внедрения наполнителя в обрабатываемый материал.

Из вышеизложенного следует, что избежать такого брака деталей можно двумя способами:

1) снижением усилий воздействия наполнителя на обрабатываемые детали. При этом необходимо назначать такие режимы работы оборудования, вид и размеры наполнителя, которые обеспечивали бы усилие, достаточное для качественной обработки деталей, но не вызывающее их дефектов.

2) исключением при обработке столкновения деталей между собой.

При выборе оборудования для отделочно-зачистной обработки деталей из хрупких материалов следует учитывать, что вибрационные станки по сравнению с другим оборудованием для объемной обработки менее производительны из-за незначительных усилий воздействия наполнителя на детали в процессе обработки. Однако они обычно при доработке или использовании различной оснастки позволяют более точно задавать его величину, что особенно важно для деталей из хрупких материалов. Кроме того, конструкция вибрационных станков и характер движения их различных элементов позволяют предварительно охлаждать, затем обрабатывать детали из термопластов и резин в их теплоизолированных рабочих камерах, обеспечивая возможность, в случае необходимости, подавать хладагент непрерывно в процессе обработки. Все это определяет вибрационные станки как основное оборудование для механизированной отделочно-зачистной обработки деталей из хрупких материалов.

## **2. Технологические параметры отделочно-зачистной вибрационной обработки деталей из хрупких материалов**

Технологические параметры отделочно-зачистной вибрационной обработки характеризуются условиями и режимами ее проведения. При этом к условиям обработки относятся вид и размеры наполнителя, соотношение деталей и обрабатываемой среды, степень заполнения рабочей камеры станка, состав компонентов и концентрация рабочей жидкости. К технологическим режимам относятся амплитуда, частота колебаний рабочей камеры станка и время обработки. К условиям обработки деталей из термопластов и резин дополнительно относятся температура и время предварительного охлаждения.

В настоящее время технологические параметры вибрационной обработки деталей из хрупких материалов в основном определяются экспериментально, что значительно увеличивает время подготовки производства и стоимость обработки. В связи с этим получение расчетных зависимостей для определения технологических параметров такой обработки является актуальной задачей.

Разработка технологии отделочно-зачистной обработки деталей из хрупких материалов с использованием расчетных зависимостей была проведена на примере изделий, которые не следует охлаждать перед обработкой – это сменные многогранные пластины (СМП) режущего инструмента, и деталей из термопластов, которые необходимо предварительно охлаждать перед обработкой до хрупкого состояния графа.

### 3. Отделочно-зачистная обработка СМП режущего инструмента

В соответствие с ГОСТ 19086–80 СМП могут подвергаться виброабразивной обработке для округления режущих кромок с целью повышения прочности режущего клина. Величина радиуса округления  $\rho$  зависит от марки твердого сплава и диаметра вписанной окружности пластины и находится в пределах от 0,02 до 0,1 мм.

Существуют различные схемы вибрационной обработки. Это схема «внавал» в рабочей камере станка деталей и наполнителя, при которой наиболее вероятны столкновения деталей друг с другом, и использование различных барабанов с отдельными приводами, на осях которых закрепляются через проставочные втулки СМП. При этом исключается столкновение деталей друг с другом, но затрачивается значительное вспомогательное время на установку и снятие СМП на неработающем оборудовании.

Предложена конструкция кассетного барабана, в котором также через проставочные втулки закрепляются СМП [1, 2]. Однако барабан не имеет отдельного привода и свободно размещается при обработке в U-образной рабочей камере станка, совершающей колебания. Данная конструкция обладает более высокой производительностью, поскольку при обработке деталей в одном барабане, «заряжается» второй. По окончании обработки кассетный барабан заменяется другим без остановки станка, что позволяет совместить вспомогательное время с основным.

Для определения режимов вибрационной обработки, необходимых для получения требуемого радиуса округления режущей кромки СМП, разработана модель взаимодействия частицы абразивной гранулы с поверхностью детали. Абразивная гранула представлялась как сфера, из которой выступают зерна в виде непересекающихся пирамид, при этом были приняты следующие допущения:

- 1) физико-механические свойства материала детали одинаковы во всех направлениях;
- 2) твердость абразивных зерен бесконечно большая по сравнению с твердостью материала детали;
- 3) в процессе обработки деформаций элементов гранулы не происходит, ее геометрия не изменяется.

Время (мин), необходимое для получения требуемого значения  $\rho$  (мм), определяется по формуле

$$t_{\text{обр } \rho} = \frac{\rho^2 \left( \operatorname{tg} \left( 90 - \frac{\beta_{\text{рк}}}{2} \right) - \frac{\pi(180 - \beta_{\text{рк}})}{360} \right)}{Q_{\text{к}}},$$

где  $\beta_{\text{рк}}$  – угол заострения режущего клина СМП;  $Q_{\text{к}}$  – суммарный съем материала в единицу времени абразивными гранулами с сечения кромки пластины,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Величина  $Q_{\text{к}}$  определяется в зависимости от объема материала, удаленного при внедрении в поверхность одного абразивного зерна в виде пирамиды и от числа ударов абразивных гранул в кромки пластины.

#### 4. Механизированная отделочно-зачистная обработка деталей из термопластов

При механизированных отделочно-зачистных операциях деталей из термопластов удаляют грат, который обычно образуется по линии разъема форм при их получении. Обработка проводится по схеме «внавал» деталей с наполнителем в рабочих камерах вибрационных станков, что не исключает столкновения деталей друг с другом. В связи с этим единственной возможностью избежания дефектов деталей является ограничение воздействия наполнителя на грат.

Охлаждение и обработку проводят в рабочих камерах, которые теплоизолируют и герметично закрывают крышками. Низкотемпературное охлаждение деталей вместе с наполнителем проводят обычно жидким азотом, позволяющим охрупчивать широкую номенклатуру термопластов.

Температуру, до которой следует охлаждать термопласты, предложено называть температурой охрупчивания  $T_{\text{охр}}$  и определять ее расчетом по формулам физико-химии полимеров либо экспериментально на специально спроектированном устройстве [3]. Необходимое время охлаждения определяется расчетом в деталях температурных полей с использованием программного пакета SolidWorks, с учетом теплоизоляционных свойств оборудования [4]. Грат считается хрупким и обработку можно начинать, если температура в его основании достигла величины  $T_{\text{охр}}$ . Дальнейшее охлаждение деталей повышает стоимость обработки из-за перерасхода жидкого азота и может привести к охрупчиванию их тонких элементов, которые при обработке могут разрушиться.

Качество удаления грата определяется его допустимой длиной, которая назначается исходя из условий эксплуатации деталей. Для сохранения внешнего вида деталей из термопластов их обрабатывают обычно стальными или фарфоровыми шарами.

Предложено для ограничения усилия воздействия наполнителя на охлажденные элементы деталей его величину определять расчетом по допустимой длине грата с учетом размеров используемого наполнителя [5].

На рис. 1 приведена схема к определению минимального усилия воздействия  $P_{\text{min}}$ , необходимого для качественного удаления грата и действующего на него под углом  $\alpha$ . Величина  $P_{\text{min}}$  определяется по формуле

$$P_{\text{min}} = \frac{P^* R}{\sqrt{L(2R - L)}},$$

где  $P^*$  – нормальная составляющая усилия  $P_{\text{min}}$ , обеспечивающая возникновение в основании грата напряжения хрупкого разрушения термопласта детали  $\sigma_k$ ;  $R$  – радиус наполнителя;  $L$  – допустимая длина грата.

При воздействии усилием  $P_{\text{min}}$  на грат одинаковой толщины, длиной более или равной  $L$ , он удалится по основанию, если его длина меньше  $L$ , то он останется на детали. Грат по контуру разъема форм имеет разные размеры

(толщину и длину), поэтому нормальную составляющую  $P^*$  следует определять методом конечных элементов с использованием различных программных пакетов.

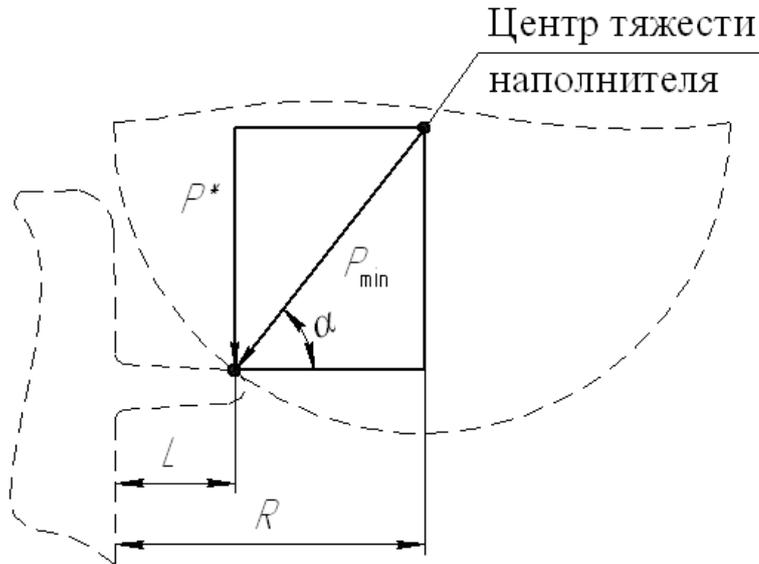


Рис. 1. Схема к определению минимального усилия воздействия наполнителя  $P_{\min}$ , необходимого для качественного удаления грата

Разрушение полимеров происходит в результате разрыва химических связей между мономерными звеньями материала. В результате такого процесса вначале образуется микротрещина, которая становится очагом разрушения [6]. Для термопластов с некоторым запасом, при допущении отсутствия в них микротрещин в хрупком состоянии, величина  $\sigma_k$  (в ГПа) определяется по формуле

$$\sigma_k = \frac{1}{V_A} (U_0^0 - q_3 T_{\text{охр}}),$$

где  $U_0^0$  – энергия, необходимая для разрыва химических связей между мономерными звеньями материала при температуре, близкой к абсолютному нулю, кДж/моль;  $V_A$  – флуктуационный объем, т.е. объем материала, участвующего в росте трещины, мм<sup>3</sup>;  $q_3$  – температурный коэффициент энергии активации, кДж/моль·К;  $T_{\text{охр}}$ , К.

### 5. Определение усилий воздействий наполнителя на элементы деталей и их количество

Из проведенных исследований видно, что для дальнейших расчетов технологических параметров необходимо уметь определять величины усилий воздействия наполнителя на элементы деталей  $F$  и количество таких воздействий в единицу времени  $N$  при различных режимах и условиях обработки.

Предложено в программной среде SolidWorks для конкретного станка и загрузки его рабочей камеры разрабатывать компьютерные модели их движения, позволяющие анализировать поведение наполнителя и деталей в процессе обработки с последующим расчетом в приложении Cosmos Motion значений  $F$  и  $N$  [2, 7].

Данный подход требует значительного времени и не позволяет оперативно решать некоторые конструкторские и технологические задачи. В связи с этим предложено применять метод математического планирования экспериментов с использованием планов дробного факторного эксперимента вида  $2^{4-1}$  с преобразованием выходного параметра и варьируемых факторов.

Так, для СМП с центральными отверстиями при диапазонах варьируемых факторов (амплитуды колебаний рабочей камеры от 1 до 4 мм, частоты ее колебаний от 16 до 34 Гц, массы СМП от 20 до 50 г и массы абразивных гранул от 0,5 до 5 г) выражения для определения  $F(H)$  и  $N\left(\frac{1}{c}\right)$  будут иметь вид

$$F = \frac{A^{0,57} m^{0,83} f^{0,84} m_{\text{гр}}^{0,16}}{1164};$$

$$N = \frac{86 f^{0,51}}{A^{0,24} m^{0,63} m_{\text{гр}}^{0,083}},$$

где  $A$  – амплитуда колебаний рабочей камеры, мм;  $f$  – частота ее колебаний, Гц;  $m$  и  $m_{\text{гр}}$  – соответственно масса детали и масса наполнителя, г.

## 6. Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования отделочно-зачистной обработки СМП и деталей из термопластов проводились на вибрационном станке с объемом рабочей камеры 12 дм<sup>3</sup>. Для обработки деталей из термопластов его рабочая камера и крышка были утеплены пенополистеролом. Охлаждение проводили жидким азотом.

Для проверки адекватности полученных зависимостей для разработки технологии отделочно-зачистной обработки СМП использовались пластины для токарных резцов из двухкарбидного сплава Т15К6, которые в количестве 48 штук закреплялись в кассетном барабане. В качестве наполнителя использовались гранулы ПТ10 электрокорунда белого с зерном 40 мкм и массой 2,6 г. Рабочая жидкость представляла собой 3 % раствор кальцированной соды. Рабочая частота колебаний камеры станка составляла 25 Гц при амплитуде 2,5 мм. Первоначальный радиус округления режущих кромок составлял от 0,2 до 0,04 мкм при угле заострения режущего клина 90°. За время обработки принималось время достижения максимальной величины  $\rho$  в соответствии с ГОСТ 19086–80. Радиус округления режущих кромок измерялся инструментальным микроскопом мод. ММИ-2 с блоком цифровой индикации мод. УЦМ-1М.

На рис. 2 представлены графики изменения радиуса округления режущих кромок  $\rho$  от времени обработки. Экспериментальный график получен

с доверительным интервалом 5 %. Расхождение между экспериментальными и расчетными значениями не превышает 13 %, что подтверждает адекватность полученных зависимостей.

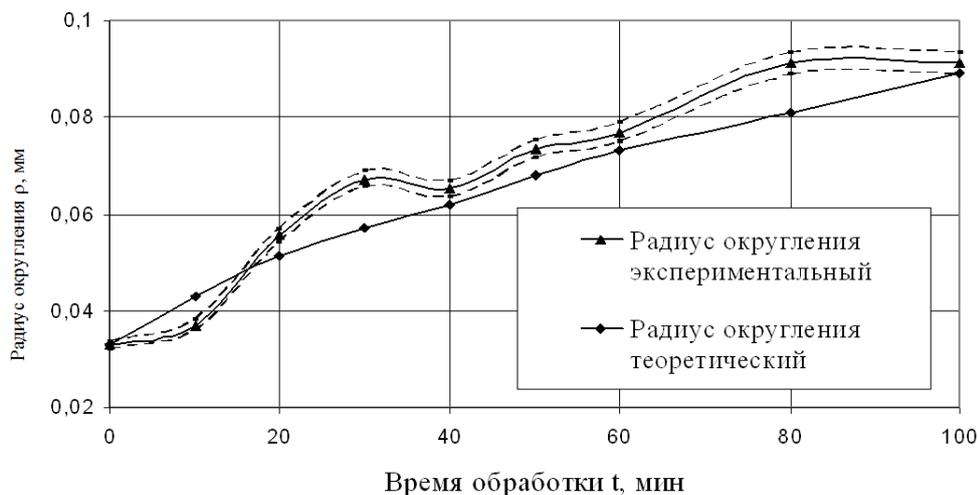


Рис. 2. Графики зависимости радиуса округления  $\rho$  режущей кромки СМП от времени обработки  $t$

Для проверки адекватности полученных зависимостей были проведены эксперименты по удалению грата на поплавке и разделительной тарелке сепаратора, изготовленных из полипропилена, заглушке – из пластифицированного полиэтилена и корпусе механизма – из стеклонеполненного полиамида.

Загрузка рабочей камеры станка составляла 80 % от ее объема, а количество одновременно обрабатываемых одинаковых деталей – от 20 до 33 штук, допустимая длина грата находилась в пределах от 0,3 до 0,5 мм, его толщина – от 0,06 до 0,2 мм. Обработка проводилась стальными шарами различного диаметра.

Используя полученные зависимости по отделочно-зачистной обработке деталей из термопластов, определили режимы предварительного охлаждения и вибрационной обработки, обеспечивающие качественное удаление грата (табл. 1) ( $T_{\text{охр}}$  – температура охрупчивания термопластов;  $t_{\text{охл}}$  – время охлаждения;  $A$  и  $F$  – амплитуда и частота колебаний рабочей камеры;  $t_{\text{уд}}$  – время обработки;  $d$  – диаметр стальных шаров).

### Заключение

Зависимости и рекомендации, полученные в ходе проведенных исследований, позволяют разрабатывать технологии отделочно-зачистной обработки деталей из различных хрупких материалов. Предлагаемые технологии и конструкция специальной оснастки позволяют проводить такую обработку без сколов и выкрашиваний элементов деталей, которые являются в таких случаях наиболее распространенными дефектами.

Таблица 1

Режимы предварительного охлаждения и обработки деталей из термопластов

Деталь	Режимы					d, мм
	предварительного охлаждения		вибрационной обработки			
	$T_{\text{охр}}, \text{K}$	$t_{\text{охл}}, \text{мин}$	A, мм	f, Гц	$t_{\text{уд}}, \text{мин}$	
Поплавок сепаратора	214	7,8	3	45	7,5	5
Разделительная тарелка сепаратора	214	7,8	2,5	45	9	4
Заглушка	143	11,6	3	45	7	5
Корпус механизма	133	12,3	3	45	15	9

**Список литературы**

1. Пат. 2286239 (РФ) С1В24В31/06. Устройство для вибрационной обработки деталей / Трилисский В. О., Панчурин В. В., Большаков Г. С. – 2005126278 ; Заявл. 18.07.2005 ; Оpubл. 27.10.06, Бюл. № 30.
2. **Трилисский, В. О.** Финишная обработка сменных многогранных пластин с центральными отверстиями / В. О. Трилисский, Г. С. Большаков, А. В. Липов, Е. Н. Ярмоленко // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2010. – № 2. – С. 131–137.
3. **Трилисский, В. О.** К вопросу охрупчивания термопластов при низкотемпературном охлаждении / В. О. Трилисский, А. В. Липов, М. Н. Быков, Р. Ш. Мусаев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2006. – № 6. – С. 27–33.
4. **Трилисский, В. О.** Расчет времени охлаждения деталей из термопластов до хрупкого состояния облоя / В. О. Трилисский, А. В. Липов, Р. Ш. Мусаев // Машиностроитель. – 2009. – № 3. – С. 12–14.
5. **Липов, А. В.** К вопросу выбора оборудования для удаления облоя на деталях из термопластов / А. В. Липов, Г. С. Большаков, Р. Ш. Мусаев // Машиностроитель. – 2010. – № 10. – С. 41–44.
6. **Бартенев, Г. М.** Прочность и механизм разрушения полимеров / Г. М. Барте-нев. – М. : Химия, 1984. – 280 с.
7. **Липов, А. В.** Научно-техническая технология удаления облоя на деталях из термопластов / А. В. Липов, Г. С. Большаков, Р. Ш. Мусаев // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2011. – № 4. – С. 27–32.

**Список литературы**

1. Pat. 2286239 (RF) S1V24V31/06. *Ustroystvo dlya vibratsionnoy obrabotki detaley* [Device for parts vibration treatment]. Trilisskiy V. O., Panchurin V. V., Bol'shakov G. S. 27.10.06, no. 30.
2. Trilisskiy V. O., Bol'shakov G. S., Lipov A. V., Yarmolenko E. N. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2010, no. 2, pp. 131–137.
3. Trilisskiy V. O., Lipov A. V., Bykov M. N., Musaev R. Sh. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2006, no. 6, pp. 27–33.
4. Trilisskiy V. O., Lipov A. V., Musaev R. Sh. *Mashinostroitel'* [Mechanical engineer]. 2009, no. 3, pp. 12–14.
5. Lipov A. V., Bol'shakov G. S., Musaev R. Sh. *Mashinostroitel'* [Mechanical engineer]. 2010, no. 10, pp. 41–44.

6. Bartenev G. M. *Prochnost' i mekhanizm razrusheniya polimerov* [Strength and destruction mechanism of polymers]. Moscow: Khimiya, 1984, 280 p.
7. Lipov A. V., Bol'shakov G. S., Musaev R. Sh. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii* [Science intensive technologies in mechanical engineering]. 2011, no. 4. pp. 27–32.

---

***Липов Александр Викторович***

кандидат технических наук, профессор,  
декан факультета машиностроения  
и транспорта, Пензенский  
государственный университет  
(г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: dit@pnzgu.ru

***Lipov Aleksandr Viktorovich***

Candidate of engineering sciences,  
professor, dean of the faculty of mechanical  
engineering and transport, Penza State  
University (Penza, 40 Krasnaya str.)

---

УДК 621-2.002.2

**Липов, А. В.**

**Технология механизированной отделочно-зачистной обработки деталей из хрупких материалов / А. В. Липов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 1 (25). – С. 81–90.**

*И. А. Аверин, И. А. Губич*

## АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ И УПОРЯДОЧЕНИЯ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ<sup>1</sup>

*Аннотация.* Принцип действия приборов нанoeлектроники в основном базируется на поверхностных эффектах, что обуславливает интенсивное использование для их создания материалов с развитой поверхностью, к которым относится пористый оксид алюминия. Однако до сих пор отсутствует единая теория, объясняющая рост при различных условиях формирования упорядоченной оксидной структуры на алюминии, определяющей выходные параметры приборов нанoeлектроники. Проанализированы основные модели формирования гексагонально-упорядоченной структуры оксида алюминия: физико-геометрическая; коллоидно-электрохимическая; плазменная и механических напряжений. Исследованы функциональные зависимости влияния условий формирования методом анодирования на параметры морфоструктуры пористого оксида алюминия, включающие диаметры пор и оксидных ячеек. Это позволило выбрать модель образования упорядоченной структуры оксида алюминия с учетом режимов формирования и физико-химических основ порообразования для метода анодирования.

*Ключевые слова:* пористый оксид алюминия, модели формирования, наноматериалы, упорядоченность, пора, оксидная пленка, режимы формирования, электролит.

*I. A. Averin, I. A. Gubich*

## ANALYSIS OF FORMATION AND ORDERING MODELS OF ALUMINUM OXIDE'S POROUS STRUCTURE

*Abstract.* Action concept of devices in microelectronics is generally based on surface effects, and that stipulates in the process of their production the intensive use of materials with developed surface, such as porous aluminum oxide. However up to date there is still no universal theory explaining the development under various formation conditions of ordered oxide structure on aluminum, that determines the output parameters of nanoelectronic devices. The authors analyzed the main formation models of the hexagonally ordered structure of aluminum oxide: physico-geometrical; colloid-electrochemical; plasma and the model of mechanical stress. The researchers also studied functional dependencies of the influence of formation conditions by anodization on the parameters of porous aluminum oxide morphostructure, including the diameters of pores and oxide cells. This allows to select the formation model of the ordered aluminum oxide structure regarding the modes of formation and physical and chemical basics of cavitation for anodization.

*Key words:* porous aluminum oxide, formation models, nanomaterials, ordering, pore, oxide film, modes of formation, electrolyte.

---

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках поддержки фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере и управлением инновационной политики и специальных проектов Правительства Пензенской области по программе «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» («У.М.Н.И.К.», договор №8/16798 от 1 февраля 2012 г.).

### Введение

Использование наноматериалов с качественно новыми свойствами позволяет создать на их основе приборы, функционирующие за счет взаимодействия отдельных электронов, групп атомов или молекул.

Для изготовления микроэлектромеханических (МЭМ), микрооптоэлектромеханических (МОЭМ) и нанозлектромеханических систем (НЭМС) чаще вместо традиционных (моно- и поликристаллический кремний, арсенид галлия и т.п.) используют такие материалы, как карбид кремния, алмазоподобные пленки, керамико-полимерные материалы, а также материалы с развитой пористой поверхностью (пористые оксиды кремния, титана, алюминия). Поэтому данная работа посвящена анализу процессов формирования пористого оксида алюминия (ПОА) как перспективного материала для создания различных элементов и приборов нано- и микроэлектроники.

Пористый оксид алюминия, представляющий собой массив гексагональных оксидных ячеек с вписанной в центр порой (рис. 1), характеризуется рядом свойств, которые делают его наиболее перспективным из вышеречисленных пористых материалов:

- регулярная, близкая к идеально упорядоченной структура;
- относительная простота управления размерами пор в широком диапазоне;
- высокая однородность пористой структуры, получаемой на больших площадях;
- хорошая воспроизводимость процесса изготовления;
- совместимость процесса получения ПОА со стандартными операциями микроэлектроники [1].

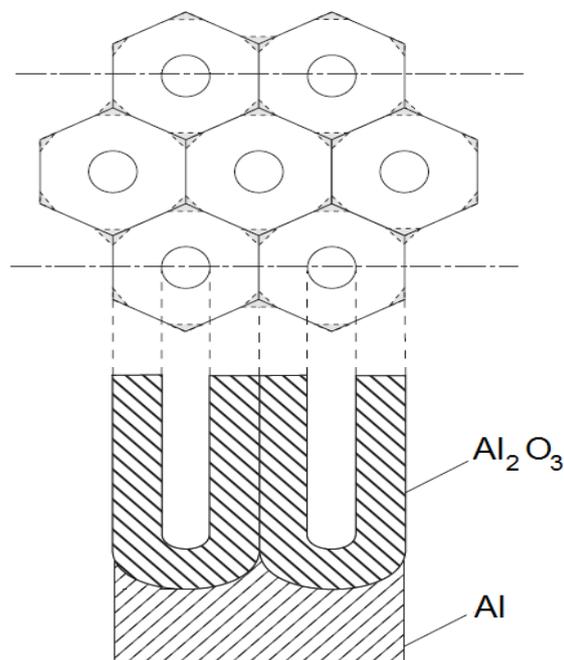


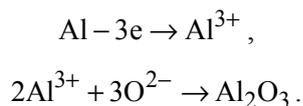
Рис. 1. Схематичное изображение пористого оксида алюминия

Технология формирования пористых матриц алюминия с высокоразвитой морфоструктурой основана на принципе самоорганизации, заключающемся в создании условий, обеспечивающих самостоятельное выстраивание нанообъектов в виде упорядоченных структур, на которые оказывается только внешнее воздействие.

### 1. Теоретические модели образования оксидной пленки на алюминии

В последние десятилетия разработаны несколько физико-химических моделей формирования и упорядочения пористого оксидного слоя.

Физико-геометрическая модель предполагает, что формирование анодной оксидной пленки сводится к росту барьерного слоя, что для алюминия представляется в виде



Вследствие взаимной диффузии ионов  $\text{Al}^{3+}$  и  $\text{O}^{2-}$  под пленкой образуется новый слой  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , который взаимодействует с электролитом и частично растворяется. При этом считается, что на металле вначале образуется беспористый барьерный оксидный слой. Его началом служат линзообразные микрочастицы, срастающиеся в процессе окисления металла в сплошной оксидный слой. Анодный оксид представляет собой плотно упакованные ячейки, которые направлены перпендикулярно к поверхности металла и параллельны друг другу. Поры возникают в центре ячеек в виде цилиндрических каналов. Их основанием служит беспористый барьерный слой. Рост анодного оксида происходит под барьерным слоем за счет удлинения поры ячейки от подтравливающего действия электролита. Полусферическая форма растущей ячейки при этом сохраняется.

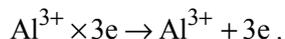
В состав оксида входит значительное количество анионов электролита, что вызвало появление коллоидно-электрохимической модели [2], которая рассматривает фазовые анодные оксиды как коллоидные образования специфической (ориентированной) структуры и свойств, а также показывает влияние воздействия на них анионов электролита.

По этой теории анодный оксид представляет собой ориентированный электрическим полем гель оксида металла. Частицы геля расположены перпендикулярно к поверхности металла. Поры располагаются между волокнистыми частицами оксида и заполнены электролитом. Анионы электролита адсорбируются на внешней поверхности мицелл ориентированного геля, доставляют им необходимую для гидратации воду и препятствуют слиянию частиц в сплошной беспористый слой. В результате электрохимических реакций окисления на аноде возникают зародышевые частицы оксида алюминия, называемые мононами.

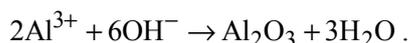
Процесс формирования анодного оксида протекает следующим образом. Если естественная оксидная пленка на металле недостаточно устойчива, то она после некоторого уплотнения за счет гидратации подвергается стравливанию либо пептизации, которая может происходить за счет адсорбции частицами гидратированных анионов электролита (сульфат-ионы, оксалат-

ионы) и вывода ими частиц оксида в раствор. Большое влияние на этот процесс оказывает напряженность электрического поля, так как только под его воздействием может происходить интенсивное внедрение анионов в естественную оксидную пленку.

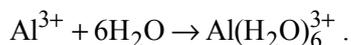
Одновременно под пленкой оксида возникает электродекристаллизация металла (выход ионов из решетки):



Этот процесс протекает интенсивно на активных участках поверхности (микровыступы, грани кристаллов и т.п.). Встреча ионов металла с диффундирующими к аноду ионами окислителя приводит к образованию оксида, например, по уравнению



Гидратируясь, часть ионов металла прорывает фронт растущих частиц оксида и переходит в электролит:



Другая часть расходуется на образование многоядерных гидроксо- и оксокомплексов с координационным числом «шесть». Такой процесс завершается образованием палочкообразных частиц коллоидной степени дисперсности (в сечении). Возникают частицы полиалюмодиаланов, т.е. частицы полимера гидроксида алюминия, в котором проявляются водородные связи и связи через ОН-группы [2].

Рассмотренные процессы протекают непосредственно у поверхности металла, «под пленкой», через которую проникают анионы электролита и сорбируются на растущих (без отрыва в электролит) частицах. Заряженные частицы (палочкообразные, волокнистые мицеллы) ориентируются электрическим полем по нормали к поверхности металла.

Согласно плазменной модели окисления барьерный слой постоянного типа не существует. Теория подразумевает наличие в процессе анодной поляризации прилегающего к металлу и находящегося под оксидной пленкой очень тонкого слоя анионов электролита и воды. Расположенный под анодным оксидом плазменный слой обуславливает равное (без микропробоев) свечение анода, а при выключении тока он преобразуется в сплошной барьерный слой. Рост частиц в высоту происходит из непрерывно обновляющейся низкотемпературной плазмы, которая силой электрического поля выталкивает из себя потоки ионов  $\text{Al}^{3+}$  и дополняет их потерю за счет решетки металла [2].

В модели механических напряжений рассматриваются следующие основные положения [3]:

1) окисление происходит на границе раздела металл–оксид главным образом за счет миграции кислородсодержащих ионов из электролита;

2) растворение (уменьшение толщины) оксидного слоя происходит за счет гидратации формирующегося оксида алюминия;

3) в случае роста оксидной пленки барьерного типа (без образования пор) все ионы  $\text{Al}^{3+}$  достигают границы раздела оксид–электролит и вносят

вклад в рост оксида. Напротив, при образовании пористого оксида алюминия часть ионов  $Al^{3+}$ , диффундирующих через оксидный слой, переходит в раствор, не внося вклад в рост оксидной пленки;

4) в результате равновесия между растворением оксида на границе раздела оксид–электролит и образованием оксида на границе металл–оксид происходит рост пор перпендикулярно поверхности алюминия;

5) окисление металлического алюминия до оксида приводит к увеличению объема элементарной ячейки (в расчете на один атом Al) приблизительно в два раза;

6) объемное расширение при образовании оксида на границе раздела оксид–металл приводит к возникновению сжимающих напряжений в плоскости пленки, которые и являются движущей силой упорядочения пор. Расширение в вертикальном направлении способствует росту стенок пор вверх.

С точки зрения синтеза пористого алюминия с упорядоченной морфологией поверхности развиваются три основных направления:

1. Создание отпечатка на поверхности алюминия с использованием матрицы, изготовленной литографически, представляющей собой массив наноразмерных элементов, и последующее двойное анодирование алюминия (Пат. Япония JP 2002285382, C25D 11/04, 2002).

2. Создание искусственного нанорельефа при помощи сканирующего зондового микроскопа и последующее двойное анодирование алюминия [4].

3. Электрохимическое анодирование с методикой двухступенчатого улучшения регулярности [5–8] (см. также: Пат. Китай CN1614102, C25D 11/04, 2005).

Все эти методики основаны на процессе электрохимического окисления алюминиевой поверхности. Механизм анодного окисления связан с переносом металла и кислорода через растущий оксидный слой под действием электрического поля, возникающего в пленке при приложении напряжения, и с реакциями фазообразования на внутренних и внешних границах оксида.

## 2. Функциональные зависимости параметров морфоструктуры от условий формирования пористого оксида алюминия

Пористая структура оксидной пленки характеризуется несколькими основными параметрами: диаметр и высота пор, диаметр оксидной ячейки, толщина барьерного слоя.

Наибольшее влияние на формирование упорядоченной пористой поверхности анодного оксида алюминия оказывают следующие факторы: режимы формирования (напряжение и плотность тока), состав электролита, температура в зоне реакции.

В литературе встречаются неоднозначные зависимости между диаметром оксидной ячейки и напряжением анодирования. Так, например, в [11] на основании экспериментальных данных установлена следующая линейная зависимость:

$$D_C = -1,7 + 2,8U_A, \quad (1)$$

где  $D_C$  – диаметр оксидной ячейки, нм;  $U_A$  – анодное напряжение, В.

В литературе [10] представлено другое выражение для расчета диаметра ячейки:

$$D_C = kU_A, \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности стационарного роста ПОА, равный 2,5 нм/В.

Графическое представление данных зависимостей приведено на рис. 2. Как видно, обе зависимости имеют линейный вид, но при значениях анодного напряжения, больших 50 В, наблюдается расхождение в значениях диаметра пор. Стоит отметить, что коэффициенты в выражении (1) меняются в зависимости от условий протекания реакции анодного окисления, а в уравнении (2) данная зависимость не учитывается.

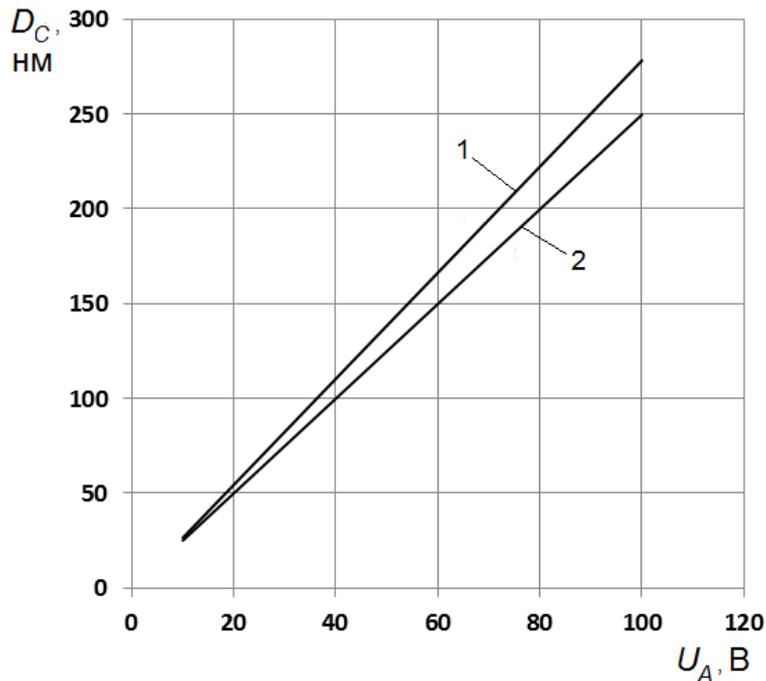


Рис. 2. Рассчитанные зависимости диаметра оксидной ячейки от изменения анодного напряжения в диапазоне от 0 до 120 В: 1 –  $D_C = -1,7 + 2,8U_A$ ; 2 –  $D_C = kU_A$

Зависимость диаметра пор от нескольких параметров процесса анодирования, полученная по эмпирическим данным, приведена в [11]:

$$nD_P = 2,6413 \cdot 10^{17} j^{-0,3189} T^{6,6632}, \quad (3)$$

где  $n$  – число пор на  $\text{см}^2$ ;  $D_P$  – диаметр поры, нм;  $j$  – плотность тока,  $\text{мА}/\text{см}^2$ ;  $T$  – температура электролита, К.

Число пор на единицу площади поверхности рассчитывается по формуле

$$n = n_0 j^{-\alpha}, \quad (4)$$

где  $n_0$  составляет  $5,79 \cdot 10^9$ ;  $112 \cdot 10^9$  и  $176 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ , и  $\alpha$  составляет 0,68; 0,72 и 0,335 для электролитов на основе ортофосфорной, щавелевой и серной кислот соответственно.

В работе [12] зависимость диаметра пор от напряжения анодирования определяется выражением:

$$D_p = 2,06U_A - 13,33, \quad (5)$$

а в [13] функция  $D_p = f(U_A)$  имеет вид

$$D_p = \sqrt{\frac{2\sqrt{3P}}{\pi}} kU_A, \quad (6)$$

где  $P$  – пористость поверхности, %.

Уравнение (3) (рис. 3,а) учитывает взаимосвязь диаметра пор и электрофизических параметров формирования, а именно плотности тока и температуры в зоне реакции. Линейная зависимость (5) в основном справедлива для электролитов на основе серной, щавелевой и смеси этих кислот. Значения диаметра пор, полученные для электролитов на основе щавелевой кислоты, имеют максимальный разброс при напряжениях анодирования больше 50 В (рис. 3,б). Выражение (6) справедливо при условии 10 % пористости поверхности, а при значениях пористости 12 % экспериментальные данные рознятся с теоретическими расчетами (рис. 3,в).

В зависимости от выбора состава электролита, а именно типа и концентрации кислоты, формируются оксидные пленки с порами различного диаметра (табл. 1). Из анализа данных табл. 1 следует, что существует корреляция между типом кислоты для электролита и анодным напряжением.  $Al - 3e \rightarrow Al^{3+}$ . Это объясняется разницей в способности встраивания анионов электролитов в оксидную пленку, которая возрастает от фосфорной к серной кислоте ( $PO_4^{3-} \rightarrow COOH^- \rightarrow SO_4^{2-}$ ).

Таблица 1

Взаимосвязь между диаметрами пор оксидных ячеек и режимами формирования [1]

Электролит	Напряжение формирования, В	Диаметр оксидной ячейки, нм	Диаметр пор, нм
$H_2SO_4$	5–25	13–65	20–40
$(COOH)_2$	30–60	80–160	50–120
$H_3PO_4$	60–150	150–400	120–250

Температура в зоне реакции играет важную роль в процессе получения упорядоченной пористой поверхности. При понижении температуры до 0 °С равновесие между процессами образования и растворения оксида алюминия нарушается, что приводит к преобладанию процесса образования пористого оксида. Однако при температурах ниже 0 °С для предотвращения замерзания электролита необходимо использовать смачиватели.

### Заключение

В результате анализа теоретических моделей образования гексагонально-упорядоченной структуры пор выявлены следующие недостатки:

1) физико-геометрическая модель не объясняет: связь между составом и структурой барьерного и пористого слоев; химические реакции, протекаю-

щие под барьерным слоем; механизм преобразования сплошного барьерного в пористый слой. Не ясен механизм преобразования сплошного барьерного в пористый слой;

2) коллоидно-электрохимическая модель получила сравнительно широкое распространение, но она не объясняет некоторые особенности роста и строения оксида: свечение анода при анодной поляризации; быстрой полимеризации фазового оксида; ориентации полионов нормально к поверхности металла и т.д.;

3) плазменная модель окисления больше подходит к описанию получения оксидов в газах.

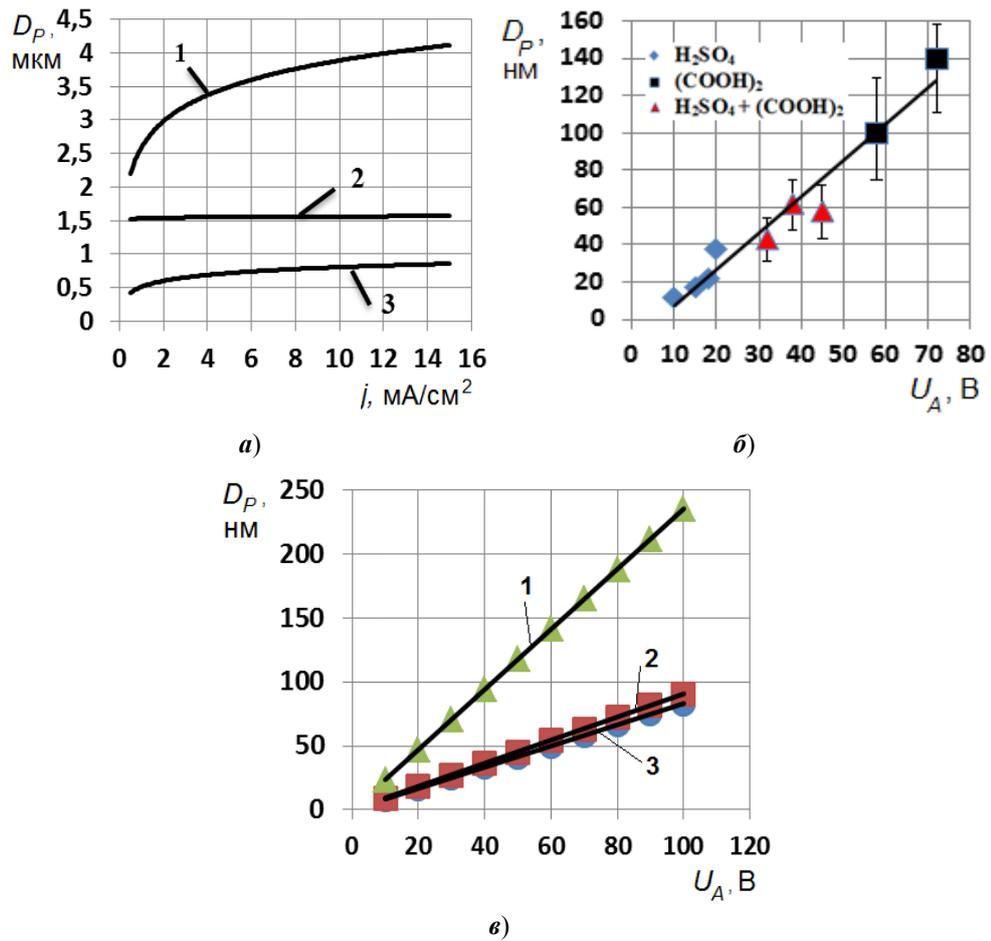


Рис. 3. Зависимости диаметра пор от условий анодирования, построенные по данным литературных источников [13–15]: *a* – расчет по уравнению (3), 1, 2, 3 – электролиты на основе фосфорной, серной и щавелевой кислот соответственно; *б* – расчет по уравнению (5); *в* – расчет по уравнению (6), 1, 2, 3 – пористость структуры 8, 12, 10 % соответственно

Большинством ученых модель механических напряжений признана за основополагающую при описании процесса порообразования и упорядочения оксидной пленки.

Таким образом, для формирования окисла на алюминии с упорядоченными порами необходимо учитывать режимы формирования и физико-химические основы порообразования.

#### Список литературы

1. Нанотехнологии в Электронике / под ред. Ю. А. Чаплыгин. – М. : Техносфера, 2005. – 450 с.
2. **Аверьянов, Е. Е.** Справочник по анодированию / Е. Е. Аверьянов. – М. : Машиностроение, 1988. – 224 с.
3. **Jessensky, O.** Self-organized formation of hexagonal pore arrays in anodic alumina / O. Jessensky, F. Müller, U. Gösele // *Applied Physics Letters*. – 1998. – V. 72. – P. 1173–1175.
4. **Hideki Masuda.** Fabrication of Ideally Ordered Nanohole Arrays in Anodic Porous Alumina Based on Nanoindentation Using Scanning Probe Microscope / Hideki Masuda, Kenji Kanezawa, Kazuyuki Nishio // *Chem. Lett.* – 2002. – P. 1218–1219.
5. **Аверин, И. А.** Формирование и исследование пористых оксидных пленок на алюминии / И. А. Аверин, И. А. Губич, Р. М. Печерская // *Нано- и микросистемная техника*. – 2012. – № 6. – С. 11–14.
6. **Аверин, И. А.** Использование матрицы пористого оксида алюминия в качестве газового сенсора / И. А. Аверин, И. А. Губич // *Надежность и качество* : сб. тр. Междунар. симпозиума. – Пенза, 2012. – Т. 2. – С. 183–184.
7. **Мошников, В. А.** Формирование и анализ структур на основе пористого оксида алюминия / В. А. Мошников, Е. Н. Соколова, Ю. М. Спивак // *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*, 2011. – № 2. – С. 13–19
8. **Александрова, О. А.** Диагностика материалов методами сканирующей зондовой микроскопии : учеб. пособие / О. А. Александрова ; под ред. проф. В. А. Мошникова. – СПб. : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. – 172 с.
9. **Li, A. P.** Hexagonal pore arrays with a 50–420 nm interpore distance formed by self-organization in anodic alumina / A. P. Li, F. Muller, A. Birner, K. Nielsch et al. // *Journal of Applied Physics*. – 1998. – V. 84. – P. 6023–6026.
10. **Vrublevsky, I.** Analysis of porous oxide film growth on aluminum in phosphoric acid using re-anodizing technique / I. Vrublevsky, V. Parkoun, J. Schreckenbach // *Appl. Surface Science*. – 2005. – V. 242. – P. 333–338.
11. **Patermarakis, G.** Interpretation of the promoting effect of sulphate salt additives on the development of non-uniform pitted porous anodic Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> electrolyte by a transport phenomenon analysis theory / G. Patermarakis, K. Moussoutzanis // *Corrosion Science*. – 2002. – V. 44. – P. 1737–1753.
12. **Myung, N. V.** Alumina nanotemplate fabrication on silicon substrate / N. V. Myung, J. Lim, J-P. Fleurial, M. Yun et al. // *Nanotechnology*. – 2004. – V. 15. – P. 833–838.
13. **Nielsch, K.** Self-ordering regimes of porous alumina: The 10 % porosity rule / K. Nielsch, J. Choi, K. Schwirn et al. // *Nano Letters*. – 2002. – V. 2 (7). – P. 677–680.

#### References

1. *Nanotekhnologii v Elektronike, pod red. Yu. A. Chaplygin* [Nanotechnologies in electronics: edited by Yu.A. Chaplygin]. Moscow: Tekhnosfera, 2005, 450 p.
2. Aver'yanov E. E. *Spravochnik po anodirovaniyu* [Anodization manual]. Moscow: Mashinostroenie, 1988, 224 p.
3. Jessensky, O., Müller F., Gösele U. *Applied Physics Letters*. 1998, vol. 72, pp. 1173–1175.
4. Hideki Masuda, Kenji Kanezawa, Kazuyuki Nishio *Chem. Lett.* 2002, pp. 1218–1219.
5. Averin I. A., Gubich I. A., Pecherskaya R. M. *Nano i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano and microsystem technology]. 2012, no. 6, pp. 11–14.

6. Averin I. A., Gubich I. A. *Nadezhnost' i kachestvo: sb. tr. Mezhdunar. simpoziuma* [Reliability and quality: proceedings of the International symposium]. Penza, 2012, vol. 2, pp. 183–184.
7. Moshnikov V. A., Sokolova E. N., Spivak Yu. M. *Izv. SpBGETU «LETI»* [Saint-Petersburg State Electrotechnical University “Leti”]. 2011, no. 2, pp. 13–19.
8. Aleksandrova O. A. *Diagnostika materialov metodami skaniruyushchey zondovoy mikroskopii: ucheb. posobie* [Material diagnostics by scanning probe microscopy]. Saint Petersburg: Izd-vo SPbGETU «LETI», 2012, 172 p.
9. Li A. P., Muller F., Birner A., Nielsch K. et al. *Journal of Applied Physics*. 1998, vol. 84, pp. 6023–6026.
10. Vrublevsky I., Parkoun V., Schreckenbach J. *Appl. Surface Science*. 2005, vol. 242, pp. 333–338.
11. Patermarakis G., Moussoutzakis K. *Corrosion Science*. 2002, vol. 44, pp. 1737–1753.
12. Myung N. V., Lim J., Fleurial J-P., Yun M. et al. *Nanotechnology* [Nanotechnology]. 2004, vol. 15, pp. 833–838.
13. Nielsch K., Choi J., Schwirn K. et al. *Nano Letters*. 2002, vol. 2 (7), pp. 677–680.

---

***Аверин Игорь Александрович***

доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой нано-  
и микроэлектроники, Пензенский  
государственный университет  
(г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: micro@pnzgu.ru

***Averin Igor' Aleksandrovich***

Doctor of engineering sciences, professor,  
head of sub-department of nano  
and microelectronics, Penza State  
University (Penza, 40 Krasnaya str.)

***Губич Иван Алексеевич***

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

E-mail: micro@pnzgu.ru

***Gubich Ivan Alekseevich***

Postgraduate student, Penza State  
University (Penza, 40 Krasnaya str.)

---

УДК 621.315.611

**Аверин, И. А.**

**Анализ моделей формирования и упорядочения пористой структуры оксида алюминия / И. А. Аверин, И. А. Губич // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 2 (26). – С. 91–100.**

Ю. М. Голембиовский, А. А. Костерев, Н. Н. Беспалов

## К ВОПРОСУ ОБ АДАПТАЦИИ СТРУКТУРЫ МНОГОМОДУЛЬНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ИНДУКЦИОННОЙ УСТАНОВКИ

*Аннотация.* Предметом исследования является параллельная работа автономных однофазных инверторов тока на общую индукционную печь. Тема исследования: анализ переходных и установившихся электромагнитных процессов при оперативной адаптации структуры многомодульного источника питания индукционной печи к изменяющимся в процессе плавки параметрам нагрузки. Цель работы: повышение эффективности использования силового оборудования, его надежности и срока службы. Исследования проводились с использованием системы компьютерного моделирования PSIM. Результаты работы: 1) исследован процесс изменения мощности, потребляемой индукционной печью в процессе плавки черных металлов; выделены температурные зоны с отношением потребляемой мощности 2:3:1; 2) разработана компьютерная модель трехмодульной системы электропитания индукционной печи в системе PSIM; 3) исследованы динамические процессы оперативной перестройки состава параллельно работающих инверторных модулей при изменении величины и характера нагрузки; предложены два варианта стратегии адаптации структуры многомодульного источника питания к изменяющимся в процессе плавки параметрам индуктора. Приведенные в статье результаты исследований могут быть использованы проектными организациями и фирмами для создания новых перспективных источников питания индукционных плавильных установок.

*Ключевые слова:* индукционная установка, инвертор, выпрямитель, перестраиваемая структура, параллельная работа.

*Yu. M. Golembiovskiy, A. A. Kosterev, N. N. Bespalov*

## ON THE ISSUE OF ADAPTATION OF THE STRUCTURE OF A MULTIMODULAR POWER SUPPLY OF AN INDUCTION PLANT

*Abstract.* The Object of research is parallel operation of independent single-phase inverters of current for the common induction furnace. Research subject is the analysis of the transition and set electromagnetic processes in the course of operational adaptation of structure of the multimodular power supply of the induction furnace to the loading parameters changing in the course of melting. Operation purpose is to increase the efficiency of use of the power equipment, its reliability and service life. The researches were conducted with the use of the PSIM system of computer simulation. Results of work: 1) the authors have researched the change of the power consumed by the induction furnace in the course of melting of ferrous metals; have isolated the temperature zones with power consumption relation 2:3:1; 2) the researchers have developed a computer model of three-module system of power supply of the induction furnace in PSIM system; 3) the researchers have investigated dynamic processes of operational reorganization of the structure of parallel-operating inverter modules in the event of change of value and character of loading; have suggested two options of adaptation strategy of the structure of a multimodular power supply

to the inductor parameters changing in the course of melting. The results of researches given in the article can be used by the project organizations and firms to create new perspective power supplies of induction melting plants.

*Key words:* induction plant, inverter, rectifier, reconstructed structure, parallel work.

### Введение

Одним из перспективных направлений создания высокоэффективных источников питания индукционных установок является организация многомодульных систем, представляющих собой группу автономных инверторов, работающих на общую нагрузку [1–3]. Такие комплексы имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными источниками питания индукционных установок [4].

Особенностью процесса плавки черных металлов является существенная зависимость параметров индуктора от температуры, что обуславливает широкий диапазон изменения потребляемого тока и, следовательно, отдаваемой в индуктор мощности. На рис. 1 показаны закономерности изменения в процессе плавки некоторых параметров [5–7] источника питания индукционной установки: выходного тока  $I_{инв}$  и полной выходной мощности  $S_{инв}$ . Анализ приведенных кривых показывает, что требуемая для обеспечения нормального режима плавки мощность изменяется 4 раза в процессе нагрева шихты. Это означает, что и КПД источника питания также будет меняться в широких пределах.

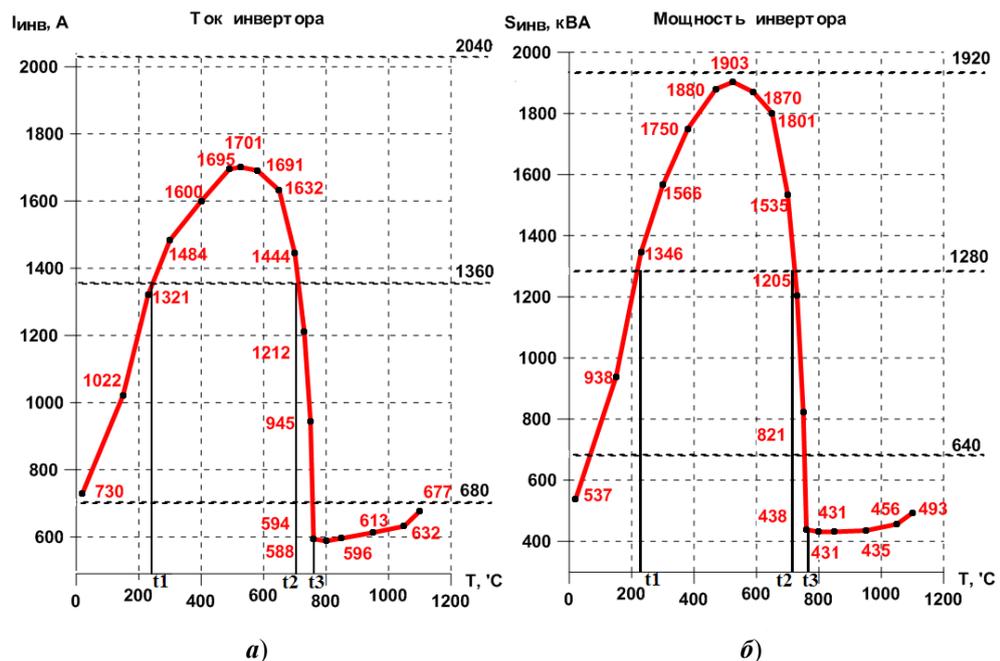


Рис. 1. Изменение выходного тока инвертора и полной мощности в процессе плавки

На кривых рис. 1 можно выделить три зоны, соответствующие трем уровням выходного тока (или полной мощности  $S$ ) источника питания индукционной печи. Максимальные выходные токи каждой из зон соотносятся как

1:2:3. Такое соотношение позволяет ограничиться тремя модулями в составе системы электроснабжения индукционной печи. Если установленные мощности модулей принять одинаковыми, то, ориентируясь на конкретные величины токов, приведенные на рис. 1, следует выбрать такой вентильный комплект для реализации каждого модуля, который обеспечивал бы максимальный выходной ток, равный 680 А (для данного конкретного примера). Что касается класса тиристоров по напряжению, то его целесообразно выбрать одинаковым для всех трех модулей и соответствующим максимальному значению, имеющему место в процессе плавки. В этом случае модули становятся равноценными в смысле адаптации структуры системы электроснабжения к изменяющимся параметрам индукционной печи, что позволяет при надлежащем управлении обеспечить равномерное расходование ресурса работоспособности модулей.

При трехмодульном составе источника электропитания индуктора процесс перестройки его структуры во время плавки должен происходить следующим образом: в диапазоне  $(0...t_1)$  на параллельную работу включаются два модуля, обеспечивающие суммарный выходной ток 1360 А; в интервале  $(t_1, t_2)$  должны работать три модуля с допустимой суммарной токовой нагрузкой 2040 А, что несколько превышает потребность нагрузки, обеспечивая запас по току для обеспечения коммутационной устойчивости на самом тяжелом интервале плавки; на интервале  $(t_2, t_3)$  токовую потребность нагрузки вполне покрывают два модуля, а начиная с момента  $t_3$  для поддержания расплавленного состояния шихты достаточно мощности одного модуля.

Таким образом, на каждом из указанных интервалов должны выполняться условия:

$$\sum_{i=1}^n S_{уст} \geq S_T + \Delta S, \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^k S_{уст} = \min, \quad (2)$$

где  $S_{уст}$  – установленная мощность модуля;  $S_T$  – текущая мощность нагрузки;  $\Delta S$  – мощность запаса для обеспечения надежности;  $n$  – количество модулей в комплексе;  $k$  – число модулей, включенных на параллельную работу.

Формулы (1) и (2) показывают, что на параллельную работу при любой величине и характере нагрузки всегда должно быть включено минимальное количество модулей, но достаточное для питания потребителя с текущими параметрами с учетом некоторого запаса для обеспечения устойчивости инвертора к опрокидыванию.

Интегральной оценкой эффективности применения многомодульных систем может служить отношение полной текущей мощности  $S_T$  потребителя (включающего индукционную печь и блок коммутирующих конденсаторов) к суммарной установленной мощности  $\sum_{i=1}^k S_{уст}$  оборудования, подключенного в данный момент к нагрузке:

$$\Theta = \frac{S_T}{\sum_{i=1}^k S_{уст}} \quad (3)$$

На рис. 2 показаны зависимости показателя эффективности  $\Theta = f(T)$  от температуры шихты в процессе плавки для одномодульного и трехмодульного варианта исполнения источника питания индукционной установки. Для приведенного примера повышение показателя  $\Theta$  при переходе к трехмодульной структуре составляет в среднем 28,5 %. Совершенно очевидно, что с увеличением количества модулей в системе будет возрастать и среднее значение  $\Theta$ .

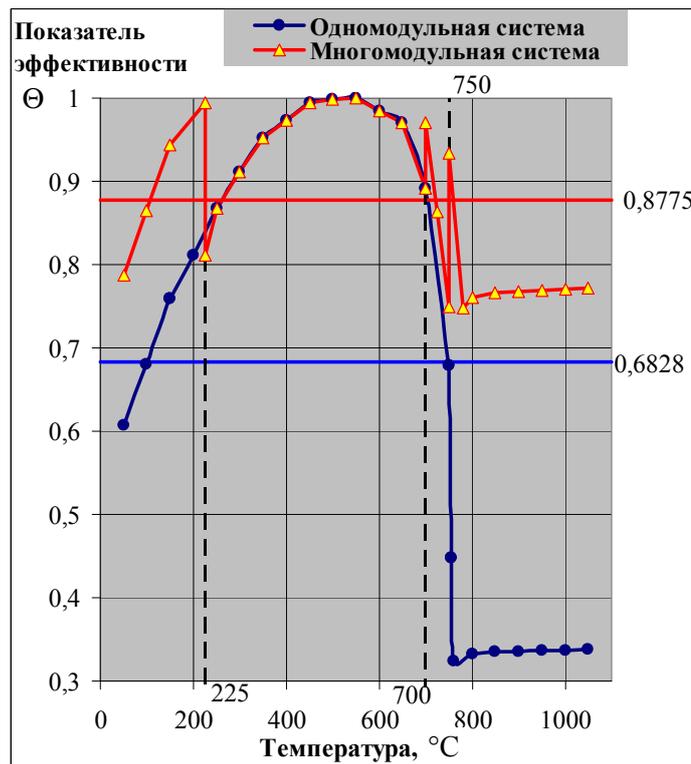


Рис. 2. Показатель эффективности использования источника питания плавильной установки

Организация параллельной работы преобразовательных модулей в составе системы электропитания индукционной печи выявила ряд новых задач, одной из которых является обеспечение устойчивой работы системы при динамической перестройке ее структуры.

### 1. Компьютерная модель источника питания

Для исследования и решения данной задачи разработана компьютерная модель трехмодульной системы электропитания индукционной печи в системе имитационного моделирования PSIM9, показанная на рис. 3.

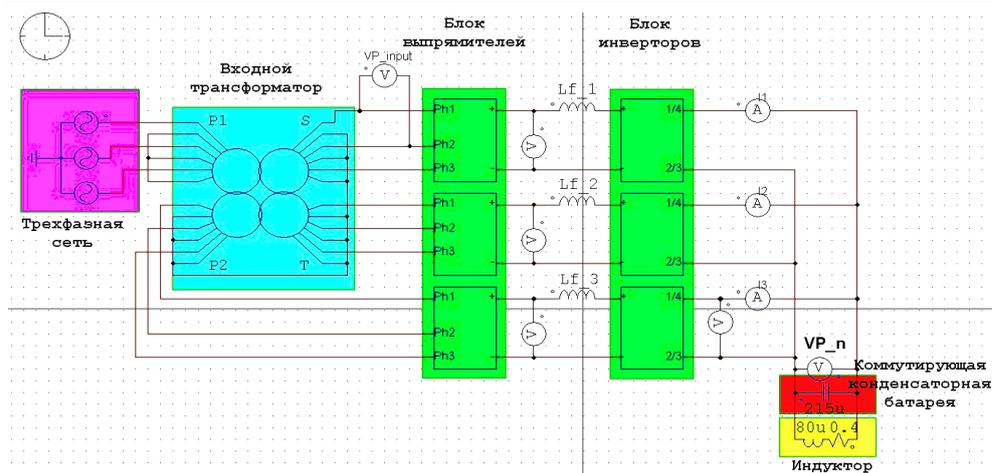


Рис. 3. Модель трехмодульного преобразовательного комплекса в системе PSIM

Модель включает следующие функциональные блоки преобразовательного комплекса: трехфазная сеть промышленной частоты 50 Гц, трехфазный многообмоточный трансформатор для гальванической развязки инверторных модулей между собой, блок управляемых выпрямителей, блок автономных мостовых инверторов и резонансный контур, включающий индуктор и батарею коммутирующих конденсаторов. Каждый выпрямитель представляет собой тиристорный мост с системой управления, корректирующей напряжение на выходе. В среде PSIM существует возможность использовать программируемые на языке «С» блоки. В данной модели такое средство используется в блоке управления для снятия импульсов управления тиристорным мостом в определенные моменты времени. Модель инвертора тока, используемая в исследовании, представляет собой симметричный однофазный мостовой тиристорный инвертор без диодов обратного тока.

## 2. Проблемы адаптации структуры источника питания

С помощью разработанной имитационной модели проведены исследования процессов выключения и включения отдельных модулей на параллельную работу. Было установлено, что процесс отключения одного из модулей не приводит к нарушению нормальной работы системы питания индуктора, т.е. не вызывает срыва инвертирования. Происходит лишь перераспределение мощности между оставшимися параллельно работающими модулями.

Что касается включения модуля на параллельную работу, то этот процесс требует определенных условий. Как показали проведенные на модели исследования, процесс ввода преобразовательного модуля в работу связан с тем, что в течение некоторого времени он работает на противоЭДС, генерируемую другими инверторными модулями. Поэтому включаемый модуль не может выйти на номинальный режим функционирования, либо происходит срыв инвертирования и его аварийное отключение.

## 3. Варианты решения задачи

В процессе исследования был отработан алгоритм перестройки структуры преобразовательного комплекса, отличающийся тем, что при вводе

в работу одного из модулей необходимо повысить выходное напряжение соответствующего управляемого выпрямителя на то время, пока не выровняются входные токи инверторов. После чего следует вернуть прежний уровень напряжения питания инверторов. С учетом инерционности тепловых процессов плавки такое кратковременное рассогласование в функционировании модулей не сказывается на работе индукционной печи.

На рис. 4 показаны временные диаграммы, демонстрирующие процесс перестройки структуры комплекса, при котором сохраняется его устойчивое функционирование. На первых двух диаграммах показаны кривые тока и напряжения на индукторе, представленном в виде изменяющегося активно-индуктивного сопротивления. На трех нижних осях показаны входные токи инверторов.

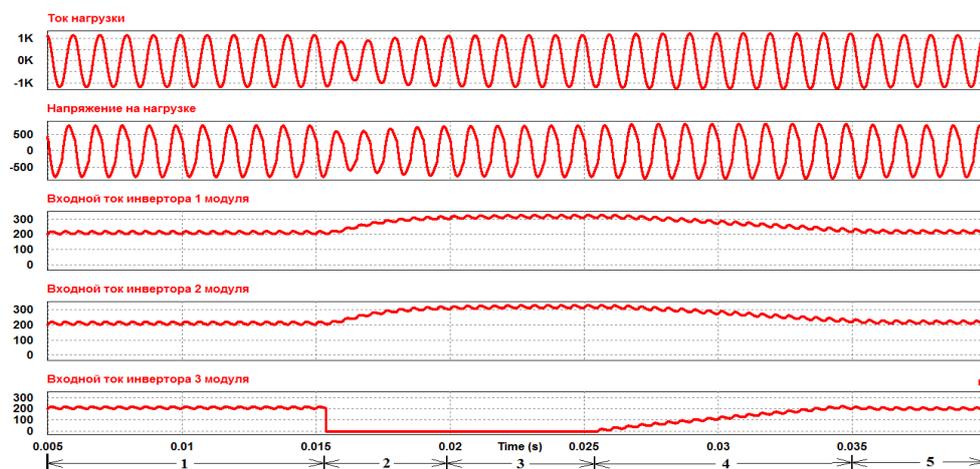


Рис. 4. Перестройка структуры трехмодульного преобразовательного комплекса

Выделенный на рис. 4 временной промежуток не отражает реального хода плавки во времени, он лишь показывает процесс отключения и включения одного из модулей. Условно данный временной интервал можно разбить на пять составляющих его этапов. Первый этап – это установившийся режим работы комплекса с введенными на параллельную работу тремя модулями. Потребляемая нагрузкой мощность распределяется поровну между работающими модулями. Второй промежуток времени демонстрирует отключение третьего модуля и распределение нагрузки между оставшимися в работе первым и вторым модулем. В этот момент на диаграмме видна кратковременная «просадка» напряжения на индукторе и быстрый процесс перехода к установившемуся режиму работы комплекса с новой структурой. Как мы видим, в результате перехода ток и напряжение на нагрузке не изменились. Третий этап показывает устойчивую работу комплекса в конфигурации: два работающих модуля, один резервный.

Если потребляемая нагрузкой мощность возрастет в процессе плавки, то система управления зафиксирует увеличение выходного тока инверторов и примет решение изменить структуру комплекса, увеличив число работающих модулей. Четвертый этап наглядно демонстрирует этот процесс. Как видно из

диаграмм, в момент перестройки структуры не происходит критических скачков по току и напряжению в элементах схемы.

Другим вариантом решения проблемы подключения резервных модулей, который также исследовался на данной имитационной модели, является кратковременное отключение работающих на нагрузку модулей, в течение которого происходит полное рассеивание энергии, запасенной в реактивных элементах схемы, и выравнивание начальных условий включения модулей. После непродолжительной паузы в работу вступает уже новый состав модулей, необходимый для данного этапа плавки. К примеру, рассмотрим случай, когда нагрузка достигает уровня, требующего подключения к двум уже работающим модулям нового (3-го) модуля, сохраняя при этом равномерное распределение мощности между ними. Момент изменения структуры комплекса зафиксирован на рис. 5.

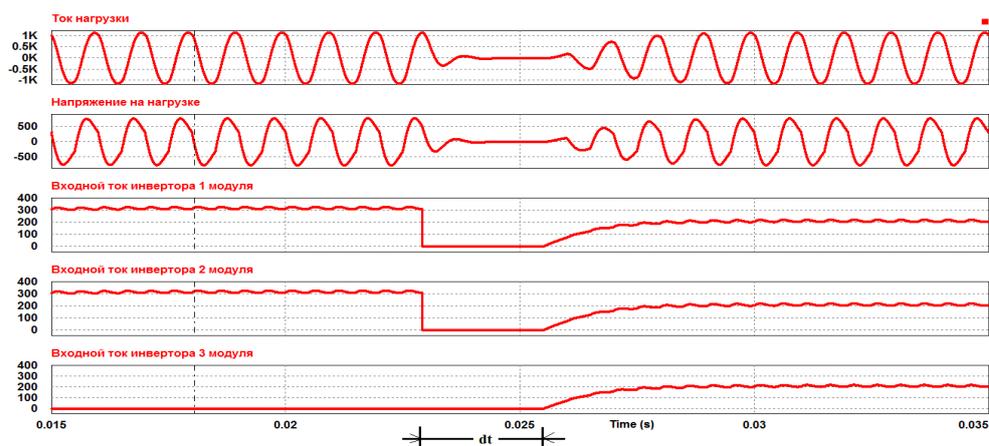


Рис. 5. Перестройка структуры трехмодульного преобразовательного комплекса

Время отключения, достаточное для нормального запуска комплекса, указано как « $dt$ ». С учетом инерционности процесса плавки такое кратковременное отключение не приводит к охлаждению шихты и, как видно из рис. 5, не вызывает появления экстремальных скачков напряжения и тока в элементах схемы.

Данная стратегия может оказаться предпочтительной для тех применений, в которых проблему обеспечения равномерной загрузки модулей можно решить за счет варьирования углов сдвига импульсов управления инверторными мостами. В этом случае оправдано использование неуправляемых выпрямителей в составе преобразовательных модулей, что существенно снизит аппаратные затраты на создание многомодульных источников питания индукционных печей.

Реализацию таких комплексов планируется рассмотреть в последующих публикациях.

### Заключение

Обоснована эффективность построения источников питания индукционных установок в виде параллельно работающих на общую нагрузку преобразовательных модулей. Реализация такого многомодульного комплекса

обеспечивает повышение эффективности использования оборудования системы электропитания индукционных печей, экономию расходования ресурсов работоспособности вентиляционного комплекта и унификацию преобразовательных модулей для проектирования источников любой требуемой мощности.

Разработанная компьютерная модель трехмодульного преобразовательного комплекса позволила исследовать динамику процесса перестройки структуры системы электроснабжения. Были установлены и предложены два варианта включения резервного модуля на параллельную работу: 1) предварительное повышение напряжения питания инверторного моста на время выхода его на режим; 2) кратковременное отключение всех модулей с последующим одновременным запуском комплекса в требуемой конфигурации.

Обе стратегии обеспечивают устойчивость функционирования системы электропитания индукционной печи на всех этапах плавки.

#### **Список литературы**

1. **Адамия, Г. Г.** Распределение нагрузок между параллельно работающими инверторами / Г. Г. Адамия, П. Г. Билинкис, В. А. Чванов // *Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника*. – 1971. – № 17. – С. 15–18.
2. **Адамия, Г. Г.** Принципы построения систем, содержащих параллельно работающие автономные инверторы / Г. Г. Адамия, В. А. Чванов // *Материалы семинара по кибернетике. Часть 1. Динамика систем управления*. – Кишинев : Штинница, 1975. – С. 22–25.
3. **Кантер, И. И.** Система централизованного электроснабжения на базе параллельно работающих преобразователей частоты / И. И. Кантер, Ю. Б. Томашевский, Ю. М. Голембиовский // *Электричество*. – 1991. – № 1. – С. 39–47.
4. **Резчиков, А. Ф.** Адаптивные системы электроснабжения – основа электроэнергетики будущего / А. Ф. Резчиков, Ю. М. Голембиовский // *Вестник Саратовского государственного технического университета*. – 2008. – № 1 (31), № 2. – С. 9–13.
5. **Владимиров, С. Н.** Особенности индукционного нагрева ферромагнитных сталей при различных режимах работы преобразователя частоты / С. Н. Владимиров, С. К. Земан, А. В. Осипов, В. П. Толстов // *Известия вузов. Электромеханика*. – 2004. – № 1. – С. 50–54.
6. **Земан, С. К.** Исследование зависимостей характеристик резонансного контура от конструктивных и электрических параметров системы «Индуктор-нагреваемый объект» / С. К. Земан, А. В. Осипов, М. С. Сахаров // *Известия Томского политехнического университета*. – 2007. – Т. 310, № 1. – С. 197–202.
7. **Голембиовский, Ю. М.** Модульность как средство повышения эффективности систем индукционного нагрева / Ю. М. Голембиовский, А. А. Костерев // *Вестник Саратовского государственного технического университета*. – 2011. – № 4 (62). – С. 145–149.

#### **References**

1. Adamiya G. G., Bilinkis P. G., Chvanov V. A. *Elektrotekhnicheskaya promyshlennost'. Preobrazovatel'naya tekhnika* [Electrical industry. Converting technology]. 1971, no. 17, pp. 15–18.
2. Adamiya G. G., Chvanov V. A. *Materialy seminarov po kibernetike. Chast' 1. Dinamika sistem upravleniya* [Proceedings of the seminar on cybernetics. Part 1. Control system dynamics]. Kishinev: Shtinnitsa, 1975, pp. 22–25.

3. Kanter I. I., Tomashevskiy Yu. B., Golembiovskiy Yu. M. *Elektrichestvo* [Electricity]. 1991, no. 1, pp. 39–47.
4. Rezchikov A. F., Golembiovskiy Yu. M. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Saratov State Technical University]. 2008, no. 1 (31), no. 2, pp. 9–13.
5. Vladimirov S. N., Zeman S. K., Osipov A. V., Tolstov V. P. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [University proceedings. Electromechanics]. 2004, no. 1, pp. 50–54.
6. Zeman S. K., Osipov A. V., Sakharov M. S. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Tomsk Polytechnic University]. 2007, vol. 310, no. 1, pp. 197–202.
7. Golembiovskiy Yu. M., Kosterev A. A. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Saratov State Technical University]. 2011, no. 4 (62), pp. 145–149.

---

**Голембиовский Юрий Мичиславович**

доктор технических наук, профессор,  
кафедра системотехники, Саратовский  
государственный технический  
университет (Саратов,  
ул. Политехническая, 77)

E-mail: drew-007@yandex.ru

**Golembiovskiy Yuriy Michislavovich**

Doctor of engineering sciences, professor,  
sub-department of systems engineering,  
Saratov State Technical University  
(Saratov, 77 Polytechnique str.)

**Костерев Андрей Александрович**

аспирант, Саратовский государственный  
технический университет (Саратов,  
ул. Политехническая, 77)

E-mail: drew-007@yandex.ru

**Kosterev Andrey Aleksandrovich**

Postgraduate student, Saratov State  
Technical University  
(Saratov, 77 Polytechnique str.)

**Беспалов Николай Николаевич**

кандидат технических наук, заведующий  
кафедрой автоматики, Мордовский  
государственный университет  
им. Н. П. Огарева (г. Саранск,  
ул. Пролетарская, 63)

E-mail: drew-007@yandex.ru

**Bespalov Nikolay Nikolaevich**

Candidate of engineering sciences, head  
of sub-department of automatics,  
Mordovia State University named  
after N. P. Ogaryov (Saransk,  
63 Proletarian str.)

---

УДК 621.365.5

**Голембиовский, Ю. М.**

**К вопросу об адаптации структуры многомодульного источника питания индукционной установки / Ю. М. Голембиовский, А. А. Костерев, Н. Н. Беспалов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 2 (26). – С. 101–109.**

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ ЮНГА ТОНКИХ ПЛАСТИН И СТЕРЖНЕЙ С ПОМОЩЬЮ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С ПРИСОЕДИНЕННОЙ МАССОЙ**

*Аннотация.* Описываются оригинальная методика и конструктивные особенности измерительной установки для определения модуля Юнга тонких пластин и цилиндрических стержней методом измерения частоты собственных колебаний колебательной системы с присоединенной массой, образованной из исследуемого образца и дополнительного груза заданной массы. Предлагаемый метод наиболее оптимален для реализации, поскольку он не требует дорогостоящего оборудования, прост в осуществлении и позволяет оперативно и с высокой точностью определять собственные частоты и рассчитать модуль упругости исследуемых образцов. Относительная погрешность измерения модуля нормальной упругости для типичного образца по предлагаемой методике не превышает 2,0 %. Для проверки достоверности определения модуля Юнга на описанной установке были проведены калибровочные измерения частот собственных колебаний опытных образцов с известным химическим составом. Полученные значения модуля Юнга для всех исследованных образцов с точностью до 4 % соответствуют табличным значениям.

*Ключевые слова:* методика, измерительная установка, модуль Юнга, колебательная система, присоединенная масса, линейная зависимость, тонкая пластина, цилиндрический стержень.

## **DETERMINATION OF THE YOUNG'S MODULUS FOR THIN PLATES AND RODS BY VIBRATING SYSTEM WITH THE ASSOCIATED MASS**

*Abstract.* The article describes and original method and constructive specifications of a measuring apparatus for determination of the Young's modulus for thin plates and cylindrical rods by the method of measuring the oscillation frequency of the vibrating system with the associated mass, consisting of the sample under investigation and the an additional weight of certain mass. The suggested method the most optimal for realization due to the lack of need of expensive equipment, simplicity of implementation, operability and high precision of own frequencies determination and calculation investigated sample's modulus of elasticity. The relative error in measuring the modulus of normal elasticity of a typical sample according to the suggested method does not exceed 2,0 %. In order to check the reliability of Young's modulus determination using the said apparatus the authors conducted calibrating measurement of own oscillations frequencies of the prototypes of certain chemical compound. The obtained values of Young's modulus for all investigated samples match the tabular values with up to 4% of accuracy.

*Key words:* methodology, design features, Young's modulus, vibrating system, associated mass, linear dependence, thin plate, cylindrical rod.

## Введение

Из всех свойств, которыми обладают твердые тела, наиболее характерными являются механические свойства – прочность, твердость, пластичность, износостойкость и др. Именно благодаря этим свойствам твердые тела получили столь широкое практическое применение в качестве конструкционных, строительных, электротехнических, магнитных и других материалов, без которых немислимо развитие машиностроительного производства. Влияние химического состава твердых тел на комплекс механических свойств можно достоверно оценить только при помощи специальных приборов и методов измерений упругих параметров. Упругое поведение твердых тел характеризуют упругие параметры. Они являются определяющими при отборе материала для конкретных целей. Поэтому их изучение очень важно как в теоретическом аспекте, так и в современном машиностроении.

### 1. Методы определения упругих параметров твердых тел

В настоящее время существует большое количество методов определения упругих параметров твердых тел. Экспериментальные методы определения модулей упругости можно разделить на две группы – статические и динамические [1].

Статические методы основаны на измерении напряжения и деформации. В настоящее время эти методы практически не применяются из-за невысокой точности.

Динамические методы дифференцируются на две основные группы: резонансные, в которых в образцах возбуждают продольные или поперечные собственные колебания, и импульсные, в которых упругая деформация возбуждается при прохождении через образец звуковой волны.

В лабораторной практике наиболее предпочтительными являются резонансные методы [2]. В резонансных методах в стержневых или плоских образцах длиной  $\ell$  и плотностью  $\rho$  с помощью пьезоэлектрических или магнитострикционных систем возбуждают собственные продольные или изгибные колебания частотой  $f$  от 10 Гц до 25 кГц. По резонансной частоте  $f$  собственных колебаний рассчитывают модуль нормальной упругости  $E$  (модуль Юнга) по известным выражениям [2, 3]:

$$E = 4\rho\ell^2 f^2; E = c \frac{\rho\ell^4}{h^2} f^2. \quad (1)$$

Недостатки резонансных методов обусловлены возбуждением в исследуемом образце нескольких резонансных гармоник, которые ошибочно принимаются за собственные частоты колебаний образца, а также резонансными свойствами источника колебаний, которые сложно учесть во время измерений. Резонансные методы на изгибных колебаниях также имеют ряд недостатков, обусловленных негармоническим характером вынужденных колебаний исследуемого образца на высоких частотах, резонансными гармониками вибратора, а также чисто визуальным способом регистрации условия резонанса образца, который определяется амплитудным методом, погрешность которого составляет 10 %.

## 2. Описание измерительной установки

В данной работе описываются оригинальная методика и конструктивные особенности измерительной установки для определения модуля Юнга тонких пластин и цилиндрических стержней методом измерения частоты собственных колебаний колебательной системы с присоединенной массой, образованной из исследуемого образца и дополнительного груза заданной массы. Предлагаемый метод наиболее оптимален для реализации, поскольку он не требует дорогостоящего оборудования, прост в осуществлении и позволяет оперативно и с высокой точностью определить собственные частоты и тем самым рассчитать модуль упругости исследуемых образцов. Прототипом предлагаемой измерительной установки является конструкция измерительной установки [4]. В качестве образцов используются металлические прямоугольные пластины длиной 100–300 мм, шириной 5–30 мм, толщиной 0,15–1,5 мм и тонкие цилиндрические стержни диаметром 0,5–1,5 мм, длиной 100–300 мм.

Конструкция камеры-держателя приведена на рис. 1, а блок-схема экспериментальной установки – на рис. 2.

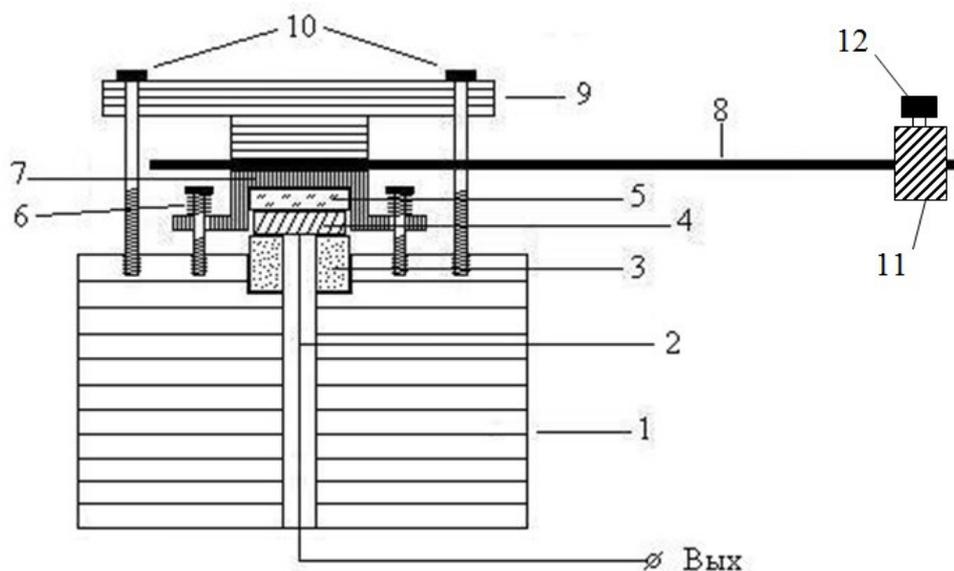


Рис. 1. Конструкция камеры-держателя

Камера-держатель образована массивным опорным цилиндром 1, снабженным осевым каналом, через который вставляется изолированный от камеры токоввод 2. В верхней торцевой части камеры имеется цилиндрическое углубление, в которое вставляются электроизолирующая шайба 3, тонкий токопроводящий металлический диск 4 и датчик механических колебаний 5. В качестве датчика колебаний используется дисковый керамический пьезоэлектрический преобразователь ( $\text{BaTiO}_3$ ) с резонансной частотой от 4 до 7 МГц. Акустический контакт датчика 5 с исследуемым образцом 8 осуществляется через ступенчатую металлическую крышку 7, которая закрепляется с помощью прижимных болтов 6, снабженных спиральными пружинами,

предназначенными для исключения критической деформации и механического разрушения датчика.

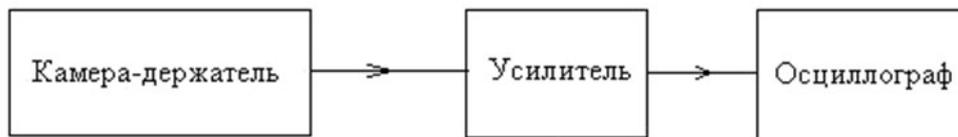


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки

Электрический контакт датчика 5 с электронным блоком осуществляется через коаксиальный ВЧ-кабель типа СР-50. Исследуемый образец 8 в виде тонкого длинного стержня или тонкой прямоугольной пластины закрепляется в зазоре между металлической крышкой 7 и прижимной ступенчатой цилиндрической крышкой 9, которая привинчивается к опорному цилиндру 1 с помощью прижимных болтов 10. Дополнительный груз 11 массой  $m_0$  выполнен в виде короткого цилиндра с боковой прорезью, в которую вставляется верхний свободный конец исследуемого образца. Положение дополнительного груза 11 на свободном конце образца фиксируется с помощью прижимного винта 12.

Предлагаемая конструкция камеры-держателя обеспечивает надежный акустический контакт датчика с исследуемым образцом и электрическую экранировку от внешних электромагнитных полей и механических воздействий, что существенно повышает чувствительность датчика. Периодические колебания, близкие к гармоническим, образуются в результате однократного отклонения свободного конца исследуемого образца от положения устойчивого равновесия. Дополнительный груз на свободном конце образца значительно снижает частоту собственных колебаний, повышает добротность колебательной системы и приближает колебания к гармоническим, что в конечном счете повышает точность измерений модуля Юнга исследуемых образцов.

### 3. Вывод рабочей формулы для определения модуля Юнга

Рассмотрим макет колебательной системы (рис. 3), образованной горизонтально расположенной тонкой упругой прямоугольной пластиной, плотностью  $\rho$ , длиной  $\ell$ , шириной  $a$  и толщиной  $h$ . Нижний конец пластины жестко закреплен в массивной опоре.

В верхней точке свободного конца пластины закреплен дополнительный груз массой  $m_0$ . Обозначим отклонение верхнего конца пластины от положения устойчивого равновесия через  $x$ . Запишем уравнение динамики вращательного движения твердого тела в проекции на ось  $Ox$ :

$$M = J\varepsilon, \quad (2)$$

здесь

$$\varepsilon = \frac{d^2\varphi}{dt^2}; \quad J = J_0 + J_{\Pi}; \quad M = -F \cdot \ell; \quad (3)$$

где  $M$  – модуль момента силы;  $J$  – момент инерции колебательной системы;  $J_{\Pi}$ ,  $J_0$  – момент инерции пластины и дополнительного груза соответ-

ственно относительно точки закрепления пластины;  $\varepsilon$  – угловое ускорение колебательной системы;  $\varphi$  – угол отклонения пластины;  $F$  – модуль силы, приложенной к свободному концу пластины.

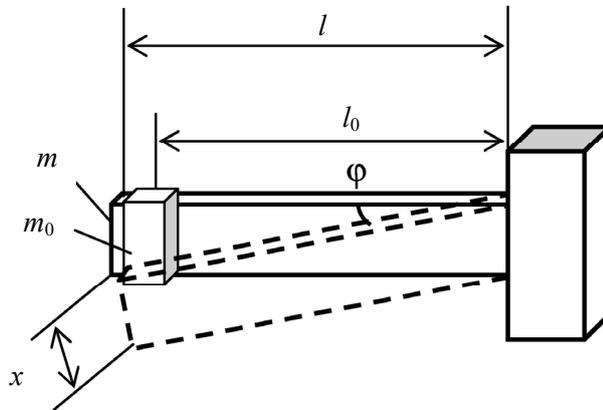


Рис. 3. Макет колебательной системы

С учетом выражений (3) уравнение (2) примет вид

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{F\ell}{J_0 + J_{II}} = 0. \quad (4)$$

При малых значениях  $\varphi \rightarrow 0$  имеем  $\varphi \approx \frac{x}{l}$ , где  $x = \lambda$  – величина прогиба пластины, которая определяется по известной формуле стрелы прогиба однородной балки [4]:

$$\lambda = \frac{4F\ell^3}{Eah^3}, \text{ тогда } F = \frac{Eah^3}{4\ell^3}\lambda. \quad (5)$$

Подставляя (5) в выражение (4) и полагая, что при малых деформациях величина прогиба пластины пропорциональна углу отклонения пластины, т.е.  $\lambda \approx \ell\varphi$ , получим

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{Eah^3}{4(J_0 + J_{II})\ell} \cdot \varphi = 0. \quad (6)$$

Полученное уравнение представляет собой однородное линейное дифференциальное уравнение второго порядка. Момент сил трения и сопротивления при колебаниях пластины много меньше момента возвращающей силы, поэтому в уравнении (6) не учитывается. Из сравнения уравнения (6) с уравнением гармонического осциллятора [5] находим квадрат циклической частоты собственных колебаний пластины:

$$\omega_0^2 = \frac{1}{4} \cdot \frac{Eah^3}{(J_0 + J_{II})\ell}, \quad (7)$$

где  $\omega_0 = 2\pi f$ ,  $J = J_0 + J_{\Pi} = m_0 l_0^2 + \frac{1}{3} m l^2$ ,  $f$  – частота колебаний,  $m = \tau \cdot \ell$ ,  $\tau$  – линейная плотность исследуемого образца.

Решая уравнение (7) относительно величины  $E$ , окончательно находим

$$E = \frac{16\pi^2}{3} \left( 3m_0 \ell_0^2 + \tau \ell^3 \right) \frac{\ell f^2}{ah^3}. \quad (8)$$

При  $m_0 = 0$  и полагая, что масса пластины  $m = \rho V_{\Pi} = \rho l a h$ , получим

$$E = \frac{16\pi^2}{3} \cdot \frac{\rho l^4}{h^2} f^2. \quad (9)$$

Введем обозначение  $16\pi^2 / 3 = c$ , где  $c = 52,58$  – постоянная величина для данной установки при колебательном движении прямоугольной тонкой пластины. Тогда формула для расчета модуля Юнга окончательно примет вид

$$E = c \frac{\rho l^4}{h^2} f^2. \quad (10)$$

Полученная формула в точности совпадает с эмпирическим выражением (1) для модуля Юнга, определяемого по методике А. В. Панова [3].

Аналогичные расчеты для цилиндрического однородного стержня дают следующее выражение для модуля Юнга:

$$E = c \left( 3m_0 \ell_0^2 + \tau \ell^3 \right) \frac{\ell f^2}{d^4}. \quad (11)$$

Здесь значение константы  $c = 64^2 \pi / 9 = 89,3$  ( $d$  – диаметр стержня).

#### 4. Порядок проведения измерений

Порядок определения собственной частоты колебаний исследуемого образца следующий. Один конец исследуемого образца закрепляется между зажимом и крышкой пьезопреобразователя (см. рис. 1). Свободный конец образца приводится в свободное колебательное движение посредством его однократного отклонения от равновесного горизонтального положения. Полученные таким образом свободные (собственные) механические колебания исследуемого образца [3, 5] через прижимную металлическую крышку 7 воздействуют на пьезопреобразователь 5, который за счет прямого пьезоэлектрического эффекта преобразует механические колебания в электрические, которые затем через токоввод, ВЧ-разъем и коаксиальный кабель подаются на вход электронного усилителя. Электронный усилитель охвачен отрицательной обратной связью – системой автоматической регулировки усиления, которая позволяет получить на выходе слабо изменяющиеся по амплитуде синусоидальные сигналы электрических колебаний до необходимого уровня ( $\sim 0,1$  В), которые затем подаются на вход электронного осциллографамультиметра типа ОМЦ-20 (см. рис. 2). На экране осциллографа наблюдается непрерывная синусоида с монотонно убывающей амплитудой. Регулируя болтами 10 силу прижима образца к крышке 7, необходимо добиться, чтобы

полученная кривая была максимально приближена к синусоидальной. Кнопкой горизонтальной развертки осциллографа надо установить необходимую длительность развертки, обеспечивающей визуальное наблюдение отдельных синусоидальных колебаний на экране осциллографа. Электронный осциллограф снабжен блоком электронной памяти и частотомером, что позволяет фиксировать на экране синусоидальные колебания образца и отсчет частоты в цифровой форме. После получения устойчивой осциллограммы электрических колебаний на экране осциллографа осциллограмма фиксируется кнопкой «память», и осуществляется считывание величины частоты синусоидальных собственных колебаний образца в цифровой форме непосредственно с экрана осциллографа. Для нормальной работы осциллографа-мультиметра необходимо, чтобы изменение амплитуды сигнала в процессе измерения не превышало ~10 %, а длительность установившегося режима колебаний содержала не менее десяти колебаний. Измерения частоты проводятся не менее 10 раз.

### 5. Оценка погрешности экспериментальных измерений

Относительная погрешность измерения модуля нормальной упругости исследуемого образца рассчитывалась по известной методике:  $\varepsilon_E = \Delta E / E$ , где величину  $E$  с учетом формул (7), (8) и (10) можно переписать в виде

$$E = cJ \frac{\ell f^2}{ah^3}, \quad (11)$$

тогда

$$\varepsilon_E = \sqrt{\left(\frac{\Delta \ell}{\ell}\right)^2 + \left(\frac{\Delta J}{J}\right)^2 + \left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2 + \left(3\frac{\Delta h}{h}\right)^2 + \left(2\frac{\Delta f}{f}\right)^2}, \quad (12)$$

где величину относительной погрешности момента инерции колебательной системы можно рассчитать по упрощенной формуле:

$$\varepsilon_J = \frac{\Delta J}{J} = \frac{2\Delta \ell}{\ell}. \quad (13)$$

Действительно, выражение для момента инерции колебательной системы (см. выражение (7)) можно упростить, принимая во внимание, что относительная погрешность измерения массы дополнительного груза и линейной плотности исследуемого образца почти на порядок меньше относительной погрешности измерения остальных величин, т.е.

$$J = m_0 \ell_0^2 + \frac{1}{3} \tau \ell^2 \approx \left(m_0 + \frac{1}{3} \tau\right) \ell^2 = k \ell^2. \quad (14)$$

Здесь величины  $\ell_0$  и  $\ell$  приблизительно равны, а  $k$  – постоянная величина. Тогда выражение (12) окончательно примет вид

$$\varepsilon_E = \sqrt{5\left(\frac{\Delta \ell}{\ell}\right)^2 + \left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2 + \left(3\frac{\Delta h}{h}\right)^2 + \left(2\frac{\Delta f}{f}\right)^2}. \quad (15)$$

Геометрические параметры типичных исследуемых образцов соответственно равны:

$$\ell = 150 \text{ мм}; a = 15 \text{ мм}; h = 1,0 \text{ мм}.$$

Абсолютные погрешности измерений геометрических параметров исследуемых образцов – длины, ширины и толщины пластины – соответственно равны:

$$\Delta\ell = 0,5 \text{ мм}; \Delta a = 0,05 \text{ мм}; \Delta h = 0,005 \text{ мм}.$$

Типичное значение частоты собственных колебаний и абсолютная погрешность измерений частоты для исследуемых образцов соответственно равны:

$$\nu_{\text{ср}} = 10 \text{ Гц}; \Delta\nu = 0,05 \text{ Гц}.$$

Подставляя найденные значения абсолютных погрешностей измерений геометрических параметров и частоты в (15), для величины относительной погрешности измерения модуля Юнга получим

$$\varepsilon_E = \sqrt{5\left(\frac{0,5}{150}\right)^2 + \left(\frac{0,05}{15}\right)^2 + \left(3\frac{0,005}{1}\right)^2 + \left(2\frac{0,05}{10}\right)^2} = 1,98 \cdot 10^{-2},$$

или в процентах:

$$\varepsilon_p \% \approx 1,98 \text{ \%}.$$

Таким образом, относительная погрешность измерения модуля нормальной упругости для типичного образца вышеописанным методом не превышает 2,0 %.

Для проверки достоверности определения модуля Юнга на описанной установке были проведены калибровочные измерения частот собственных колебаний опытных образцов с известным химическим составом – медного (МС) и алюминиевого стержней (АС), стальной (СП) и алюминиевой пластин (АП) в зависимости от длины образцов, а также от массы присоединенного груза. Результаты измерений приведены в табл. 1.

Таблица 1

	$\ell$ , мм	$a$ , мм	$h, d$ , мм	$\tau$ , г/мм	$m_0$ , г	$\ell_0$ , мм	$f$ , Гц	$E$ , $10^9$ Па
МС1	150	–	1,67	0,0213	11,82	148	8,97	117,59
АС2	150	–	1,65	0,0062	11,82	148	6,7	64,71
АП3	140	20,55	0,95	0,0496	63,54	146	6,74	79,28
СП1	100	14,6	0,45	0,0499	11,82	98	11,64	207,97

Полученные значения модуля Юнга для всех исследованных образцов с точностью до 4 % соответствуют табличным значениям [2, 3]. Данное отклонение, очевидно, обусловлено отклонением химического состава материалов исследованных образцов от химического состава эталонных материалов.

На рис. 4 показана графическая зависимость частоты собственных колебаний образца СП1 – прямоугольной пластины, изготовленной из трансформаторной стали от квадрата обратной длины исследуемой пластины.

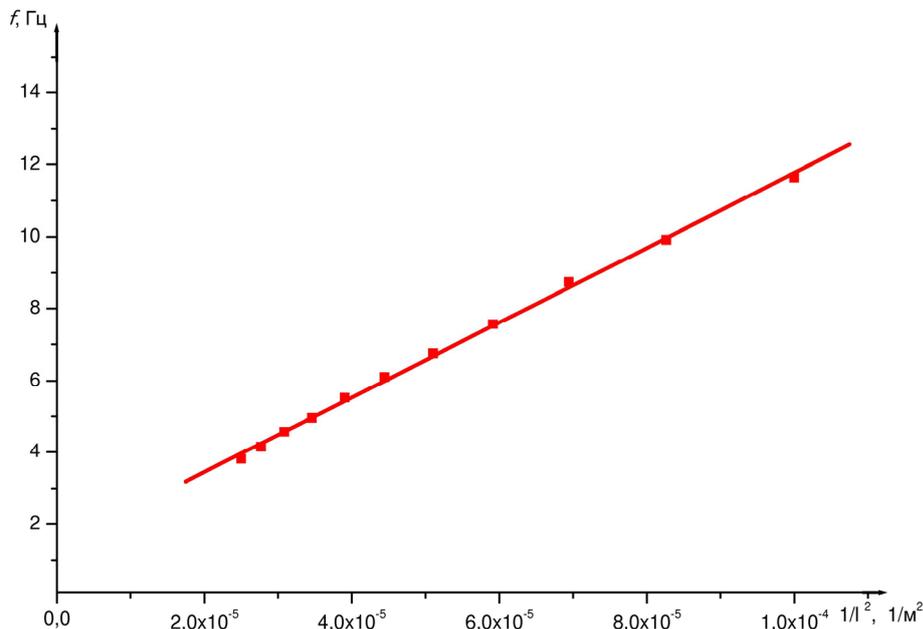


Рис. 4. Зависимость частоты собственных колебаний образца от квадрата обратной длины

Как видно из рис. 4, частота собственных колебаний исследуемой пластины СП1 линейно изменяется от квадрата обратной длины образца. Отклонение отдельных значений частоты от линейной зависимости не превышает 0,1 Гц, что составляет 1,25 %. Полученная линейная зависимость подтверждает справедливость выведенных аналитических выражений (8) и (10) для расчета модуля Юнга и коррелирует с аналогичными выражениями других авторов [2, 3].

#### Список литературы

1. **Гуртов, В. А.** Физика твердого тела для инженеров : учеб. пособие / В. А. Гуртов, Р. Н. Осауленко. – М. : Техносфера, 2007. – 520 с.
2. **Лившиц, Б. Г.** Физические свойства металлов и сплавов / Б. Г. Лившиц, В. С. Крапошин. – М. : Metallurgia, 1980. – С. 288–303.
3. **Кример, Б. И.** Лабораторный практикум по металлографии и физическим свойствам металлов и сплавов / Б. И. Кример, Е. В. Панченко ; под ред. проф. Б. Г. Лифшица. – М. : Metallurgia, 1966. – 248 с.
4. **Рудин, А. В.** Определение упругих параметров твердых тел методом возбуждения собственных колебаний / А. В. Рудин // Университетское образование (МКУО – 2006) : сб. материалов X Междунар. науч.-метод. конф. (13–14 апреля, г. Пенза). – Пенза, 2006. – С. 496–498.
5. **Красильников, В. А.** Введение в физическую акустику : учеб. пособие / В. А. Красильников, В. В. Крылов ; под ред. В. А. Красильникова. – М. : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 400 с.

**References**

1. Gurto V. A., Osaulenko R. N. *Fizika tverdogo tela dlya inzhenerov: ucheb. posobie* [Solid-state physics for engineers: tutorial]. Moscow: Tekhnosfera, 2007, 520 p.
2. Livshits B. G., Kraposhin V. S. *Fizicheskie svoystva metallov i splavov* [Physical properties of metals and alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1980, pp. 288–303.
3. Krimer B. I., Panchenko E. V. *Laboratornyy praktikum po metallografii i fizicheskim svoystvam metallov i splavov* [Laboratory tutorial on metallography and physical properties of metals and alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1966, 248 p.
4. Rudin A. V. *Universitetskoe obrazovanie (MKUO – 2006): sb. materialov X Mezhdunar. nauch.-metod. konf.* [University education. Proceedings of the 10<sup>th</sup> International scientific methodologicval conference]. (13–14 aprelya, g. Penza). Penza, 2006, pp. 496–498.
5. Krasil'nikov V. A., Krylov V. V. *Vvedenie v fizicheskuyu akustiku: ucheb. posobie* [Introduction into physical acoustics: tutorial]. Moscow: Nauka. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, 1984, 400 p.

**Кревчик Владимир Дмитриевич**

доктор физико-математических наук,  
профессор, декан физико-математического факультета,  
Пензенский государственный университет (г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: physics@pnzgu.ru

**Krevchik Vladimir Dmitrievich**

Doctor of physical and mathematical sciences, professor, dean of the faculty of physics and mathematics, Penza State University (Penza, 40 Krasnaya str.)

**Рудин Александр Васильевич**

кандидат физико-математических наук,  
доцент, кафедра физика, Пензенский государственный университет (г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: physics@pnzgu.ru

**Rudin Aleksandr Vasil'evich**

Candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, sub-department of physics, Penza State University (Penza, 40 Krasnaya str.)

**Кочкин Сергей Вячеславович**

кандидат технических наук,  
начальник управления инноваций и предпринимательства, Пензенский государственный университет (г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: physics@pnzgu.ru

**Kochkin Sergey Vyacheslavovich**

Candidate of engineering sciences, head of innovations and entrepreneurship department, Penza State University (Penza, 40 Krasnaya str.)

УДК 531.7; 620.17.081

**Кревчик, В. Д.**

**Определение модуля Юнга тонких пластин и стержней с помощью колебательной системы с присоединенной массой / В. Д. Кревчик, А. В. Рудин, С. В. Кочкин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 2 (26). – С. 110–119.**

## ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЭРЕДИТАРНЫХ СИСТЕМ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

*Аннотация.* Предложен метод идентификации параметров динамических систем, функционирование которых моделируется дифференциальными уравнениями с частными производными дробного порядка по временной и пространственной переменным  $A\partial_{ot}^\alpha u(t, x) = B\partial_{ox}^\beta u(t, x) + g(t, x)$ , с начальными  $\partial_{ot}^{\alpha-k} u(0, x) = a_k(x)$ ,  $k = 1, 2, \dots, m = [\alpha] + 1$ , и краевыми условиями  $\partial_{ot}^{\beta-k} u(t, 0) = b_k(t)$ ,  $k = 1, 2, \dots, n = [\beta] + 1$ . Для определения параметров  $A$ ,  $B$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  к исходной задаче применяется интегральное преобразование Лапласа и искомые параметры определяются методом наименьших квадратов в спектральной области. Предложенный метод применим к дифференциальным уравнениям в частных производных целого порядка, в частности, к эллиптическим, гиперболическим и параболическим уравнениям. Приведены модельные примеры, иллюстрирующие высокую эффективность метода. Предложен метод идентификации параметров динамических систем, описываемых дифференциальными уравнениями с частными производными дробных порядков. Предложенный метод может быть использован в различных предметных областях: информационно-измерительной технике, теплопроводности, химии, астрофизике и т.д.

*Ключевые слова:* дифференциальные уравнения с частными производными дробного порядка, эредитарные системы, распределенные системы, параметрическая идентификация, идентификация параметров.

*I. V. Boykov, N. P. Krivulin*

## PARAMETRIC IDENTIFICATION OF HEREDITARY SYSTEMS WITH DISTRIBUTED PARAMETERS

*Abstract.* The authors suggest a method of parameters identification for dynamic systems, the functioning of which is simulated by the differential equations with fraction order partial derivatives with temporary and spatial variables  $A\partial_{ot}^\alpha u(t, x) = B\partial_{ox}^\beta u(t, x) + g(t, x)$ , with entry  $\partial_{ot}^{\alpha-k} u(0, x) = a_k(x)$ ,  $k = 1, 2, \dots, m = [\alpha] + 1$ , and boundary conditions  $\partial_{ot}^{\beta-k} u(t, 0) = b_k(t)$ ,  $k = 1, 2, \dots, n = [\beta] + 1$ . To determine  $A$ ,  $B$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  parameters to the initial problem the authors use the Laplace integral transformation and the sought parameters are determined by the least square method in the spectral domain. The suggested method may be applied to differential equations in partial derivatives of integral order, in particular, to elliptical, hyperbolic and parabolic equations. The article adduces model examples demonstrating high efficiency of the method. The researchers suggest a method of parameter identification for dynamic systems, described by differential equations with partial derivatives of fraction orders. The suggested method may be applied in various universes of discourse: information measuring technology, thermal conductivity, chemistry, astrophysics etc.

*Key words:* differential equations with partial derivatives of fraction order, hereditary systems, distributed systems, parametric identification, parameter identification.

При исследовании многих динамических систем возникает задача учета последствий, когда система описывается не только мгновенными значениями ее составляющих, но и состоянием системы в предшествующие промежутки времени.

Подобные последствия в последнее время активно исследуются в различных разделах техники, физики, экологии и биологии и получили общее название эредитарности. Учет эредитарности позволяет выявить многие ранее неизвестные свойства динамических систем, а современное состояние вычислительной техники и численных методов позволяет их успешно моделировать. Этими обстоятельствами объясняется активное развитие теории эредитарных процессов в настоящее время. Подробное изложение теории и основные приложения эредитарных процессов содержатся в книгах [1–3].

В большинстве случаев эредитарные процессы описываются дифференциальными уравнениями с дробными производными. Помимо указанных выше книг, имеется большое число публикаций, в которых решается прямая задача – исследование динамического процесса при известных параметрах. Авторам неизвестны работы, в которых исследуется идентификация систем, описываемых уравнениями в частных производных дробных порядков. Этому вопросу посвящена данная работа. Отметим, что идентификация систем, описываемых дифференциальными уравнениями с производными целого порядка, рассматривалась в работах [4–6].

В статье рассматриваются динамические системы, описываемые дифференциальными уравнениями в частных производных дробного порядка

$$A \partial_{0t}^{\alpha} u(t, x) = B \partial_{0x}^{\beta} u(t, x) + g(t, x), \quad (1)$$

с начальными

$$\partial_{0t}^{\alpha-k} u(0, x) = a_k(x), \quad k = 1, 2, \dots, m = [\alpha] + 1, \quad (2)$$

и краевыми условиями

$$\partial_{0t}^{\beta-k} u(t, 0) = b_k(t), \quad k = 1, 2, \dots, n = [\beta] + 1. \quad (3)$$

Напомним определение производных дробного порядка [2]:

$$\partial_{0t}^{\alpha} y(t, x) = \frac{1}{\Gamma(n - \alpha)} \frac{\partial^n}{\partial t^n} \int_0^t \frac{y(\tau, x)}{(t - \tau)^{\alpha - n + 1}} d\tau, \quad n = [\alpha] + 1.$$

**Постановка задачи.** Требуется, зная входной сигнал  $g(t, x)$ , выходной сигнал  $u(t, x)$  для системы (1) с начальными и краевыми условиями (2), (3), найти ее параметры  $A, B, \alpha, \beta$ .

**Решение** поставленной задачи основано на применении метода наименьших квадратов для минимизации функционалов от полиномов с неизвестными коэффициентами и дробными показателями в спектральной области.

Отметим, что преобразование Лапласа для производной дробного порядка имеет следующий вид [6]:

$$L\left[D_{0t}^{\alpha}y(t)\right]=p^{\alpha}Y(p)-\sum_{j=1}^n b_j p^{j-1},$$

где  $Y(p)=\int_0^{+\infty} y(t)e^{-pt} dp$  – преобразование Лапласа функции  $y(t)$ , которое определено в области  $\operatorname{Re} p > \sigma$ , в которой функция  $Y(p)$  является аналитической;  $b_j = D_{0t}^{\alpha-j} y, j=1,2,\dots,n; n=[\alpha]+1$  – значения производных соответствующего порядка функции  $y(t)$  при  $t=0$ .

Применив преобразование Лапласа к уравнению (1) с начальными и краевыми условиями (2), (3) по переменным  $t, x$ , в предположении, что  $U(p_1, p_2) \neq 0$ , получим

$$\begin{aligned} & Ap_1^{\alpha} - Bp_2^{\beta} = \\ & = \frac{A\left(p_1^{m-1}a_1(p_2)+\dots+a_m(p_2)\right)-B\left(p_2^{n-1}b_1(p_1)+\dots+b_n(p_1)\right)}{U(p_1, p_2)} + \frac{G(p_1, p_2)}{U(p_1, p_2)}. \end{aligned} \quad (4)$$

Рассмотрим область  $D=[a, b] \times [c, d]$ , где сегмент  $[a, b]$  расположен в области  $[c, +\infty]$ ,  $c = \max(c_1, c_2)$ , а сегмент  $[c, d]$  расположен в области  $[c', +\infty]$ ,  $c' = \max(c'_1, c'_2)$  и удовлетворяют условиям

$$\begin{cases} G(p_1, p_2) - \text{аналитическая функция при } \operatorname{Re} p_1 \geq c_1, \operatorname{Re} p_2 \geq c'_1; \\ U(p_1, p_2) - \text{аналитическая функция при } \operatorname{Re} p_1 \geq c_1, \operatorname{Re} p_2 \geq c'_1; \\ U(p_1, p_2) \neq 0 \text{ при } \operatorname{Re} p_1 \in [a, b], \operatorname{Re} p_2 \in [c, d]. \end{cases} \quad (5)$$

Введем сетку узлов  $(t_i, \tau_j) \in D$ :

$$\begin{cases} t_i = a + \frac{b-a}{M}i, \quad i=1,2,\dots,M, \\ \tau_j = c + \frac{d-c}{N}j, \quad j=1,2,\dots,N. \end{cases} \quad (6)$$

В области  $D$  для выражения (4) введем функционал

$$\begin{aligned} \Phi(A_1, B_1, \alpha_1, \beta_1) = & \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \left( A_1 t_i^{\alpha_1} - \right. \\ & \left. - B_1 \tau_j^{\beta_1} - \frac{A_1\left(t_i^{m-1}a_1(\tau_j)+\dots+a_m(\tau_j)\right)-B_1\left(\tau_j^{n-1}b_1(t_i)+\dots+b_n(t_i)\right)}{U(t_i, \tau_j)} - \frac{G(t_i, \tau_j)}{U(t_i, \tau_j)} \right)^2. \end{aligned}$$

Параметры  $A_1, B_1, \alpha_1, \beta_1$  находятся методом наименьших квадратов из условия минимума функционала

$$\Phi(A_1, B_1, \alpha_1, \beta_1) \rightarrow \min.$$

Из необходимого условия минимума функционала имеем систему

$$\left\{ \begin{aligned} & A_1 \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \varphi_1^2(t_i, \tau_j) - B_1 \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \varphi_2(t_i, \tau_j) \varphi_1(t_i, \tau_j) - \\ & - \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{G(t_i, \tau_j)}{U(t_i, \tau_j)} \varphi_1(t_i, \tau_j) = 0, \\ & A_1 \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \varphi_1(t_i, \tau_j) \varphi_2(t_i, \tau_j) - B_1 \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \varphi_2^2(t_i, \tau_j) - \\ & - \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{G(t_i, \tau_j)}{U(t_i, \tau_j)} \varphi_2(t_i, \tau_j) = 0, \\ & A_1 \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \varphi_1(t_i, \tau_j) t_i^{\alpha_1} \ln(t_i) - B_1 \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \varphi_2(t_i, \tau_j) t_i^{\alpha_1} \ln(t_i) - \\ & - \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{G(t_i, \tau_j)}{U(t_i, \tau_j)} t_i^{\alpha_1} \ln(t_i) = 0, \\ & A_1 \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \varphi_1(t_i, \tau_j) t_i^{\beta_1} \ln(\tau_i) - B_1 \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \varphi_2(t_i, \tau_j) t_i^{\beta_1} \ln(\tau_i) - \\ & - \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{G(t_i, \tau_j)}{U(t_i, \tau_j)} t_i^{\beta_1} \ln(\tau_i) = 0, \end{aligned} \right.$$

где  $\varphi_1(t, \tau) = t^{\alpha_1} - \frac{t^{m-1}a_1(\tau) + \dots + a_m(\tau)}{U(t, \tau)}$ ,  $\varphi_2(t, \tau) = t^{\beta_1} - \frac{\tau^{n-1}b_1(t) + \dots + b_n(t)}{U(t, \tau)}$ .

Решая данную систему относительно неизвестных  $A_1, B_1, \alpha_1, \beta_1$  получим приближенные значения искоемых параметров  $A, B, \alpha, \beta$ .

Предложенный метод применим и к дифференциальным уравнениям в частных производных целого порядка, причем метод применим к эллиптическим, гиперболическим и параболическим уравнениям.

### 1. Параболические уравнения

Рассмотрим параболическое уравнение

$$a \frac{\partial}{\partial t} u(t, x) = b \frac{\partial^2}{\partial x^2} u(t, x) + g(t, x) \tag{7}$$

с начальными

$$u(0, x) = a_1(x) \quad (8)$$

и краевыми условиями

$$u(t, 0) = b_1(t), \quad u_x(t, 0) = b_2(t). \quad (9)$$

Требуется, зная входной сигнал  $g(t, x)$ , выходной сигнал  $u(t, x)$  для системы (7) с начальными и краевыми условиями (8), (9), найти ее параметры  $a, b$ . Из условия параболичности следует  $a > 0, b > 0$ .

Применив преобразование Лапласа по переменным  $t, x$  для уравнения (7) с начальными и краевыми условиями (8), (9), получим

$$ap_1 - bp_2^2 = \frac{aa_1(p_2) - b(p_2b_1(p_1) + b_2(p_1))}{U(p_1, p_2)} + \frac{G(p_1, p_2)}{U(p_1, p_2)}. \quad (10)$$

В области  $D$ , удовлетворяющей условиям (5), на сетке узлов  $(t_i, \tau_j) \in D$  для выражения (10) определим функционал

$$\Phi(A, B) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \left( At_i - B_1\tau_j^2 - \frac{Aa_1(\tau_j) - B(\tau_jb_1(t_i) + b_2(t_i))}{U(t_i, \tau_j)} - \frac{G(t_i, \tau_j)}{U(t_i, \tau_j)} \right)^2.$$

Параметры  $A, B$  находятся методом наименьших квадратов из условия минимума функционала:

$$\Phi(A, B) \rightarrow \min.$$

Из необходимого условия минимума функционала имеем систему линейных уравнений:

$$\begin{cases} A \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \varphi^2(t_i, \tau_j) - B \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \omega(t_i, \tau_j) \varphi(t_i, \tau_j) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{G(t_i, \tau_j)}{U(t_i, \tau_j)} \varphi(t_i, \tau_j), \\ A \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \varphi(t_i, \tau_j) \omega(t_i, \tau_j) - B \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \omega^2(t_i, \tau_j) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{G(t_i, \tau_j)}{U(t_i, \tau_j)} \omega(t_i, \tau_j), \end{cases}$$

где

$$\varphi(t, \tau) = t - \frac{a_1(\tau)}{U(t, \tau)},$$

$$\omega(t, \tau) = \tau^2 - \frac{\tau b_1(t) + b_2(t)}{U(t, \tau)}.$$

Решая данную систему относительно неизвестных  $A, B$ , получим приближенные значения искомых параметров  $a, b$ .

## 2. Гиперболические уравнения

Рассмотрим волновое уравнение

$$a \frac{\partial^2}{\partial x^2} u(t, x) = b \frac{\partial^2}{\partial x^2} u(t, x) + g(t, x) \quad (11)$$

с начальными

$$u(0, x) = a_1(x), \quad u_t(0, x) = a_2(t) \quad (12)$$

и краевыми условиями

$$u(t, 0) = b_1(t), \quad u_x(t, 0) = b_2(t). \quad (13)$$

Требуется, зная входной сигнал  $g(t, x)$ , выходной сигнал  $u(t, x)$  для системы (11) с начальными и краевыми условиями (12), (13) найти ее параметры  $a$ ,  $b$ . Из условия того, что уравнение (11) гиперболическое, следует  $a > 0$ ,  $b > 0$ .

Применив преобразование Лапласа по переменным  $t, x$  для уравнения (11) с начальными и краевыми условиями (12), (13), получим

$$ap_1^2 - bp_2^2 = \frac{a(p_1 a_1(p_2) + a_2(p_2)) - b(p_2 b_1(p_1) + b_2(p_1))}{U(p_1, p_2)} + \frac{G(p_1, p_2)}{U(p_1, p_2)}. \quad (14)$$

В области  $D$ , удовлетворяющей условиям (5), на сетке узлов (6)  $(t_i, \tau_j) \in D$  для выражения (14) определим функционал

$$\Phi(A, B) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \left( At_j^2 - B_1 \tau_j^2 - \frac{A(t_i a_1(\tau_j) + a_2(\tau_j)) - B(\tau_j b_1(t_i) + b_2(t_i))}{U(t_i, \tau_j)} \right)^2.$$

Параметры  $A, B$  находятся методом наименьших квадратов из условия минимума функционала

$$\Phi(A, B) \rightarrow \min.$$

Из необходимого условия минимума функционала имеем систему

$$\begin{cases} A \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \varphi^2(t_i, \tau_j) - B \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \omega(t_i, \tau_j) \varphi(t_i, \tau_j) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{G(t_i, \tau_j)}{U(t_i, \tau_j)} \varphi(t_i, \tau_j), \\ A \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \varphi(t_i, \tau_j) \omega(t_i, \tau_j) - B \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \omega^2(t_i, \tau_j) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{G(t_i, \tau_j)}{U(t_i, \tau_j)} \omega(t_i, \tau_j), \end{cases}$$

где

$$\varphi(t, \tau) = t^2 - \frac{ta_1(\tau) + a_2(\tau)}{U(t, \tau)},$$

$$\omega(t, \tau) = \tau^2 - \frac{\tau b_1(t) + b_2(t)}{U(t, \tau)}.$$

Решая данную систему относительно неизвестных  $A, B$ , получим приближенные значения искомым параметров  $a, b$ .

### 3. Эллиптические уравнения

Рассмотрим уравнение

$$a \frac{\partial^2}{\partial x^2} u(t, x) + b \frac{\partial^2}{\partial x^2} u(t, x) + \lambda u(t, x) = g(t, x) \quad (15)$$

с начальными

$$u(0, x) = a_1(x), \quad u'_t(0, x) = a_2(t), \quad (16)$$

и краевыми условиями

$$u(t, 0) = b_1(t), \quad u'_x(t, 0) = b_2(t). \quad (17)$$

Требуется, зная входной сигнал  $g(t, x)$ , выходной сигнал  $u(t, x)$  для системы (15) с начальными (16) и краевыми условиями (17), найти ее параметры  $a, b$ . Из условия того, что система эллиптическая, следует  $a > 0, b > 0$ .

Применив преобразование Лапласа по переменным  $t, x$  для уравнения (15) с начальными (16) и краевыми условиями (17), получим

$$ap_1^2 + bp_2^2 + \lambda = \frac{G(p_1, p_2)}{U(p_1, p_2)} - \frac{a(p_1 a_1(p_2) + a_2(p_2)) + b(p_2 b_1(p_1) + b_2(p_1))}{U(p_1, p_2)}. \quad (18)$$

В области  $D$ , удовлетворяющей условиям (5), на сетке узлов  $(t_i, \tau_j) \in D$ , рассмотрим функционал

$$\Phi(A, B) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \left( At_j^2 + B_1 \tau_j^2 + \lambda - \frac{A(t_i a_1(\tau_j) + a_2(\tau_j)) - B(\tau_j b_1(t_i) + b_2(t_i))}{U(t_i, \tau_j)} - \frac{G(t_i, \tau_j)}{U(t_i, \tau_j)} \right)^2.$$

Параметры  $A, B$  находятся методом наименьших квадратов из условия минимума функционала

$$\Phi(A, B) \rightarrow \min.$$

Из необходимого условия минимума функционала имеем следующую систему:

$$\left\{ \begin{aligned} & A \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \varphi^2(t_i, \tau_j) + B \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \omega(t_i, \tau_j) \varphi(t_i, \tau_j) + C \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \varphi(t_i, \tau_j) = \\ & = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{G(t_i, \tau_j)}{U(t_i, \tau_j)} \varphi(t_i, \tau_j), \\ & A \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \varphi(t_i, \tau_j) \omega(t_i, \tau_j) + B \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \omega^2(t_i, \tau_j) + C \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \omega(t_i, \tau_j) = \\ & = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{G(t_i, \tau_j)}{U(t_i, \tau_j)} \omega(t_i, \tau_j), \\ & A \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \varphi(t_i, \tau_j) + B \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \omega(t_i, \tau_j) + CMN = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{G(t_i, \tau_j)}{U(t_i, \tau_j)}, \end{aligned} \right.$$

где  $\varphi(t, \tau) = t^2 - \frac{ta_1(\tau) + a_2(\tau)}{U(t, \tau)}$ ,  $\omega(t, \tau) = \tau^2 - \frac{\tau b_1(t) + b_2(t)}{U(t, \tau)}$ .

Решая данную систему относительно неизвестных  $A, B, C$ , получим приближенные значения искоемых параметров  $a, b, \lambda$ .

**Пример.** Рассмотрим уравнение (14) при  $\lambda = 0$ :

$$a \frac{\partial^2}{\partial t^2} u(t, x) + b \frac{\partial^2}{\partial x^2} u(t, x) = g(t, x), \quad 0 < t < \infty, 0 < x < \infty,$$

с начальными и краевыми условиями (16), (17).

Требуется, зная входной сигнал  $g(t, x)$ , выходной сигнал  $u(t, x)$ , начальные и краевые условия, определить параметры  $a, b$ .

При входном сигнале

$$g(t, x) = 36e^{2x} \sin 3t, \tag{19}$$

выходном сигнале

$$u(t, x) = xe^{2x} \sin 3t, \tag{20}$$

удовлетворяющих начальным и краевым условиям

$$\begin{cases} u(0, x) = 0, u_t(0, x) = 3xe^{2x}, \\ u(t, 0) = 0, u_x(t, 0) = \sin 3t, \end{cases} \tag{21}$$

параметры системы будут иметь вид  $a = 4, b = 9$ .

Изображения входного (19) и выходного (20) сигналов имеют вид

$$G(p_1, p_2) = \frac{108}{(p_1^2 + 9)(p_2 - 2)}, \quad U(p_1, p_2) = \frac{3}{(p_1^2 + 9)(p_2 - 2)^2}. \tag{22}$$

Изображения начальных и краевых условий (21) имеют вид

$$a_1(p_2) = b_1(p_1) = 0, \quad a_2(p_2) = \frac{3}{(p_2 - 2)^2}, \quad b_2(p_1) = \frac{3}{p_1^2 + 9}. \quad (23)$$

Подставляя (22), (23) в (18) ( $\lambda = 0$ ), получим

$$\begin{aligned} ap_1^2 + bp_2^2 &= a(p_1^2 + 9) + b(p_2 - 2)^2 + 36p_2 - 72; \\ 4p_2(9 - b) + (9a + 4b - 72) &= 0, \end{aligned}$$

или

$$\begin{cases} 9 - b = 0, \\ 9a + 4b - 72 = 0. \end{cases}$$

Из полученной системы следует, что  $a = 4$ ,  $b = 9$ , это совпадает с точными значениями.

### Заключение

В работе предложен метод идентификации параметров динамических систем, описываемых дифференциальными уравнениями с частными производными дробных порядков. Приведенный модельный пример показал высокую эффективность метода.

### Список литературы

1. **Нахушев, А. М.** Дробное исчисление и его применение / А. М. Нахушев. – М. : Физматлит, 2003. – 272 с.
2. **Самко, С. Г.** Интегралы и производные дробного порядка и некоторые их приложения / С. Г. Самко, А. А. Килбас, О. И. Марычев. – Минск : Наука и техника, 1987. – 688 с.
3. **Учайкин, В. В.** Метод дробных производных / В. В. Учайкин. – Ульяновск : Артишок, 2008. – 512 с.
4. **Бойков, И. В.** Определение динамических характеристик измерительных преобразователей с распределенными параметрами / И. В. Бойков, Н. П. Кривулин // Измерительная техника. – 2000. – № 9. – С. 29–32.
5. **Бойков, И. В.** Определение временных характеристик линейных систем с распределенными параметрами / И. В. Бойков, Н. П. Кривулин // Метрология 2012. – № 8. – С. 3–14.
6. Методы классической и современной теории автоматического управления : учебник / под ред. К. А. Пупкова, Н. Д. Егупова. – М. : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004 – Т. 1. – 656 с. ; Т. 2. – 640 с. ; Т. 3. – 616 с. ; Т. 4. – 744 с. ; Т. 5. – 784 с.

### References

1. Nakhushev A. M. *Drobnoe ischislenie i ego primenenie* [Fractional calculation and application thereof]. Moscow: Fizmatlit, 2003, 272 p.
2. Samko S. G., Kilbas A. A., Marychev O. I. *Integraly i proizvodnye drobnogo poriyadka i nekotorye ikh prilozheniya* [Integrals and derivatives of fraction order and several applications thereof]. Minsk: Nauka i tekhnika, 1987, 688 p.

3. Uchaykin V. V. *Metod drobnnykh proizvodnykh* [Fractional derivatives method]. Ulyanovsk: Artishok, 2008, 512 p.
4. Boykov I. V., Krivulin N. P. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measuring technology]. 2000, no. 9, pp. 29–32.
5. Boykov I. V., Krivulin N. P. *Metrologiya* [Metrology]. 2012, no. 8, pp. 3–14.
6. *Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya: uchebnik. pod red. K. A. Pupkova, N. D. Egupova* [Methods of classical and modern theory of automatic control: textbook edited by K. A. Pupkov, N. D. Egupov]. Moscow: Izdatel'stvo MGTU im. N. E. Baumana, 2004, vol. 1, 656 p. ; vol. 2, 640 p. ; vol. 3, 616 p. ; vol. 4, 744 p. ; vol. 5, 784 p.

---

**Бойков Илья Владимирович**

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

E-mail: math@pnzgu.ru

**Boykov Ilya Vladimirovich**

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

**Кривулин Николай Петрович**

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

E-mail: math@pnzgu.ru

**Krivulin Nikolay Petrovich**

Candidate of physical and mathematical  
sciences, associate professor,  
sub-department of higher and applied  
mathematics, Penza State University  
(Penza, 40 Krasnaya str.)

---

УДК 681.311

**Бойков, И. В.**

**Параметрическая идентификация эредитарных систем с распределенными параметрами / И. В. Бойков, Н. П. Кривулин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 2 (26). – С. 120–129.**

УДК 629.786.2.05 (075.8)

*В. П. Коновалов, А. С. Макатров, С. А. Богданов,  
В. Ф. Герастовский, А. Т. Куцевалов, В. С. Чаплинский*

## **ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГЛОБАЛЬНОСТИ И ОПЕРАТИВНОСТИ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ РАЗГОННЫМИ БЛОКАМИ РАКЕТ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

*Аннотация.* Контроль выполнения программы выведения космических аппаратов на рабочую орбиту и оценка функционирования бортовых систем разгонных блоков осуществляется по телеметрической и траекторной информации, принимаемой и обрабатываемой средствами наземного измерительного комплекса, расположенными на территории страны. При этом наиболее ответственные участки включения маршевых двигателей разгонных блоков находятся за пределами радиовидимости наземного комплекса. Рассмотрены вопросы повышения оперативности и глобальности телеметрического и траекторного контроля разгонных блоков ракет космического назначения за счет использования космических систем ретрансляции и навигации, а также возможности применения наземных измерительных комплексов не только для контроля полета, но и для управления перспективными разгонными блоками. Многофункциональная космическая система ретрансляции, создаваемая в России на базе нового поколения спутников-ретрансляторов «Луч-5» и «Луч-4», позволит непрерывно контролировать полет разгонных блоков после отделения от ракеты-носителя на опорной орбите, при их переводе на промежуточную и переходную орбиты на высотах до 2000 км, а также на более высоких участках в зонах диаграмм направленности антенн спутников-ретрансляторов. Орбиты выведения космических аппаратов на высокие орбиты находятся в зоне дискретного радионавигационного поля космических навигационных систем. Для определения параметров таких орбит может использоваться технология, сочетающая определение параметров движения по наблюдениям в непрерывном навигационном поле с последующим их уточнением по измерениям в дискретном радионавигационном поле. Совместное использование внешнетраекторной информации, получаемой аппаратурой потребителя космических навигационных систем, и данных инерциальной навигационной системы повышает достоверность работы аппаратуры потребителя космических навигационных систем и точность инерциальной системы. После отработки режимов ретрансляционного контроля разгонных блоков наземный измерительный комплекс может быть преобразован в наземный измерительно-управляющий комплекс, вырабатывающий и передающий на разгонные блоки команды, парирующие отказы и отклонения от программы полета.

*Ключевые слова:* управление, ракета космического назначения, ракета-носитель, разгонный блок, телеметрическая информация, траекторная информация, многофункциональная космическая система ретрансляции, космическая система навигации, навигационная аппаратура потребителя, спутник-ретранслятор.

*V. P. Kononov, A. S. Makatrov, S. A. Bogdanov,  
V. F. Gerastovskiy, A. T. Kutsevalov, V. S. Chaplinskiy*

## **SECURING GLOBAL AND OPERATIVE CONTROL AND DIRECTION OF UPPER-STAGE ROCKETS OF A SPACE CRAFT**

*Abstract.* Control over the execution of a program of spacecraft orbital injection and estimation of upper-stage rocket on-board systems functioning is carried out on the basis of telemetric and trajectory data, received and processed by means of a ground inspection center, located on the territory of a country. At that the most crucial sectors of upper-stage rocket cruise engines' ignition take place beyond the radiovisibility of the ground center. The authors consider the problems of increasing the operative and global rate of telemetric and trajectory control of upper-stage rockets of space crafts via application of space-based relay and navigation systems, as well as the opportunities of using ground inspection centers not only for flight control, but also for directing the perspective upper-stage rockets. A multifunctional space-based relay system, which is being developed in Russia on the basis of the new generation of relay satellites "Luch-5" and "Luch-4", will enable the continuous control over the flight of upper-stage rockets after separation from a carrier rocket on the support orbit during their transfer to the intermediate and transfer orbits at the altitude up to 2000 km, and in the higher sectors of zones of directional patterns of retranslating satellites' antennas. The orbits of space craft injection to higher orbits are located in the zone of discrete radio-navigation field of the space navigation systems. To determine the parameters of such orbits there is a technology combining determination of movement parameters by observations in the continuous navigation field with subsequent adjustment thereof according to the measurements in the discrete radio-navigation field. Joint application of external trajectory data, received by the equipment of space navigation system user, and inertial navigation system data increases authenticity of equipment of a space navigation system user and inertial system precision. After the execution of upper-stage rocket control relay modes the ground inspection center may be reorganized into a ground inspection and control center, elaborating and transferring commands to the upper-stage rockets, counteracting denials and deviations from a flight program.

*Key words:* control, space rocket, carrier rocket, upper stage rocket, telemetric data, trajectory data, multi-purpose data relay system, space navigation systems, user navigation equipment, relay satellite.

### Введение

Проблема передачи информации имеет наиважнейшее значения в современной космонавтике, поэтому главной задачей, решаемой космическим аппаратом (КА) является прием-передача телеметрической информации. Эта функция КА наиболее ответственна, и поэтому работа всех других подсистем подчинена этой задаче – сбору необходимой научной или технологической информации и передача ее на Землю. Таким образом, телеметрическая система КА неразрывно связана с остальными подсистемами аппарата, выполняя при этом главенствующую роль.

Бортовая телеметрическая система обеспечивает сбор информации от различных служебных и научных датчиков, преобразует выходные сигналы этих датчиков в цифровую форму, обеспечивает хранение информации в период между сеансами связи и формирование единого цифрового потока двоичных данных. Можно выделить три основных вида источника данных на космический аппарат [1]:

- системы космического аппарата (электропитание, ориентации, управления, двигательная установка и др.);
- низкоинформативные научные приборы;

– высокоинформативные научные приборы (ТВ-камеры, оптико-механические сканеры и т.п.).

Эти источники информации, как правило, используют общую бортовую систему сбора, преобразования и хранения информации и единую радиолинию «космический аппарат – Земля».

На Земле с выхода телеметрической системы передачи информации сообщения поступают к разным потребителям. Данные о состоянии систем космического аппарата поступают в группу анализа центра управления полетами. Научная информация используется различными научными институтами. Информация от датчиков изображения используется как в интересах управления космическим аппаратом, так и в интересах науки [1].

### **Постановка задачи контроля и управления разгонными блоками ракет космического назначения**

В современной отечественной практике контроль запуска и выведения космических аппаратов на заданные орбиты осуществляется с использованием наземных измерительных средств, размещенных на территории страны. При этом и ракеты-носители (РН), и разгонные блоки (РБ) создаются как технические средства, управление движением и функционированием которых в полете осуществляется автономными системами управления.

Участие наземных средств в управлении полетом ракет космического назначения в настоящее время не предусматривается.

Роль наземного комплекса состоит в приеме и обработке телеметрической и траекторной информации в интересах контроля выполнения программы выведения КА на заданную орбиту и оценки функционирования бортовых систем РН и РБ как в штатных, так и в нештатных ситуациях.

Активные участки траектории РН, как правило, контролируются в полном объеме и непрерывно, прием телеметрической информации осуществляется в реальном времени с использованием измерительных средств космодронов и наземного автоматизированного комплекса управления КА и измерений (НАКУ КА). Исключением являются концы активных участков траектории при запусках на солнечно-синхронные орбиты, когда РН находится за пределами прямой видимости с территории России.

Иные условия складываются при контроле полета РБ. Зона контроля при полете по опорной орбите (высота до 180 км), промежуточной орбите (высота 270...5000 км) и начальной части переходной орбиты на высотах от 400 км до единиц тысяч километров составляет всего 20–30 % траектории. Наиболее ответственные участки включения маршевых двигателей (МД) РБ находятся за пределами радиовидимости наземных измерительных комплексов.

Так, при выведении КА на геопереходную орбиту с космодрома «Байконур» за пределами радиовидимости существующего наземного комплекса находятся многие важные участки полета над районами Тихого и Атлантического океанов, над Южной Америкой, частично над Африкой: вся опорная орбита, второе включение МД для вывода на промежуточную орбиту, включение МД для вывода на переходную орбиту. За пределами наблюдения находятся различные развороты РБ в заданную ориентацию.

При запусках КА с космодрома «Плесецк» на солнечно-синхронные орбиты за пределами радиовидимости проходит полет третьих ступеней РН в конце активного участка траектории, не наблюдаются участки включения МД

РБ над Северной Америкой, над Тихим океаном, над районом Антарктиды, отделение КА над Индийским океаном и Африкой.

В перспективе при запусках с космодрома «Восточный» за пределами радиовидимости окажется полет третьих ступеней РН, а также ряд активных участков полета РБ.

При полете за пределами радиовидимости телеметрическая информация и информация навигационной аппаратуры потребителей космических навигационных систем ГЛОНАСС/*GPS* записывается в бортовое запоминающее устройство и затем передается на измерительный пункт при вхождении в зону их радиовидимости. Полученная информация используется для оценки функционирования РБ и прогнозирования движения по соответствующим участкам орбит выведения. Задержка в получении информации составляет десятки минут и более. В случае возникновения нештатных ситуаций отклонение от расчетной траектории может приводить к потере информации при очередном запланированном сеансе связи и невозможности однозначно установить причины аварии.

Наиболее эффективным путем обеспечения непрерывного контроля полета РБ за пределами радиовидимости с территории России является использование космических систем ретрансляции со спутниками-ретрансляторами (СР) на геостационарных или близких к ним орбитах [2, 3]. Один геостационарный СР обеспечит обзор до 40...50 % поверхности Земли, два разнесенные СР обеспечат обзор до 70–75 %, а три СР могут дать полную глобальность наблюдения объектов ракетно-космической техники на околоземных орбитах.

#### **Многофункциональная космическая система ретрансляции**

Опыт применения СР для управления КА, съема с них целевой информации и приема телеметрической информации с РБ в нашей стране уже имеется. Первые СР были разработаны еще в 80-е годы XX в.

Создание многофункциональной космической системы ретрансляции (МКСР) на базе нового поколения спутников-ретрансляторов «Луч-5», а в перспективе более информативных СР «Луч-4», наряду с задачами обслуживания КА, позволяет эффективно решить и проблему глобальности и оперативности контроля РБ [4].

Первые СР «Луч-5А» и «Луч-5Б» выведены на орбиту в 2011 г. В течение 2–3 лет будет создана МКСР с размещением СР на геостационарной орбите с точками стояния 16°з.д., 95°в.д., 167°в.д. Такая группировка СР обеспечит полную глобальность контроля и управления КА в шаровом поясе вокруг Земли до высот 2000 км.

МКСР «Луч» позволит непрерывно в реальном времени контролировать полет РБ после отделения от РН на опорной орбите, при переводе РБ на промежуточную и переходную орбиты на высотах до 2000 км, а также на более высоких участках в конусообразных пространственных зонах диаграмм направленности антенн СР с углом раскрытия 22°.

Большой опыт применения космических систем ретрансляции имеется за рубежом. Глобальная космическая система ретрансляции *TDRSS* работает в течение более 20 лет в США. Ее радиоканалы по обслуживанию КА, РКН и других летательных аппаратов задействуются суммарно более 100 ч в сут-

ки, в том числе по обеспечению полета международной космической системы. Начала работать космическая система ретрансляции «Тяньлянь-1» в Китае в составе двух геостационарных СР, разнесенных на  $100^\circ$  и охватывающих  $2/3$  земной поверхности.

Для анализа возможностей использования СР типа «Луч-5А(Б)» для информационного обеспечения ракетно-космического назначения (РКН) нужно рассмотреть следующие факторы:

- геометрическую взаимную «видимость» СР – РКН;
- энергетические возможности каналов РКН – СР, ограничивающие потенциальную скорость передачи телеметрической информации.

Первый фактор заключается в том, что гарантированная зона обслуживания абонентов ограничена шаровым поясом с высотой, не превышающей 2000 км из-за возможности отклонения диаграммы направленности антенны СР только в пределах углов  $22^\circ \times 22^\circ$ . В системе TDRSS (США) высота обслуживания абонентов допустима до 10 000 км.

На рис. 1 показано изменение высоты полета РБ на всем участке выведения на геопереходную орбиту. Из рис. 1 следует, что МКСР позволяет принять телеметрическую информацию, а вместе с ней и навигационную информацию из находящихся за пределами радиовидимости наземного комплекса активных участков включений МД РБ, так как они лежат ниже высоты 2000 км.

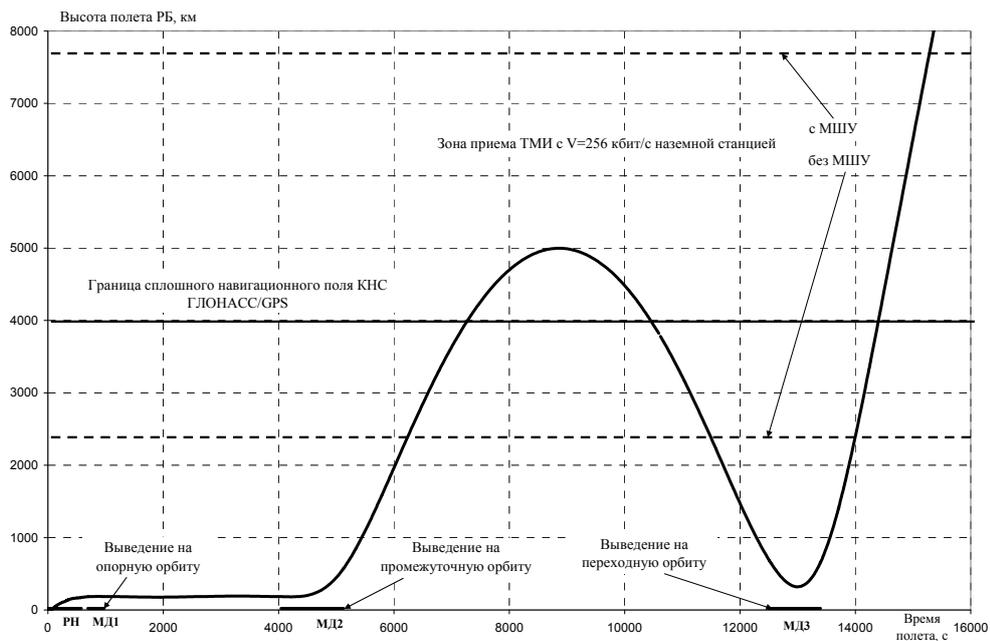


Рис. 1. Зависимость высоты полета РБ от времени на всех участках выведения КА на целевую орбиту

Существующие бортовые радиотелеметрические системы РН и РБ не работают в частотных диапазонах СР ( $S$  и  $Ku$ ), а бортовые антенны являются малоэффективными (коэффициенты усиления лежат в пределах от 0,05 до 2). Поэтому для передачи телеметрической информации через СР требуется со-

здать специальную абонентскую аппаратуру ретрансляции (ААР), работающую в  $S$ - или  $Ku$ -диапазонах с применением помехоустойчивого кодирования. Бортовая антенна ААР должна обеспечивать эквивалентную изотропно-излучаемую мощность от единиц до примерно 20...24 дБВт для передачи телеметрической информации от единиц кбит/с до десятков кбит/с. При этом в  $S$ -диапазоне возможно взаимное наведение антенн РБ и СР по программе, а в  $Ku$ -диапазоне с более узкой диаграммой направленности антенны СР требуется наведение по специальному маяку РБ.

На некоторых РБ особенностью является то, что для соблюдения теплового режима выводимого КА применяется вращение РБ вдоль продольной оси с небольшой угловой скоростью, возможны также развороты РБ по крену на  $180^\circ$ . Для обеспечения связи РБ с СР на время сеанса связи необходимо либо останавливать вращение, либо конструкция антенны должна сохранять направление излучения вне зависимости от вращения.

В аварийных ситуациях при потере РБ ориентации, как и в режиме многостационарного доступа, скорость передачи телеметрической информации через СР «Луч-5А(Б)» с необходимой достоверностью не превысит 1 кбит/с.

Полет РБ в апогейной части промежуточной орбиты и на большей части переходной и целевой орбитах происходит выше шарового пояса высотой 2000 км. В этих условиях прием телеметрической информации через СР типа «Луч-А(Б)» невозможен, и контроль полета РБ должен осуществляться в зоне радиовидимости наземных приемно-регистрирующих станций (НПРС), имеющих эффективные антенные системы Б-529М ( $S_{эф} = 20 \text{ м}^2$ ) и типа ТНА-57 ( $S_{эф} = 57 \text{ м}^2$ ), оборудованные маломощными усилителями. При этом на больших дальностях от НПРС до РБ (более 15000 км) при вращении РБ скорость передачи телеметрической информации приходится снижать с 256 до 32 кбит/с и менее.

На рис. 1 зоны гарантированного приема телеметрической информации от бортовой радиотелеметрической системы отмечены горизонтальными пунктирными линиями для минимального коэффициента усиления бортовой антенны  $G_\delta = 0,05$  в направлении на НПРС, что необходимо учитывать при планировании сеансов передачи телеметрической информации.

В зоне сплошного навигационного поля космических навигационных систем ГЛОНАСС/*GPS* основным источником информации для контроля движения РКН является информация навигационной аппаратуры потребителей (НАП).

При выведении КА на высокие орбиты, в том числе геопереходные и геостационарные, из-за ограниченной ширины диаграммы направленности антенн навигационных КА, отсутствия излучения радиосигналов с навигационных КА (НКА) в верхнюю полусферу, а также радиотени вследствие экранирующего влияния Земли число наблюдаемых НКА с увеличением высоты полета становится меньшим минимально необходимого для оперативного определения полного состава параметров движения разгонного блока. Возникает пространственно-временная дискретность радионавигационного поля космических навигационных систем.

Для определения параметров таких орбит может использоваться технология, сочетающая определение параметров движения по наблюдениям в не-

прерывном навигационном поле с последующим уточнением начальных условий по измерениям в разрывном (дискретном) радионавигационном поле, формируемом даже одним НКА.

Необходимо отметить перспективность для бортовых систем управления движением средств выведения КА совместного использования внешнетраекторной информации, получаемой НАП КНС, и данных инерциальной навигационной системы. Такая интеграция повышает достоверность работы НАП КНС и точность инерциальной системы. Погрешности навигационных определений с использованием КНС существенно зависят от внешних факторов – помеховой обстановки, геометрии используемого созвездия НКА, переломлений навигационного сигнала от элементов конструкции. Навигационные данные, формируемые инерциальной системой, не зависят от внешних воздействий и позволяют исключить аномальные навигационные измерения НАП, в том числе и обусловленные частым изменением состава созвездия спутников. В свою очередь навигационные данные, получаемые с использованием КНС, позволяют исключить накапливающиеся с течением времени погрешности инерциальной навигационной системы. Совместное применение НАП КНС и инерциальной системы навигации обеспечивает и ряд технологических преимуществ, обеспечивая любую требуемую дискретность выдачи навигационной информации. Непрерывная поддержка счисления координат позволяет оперативно восстанавливать функционирование НАП КНС после потери связи с НКА, вызванной, например, выходом РБ из зоны сплошного навигационного поля.

Следует заметить, что значительный вклад в бюджет погрешностей самих навигационных измерений вносит ионосфера. Для существующей практики оснащения РН и РБ одночастотной навигационной аппаратурой потребителя КНС возможная компенсация ионосферных погрешностей на основе моделей ионосферы для РН и РБ малоэффективна вследствие прохождения траектории в различных слоях околоземной электронной концентрации. В то же время использование двухчастотной НАП, которая по массогабаритным параметрам несущественно отличается от одночастотной, позволяет просто и эффективно учитывать ионосферные погрешности.

Состав и объем принимаемых с борта навигационных данных определяется принятыми техническими решениями по обработке информации НАП на борту РН и РБ. Обычно по радиоканалам телеконтроля на Землю передаются полученные навигационные вектора, однако целесообразно обеспечивать также возможность передачи исходных измерений псевдодальности и радиальной псевдоскорости. Исходная навигационная информация позволяет за счет соответствующего программно-математического обеспечения с наивысшей возможной точностью решать на Земле задачу навигационного контроля полета. Данный режим информационного обмена повышает также эффективность процесса летных испытаний бортового навигационного комплекса.

### **Заключение**

Таким образом, после отработки режимов ретрансляционного контроля РБ с использованием МКСП наземный измерительный комплекс может быть преобразован в наземный измерительно-управляющий комплекс, который, принимая и обрабатывая в реальном времени телеметрическую и траекторную информацию, сможет с использованием математического и физического

моделирования полета и применения экспертных систем вырабатывать и передавать на борт РБ команды, парирующие отказы и отклонения от программы полета, и тем самым повысить эффективность и надежность выведения КА и другой космической техники и исключить потери космических объектов при выведении.

### Список литературы

1. **Ильин, В. А.** Телеуправление и телеизмерение / В. А. Ильин. – М., 1982.
2. Системотехнический анализ проблем создания и определения облика многоцелевой космической системы ретрансляции информации с объектов ракетно-космической техники на всех трассах их выведения и в орбитальном полете. Отчеты по НИР «Вереск-2». – М. : Российская академия космонавтики им. К. Э. Циолковского, 2001–2003.
3. Технология глобального информационного обеспечения функционирования ракетно-космической техники. Том 24. Развитие и применение ракетно-космической техники и новых наукоемких технологий в XXI веке. – М., 2005. – Ч. 1.
4. Многофункциональная космическая система ретрансляции «Луч» на базе геостационарных космических аппаратов космического комплекса «Луч-М». Эскизный проект. – НПО ПМ, 2002.

### References

1. Il'in V. A. *Teleupravlenie i teleizmerenie* [Telecontrol and telemetry]. Moscow, 1982.
2. *Sistemotekhnicheskii analiz problem sozdaniya i opredeleniya oblika mnogotselevoy kosmicheskoy sistemy retranslyatsii informatsii s ob"ektov raketno-kosmicheskoy tekhniki na vsekh trassakh ikh vyvedeniya i v orbital'nom polete. Otchety po NIR «Veresk-2»*. [Systems engineering analysis of problem in production and design of a multi-purpose space-based data relay system transmitting data from aircrafts at all the injection pathways and in the orbital flight. Report on research project “Veresk-2”]. Moscow: Rossiyskaya akademiya kosmonavtiki im. K. E. Tsiolkovskogo, 2001–2003.
3. *Tekhnologiya global'nogo informatsionnogo obespecheniya funktsionirovaniya raketno-kosmicheskoy tekhniki. Tom 24. Razvitie i primeneniye raketno-kosmicheskoy tekhniki i novykh naukoemkikh tekhnologiy v XXI veke*. [Technology of global information support of spacecraft functioning. Volume 24. Development and application of spacecrafts and new science intensive technologies in the 21<sup>st</sup> century]. Moscow, 2005, Ch. 1.
4. *Mnogofunktsional'naya kosmicheskaya sistema retranslyatsii «Luch» na baze geostatsionarnykh kosmicheskikh apparatov kosmicheskogo kompleksa «Luch-M»*. [Multi-functional space-based relay system “Luch” on the basis of geosynchronous space craft of the space complex “Luch-M”]. Eskiznyy proekt. NPO PM, 2002.

#### **Коновалов Владислав Петрович**

кандидат технических наук, главный научный сотрудник, Научно-исследовательский институт космических систем имени А. А. Максимова – филиал Государственного космического научно-производственного центра имени М. В. Хруничева (г. Москва, ул. Новозаводская, 18)

E-mail: niiks@khrunichev.com

#### **Konovalov Vladislav Petrovich**

Candidate of engineering sciences, principal researcher worker, Space Systems Research Institute named after A. A. Maksimov – branch of the State Research and Production Space Center named after M. V. Khrunichev (Moscow, 18 Novozavodskaya str.)

***Макатров Александр Сергеевич***

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заместитель директора, Научно-исследовательский институт космических систем имени А. А. Максимова – филиал Государственного космического научно-производственного центра имени М. В. Хруничева (г. Москва, ул. Новозаводская, 18)

E-mail: niiks@khrunichev.com

***Богданов Сергей Анатольевич***

инженер, начальник комплекса, Научно-исследовательский институт космических систем имени А. А. Максимова – филиал Государственного космического научно-производственного центра имени М. В. Хруничева (г. Москва, ул. Новозаводская, 18)

E-mail: niiks@khrunichev.com

***Герастовский Вячеслав Федорович***

инженер, заместитель начальника комплекса, Научно-исследовательский институт космических систем имени А. А. Максимова – филиал Государственного космического научно-производственного центра имени М. В. Хруничева (г. Москва, ул. Новозаводская, 18)

E-mail: niiks@khrunichev.com

***Куцевалов Александр Тимофеевич***

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, начальник отдела, Научно-исследовательский институт космических систем имени А. А. Максимова – филиал Государственного космического научно-производственного центра имени М. В. Хруничева (г. Москва, ул. Новозаводская, 18)

E-mail: niiks@khrunichev.com

***Makatrov Aleksandr Sergeevich***

Candidate of engineering sciences, senior researcher worker, deputy director, Space Systems Research Institute named after A. A. Maksimov – branch of the State Research and Production Space Center named after M. V. Khrunichev (Moscow, 18 Novozavodskaya str.)

***Bogdanov Sergey Anatol'evich***

Engineer, head of the complex, Space Systems Research Institute named after A. A. Maksimov – branch of the State Research and Production Space Center named after M. V. Khrunichev (Moscow, 18 Novozavodskaya str.)

***Gerastovskiy Vyacheslav Fedorovich***

Engineer, deputy head of the complex, Space Systems Research Institute named after A. A. Maksimov – branch of the State Research and Production Space Center named after M. V. Khrunichev (Moscow, 18 Novozavodskaya str.)

***Kutsevalov Aleksandr Timofeevich***

Candidate of engineering sciences, senior researcher worker, head of department, Space Systems Research Institute named after A. A. Maksimov – branch of the State Research and Production Space Center named after M. V. Khrunichev (Moscow, 18 Novozavodskaya str.)

**Чаплинский Владимир Степанович**

доктор технических наук, профессор,  
главный научный сотрудник,  
Научно-исследовательский институт  
космических систем имени  
А. А. Максимова – филиал  
Государственного космического  
научно-производственного центра  
имени М. В. Хруничева (г. Москва,  
ул. Новозаводская, 18)

E-mail: niiks@khrunichev.com

**Chaplinskiy Vladimir Stepanovich**

Doctor of engineering sciences, professor,  
principal scientific worker, Space  
Systems Research Institute named  
after A. A. Maksimov – branch of the State  
Research and Production Space Center  
named after M. V. Khrunichev  
(Moscow, 18 Novozavodskaya str.)

---

УДК 629.786.2.05 (075.8)

**Обеспечение глобальности и оперативности контроля и управления разгонными блоками ракет космического назначения** / В. П. Коновалов, А. С. Макастров, С. А. Богданов, В. Ф. Герастовский, А. Т. Куцевалов, В. С. Чаплинский // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 2 (26). – С. 130–139.

*М. Н. Игнатов, А. М. Игнатова, А. Е. Канина*

## **ИДЕНТИФИКАЦИЯ И ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ**

*Аннотация.* Для идентификации и изучения свойств неметаллических включений в металлах предлагается использовать методы наноиндентирования и растровой электронной микроскопии, поскольку они позволяют получить точные данные о включениях размером менее 100–50 мкм и обеспечивают точность математического моделирования внутренних напряжений в металле, содержащем их. Представлены исследования неметаллических включений в сварных соединениях трубопроводов, доказано, что они представлены не чистыми оксидами, а сложными минеральными фазами, имеют сложную морфологию. Это приводит к тому, что реальная площадь поверхности увеличивается и отличается от теоретической в 2 раза, а это значительно занижает расчетные значения надежности сварных соединений. Рекомендовано использовать полученные данные для более точного моделирования и прогнозирования надежности сварочных соединений.

*Ключевые слова:* сварка, сталь, сварные соединения трубопровода, неметаллические включения, синтетические минеральные сплавы.

*М. N. Ignatov, A. M. Ignatova, A. E. Kanina*

## **IDENTIFICATION AND PROPERTIES OF NONMETALLIC INCLUSIONS IN WELDED JOINTS**

*Abstract.* In order to identify and study the properties of non-metallic inclusions in metals the article suggests to use the methods of nanoindentation and SEM, as they provide accurate data on the inclusions of the size of less than 100-50 microns and provide accurate mathematical modeling of internal stresses in the metal containing them. The article presents the study of non-metallic inclusions in the welded pipe joints. It is proved that they are not pure oxides and complex mineral phases have a complex morphology. This leads to the fact that the actual surface area increases, and differs from the theoretical 2-fold, and this significantly lowers the reliability of the calculated welded joints. It is recommended to use the obtained data for more accurate modeling and predicting the reliability of welded joints.

*Key words:* welding, steel welded pipe connections, non-metallic inclusions, synthetic mineral alloys.

### **Введение**

Большинство конструкций из стали монтируется с помощью сварки, в то же время именно сварные соединения являются наиболее уязвимым участком конструкций, зачастую из-за их износа или разрушения происходят серьезные аварии. Причины выхода из строя сварных соединений могут быть различны, однако наиболее распространенной являются неметаллические включения (НВ) [1]. Основная часть НВ, как правило, влияет на усталостные свойства сталей. Усталостное разрушение стали начинается у микротрещин, которые могут образоваться в результате разрушения самого включения, от-

рыва по внутренней границе в многофазных включениях или отрыва по границе раздела между включением и металлической матрицей. Причины возникновения зародышевых трещин от неметаллических включений – это различие в термоупругих характеристиках металлической матрицы и включения. Наиболее важные факторы, определяющие, является ли включение критическим для зарождения трещины, – это его химический состав, размер, форма, плотность распределения и расположение относительно поверхности.

Хрупкое разрушение могут вызвать как крупные включения, так и скопление мелких включений. Неметаллические включения увеличивают анизотропию свойств, особенно показатели пластичности – относительное удлинение и сужение, и играют большую роль в усталостной прочности стали [2, 3].

Состав и морфология включений в сталях различны и зависят от способа ее производства и обработки. Размер НВ находится в диапазоне от 5 мкм и меньше в стальных слитках, до 100 мкм и более в листовом стальном прокате. Несмотря на то, что все существующие технологические усовершенствования по производству стали и изделий из нее направлены на максимальное снижение концентрации НВ, их доля остается весьма значительной, например, кремнеземистых включений содержится около  $10^8$  в  $1 \text{ см}^3$  [4]. Загрязненность готовой металлопродукции НВ регламентируют стандарты, устанавливающие ограничение по концентрации серы и кислорода в металле и максимально допустимый размера включений, согласно этим стандартам качество металлопродукции оценивают по системе баллов [5].

НВ могут быть причиной не только механического и усталостного разрушения, но и могут спровоцировать аномально высокую скорость коррозии стали. Вызывают подобный деструктивный процесс НВ особого типа, которые условно названы коррозионно-активными неметаллическими включениями (КАНВ) [6].

НВ, вне зависимости от того, к какому типу они относятся, представляют собой химические соединения металлов с неметаллами, находящиеся в стали и сплавах в виде отдельных фаз [7]. *Однако мы предлагаем конкретизировать данное определение тем, что химические соединения, которыми являются НВ, относятся к группе материалов синтетических минеральных сплавов.*

Синтетические минеральные сплавы (симиалы) – это материалы, состоящие из комплексных химических соединений оксидов металлов и некоторых неметаллов, например Si. Они подобны природным минералам по химическому составу, однако отличаются от них по некоторым структурным параметрам.

Общей целью многих технологических и фундаментальных исследований в области повышения качества стали является обеспечение минимального количества и размера включений, а также контроль их распределения в металле. Однако не менее важной является идентификация и изучение самих включений. В связи с этим актуальным является использование современных методов и способов идентификации неметаллических включений в сварных соединениях.

Работа преследует цель продемонстрировать возможности современного оборудования и методов исследования для идентификации и оценки НВ в стальных соединениях.

### **1. Исследуемые материалы и оборудование**

Для исследования использованы образцы сварных соединений, полученных на низкоуглеродистой трубной стали X70 производства Японии (российский аналог – сталь 10Г2С) (класс прочности К60), размер трубы 1420×15,7 мм. Сварка кольцевого шва трубы выполнена по технологии РД+МПС (корень – ручная дуговая сварка, заполнение и облицовка – полуавтоматическая сварка самозащитной порошковой проволокой) в производственных условиях. Сварочные материалы: для сварки корня шва использованы электроды LB-52U (ЛБ-52У) (Ø 3,2 мм; Kobe Steel, Ltd (Япония)), для заполняющих и облицовочного слоев – самозащитная порошковая проволока Innershield NR-208Special (Ø 2,0 мм; The Lincoln Electric Company (США)).

В качестве наиболее современных методов выбраны рентгеноспектральный (микронзондовый) анализ и наноидентирование.

Рентгеноспектральный (микронзондовый) анализ проведен на электронном сканирующем микроскопе JSM-63090LV с энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 350 DC при следующих условиях: рабочее расстояние – 10 мм, ускоряющее напряжение – 20 кВ, SS – 60.

Для рентгеноспектрального анализа образцы размером 7×7×10 мм вырезали электроэрозионной резкой при использовании проволочного электроэрозионного станка, модель ЕСОКАД L+10, диаметр проволоки 0,25 мм, скорость резки 8 м/с. Для выполнения рентгеноспектрального анализа поверхность образцов была тщательно отполирована и очищена, поскольку неровности приводят к нетипичному рассеиванию рентгеновских лучей и значительным ошибкам в определении концентрации элементов.

В рентгеноспектральном (микронзондовом) анализе при исследовании пробы образец сканируется с помощью электронного микронзонда – пучка электронов диаметром до 1 мкм, этот метод дает возможность определить химический состав отдельных неметаллических включений, а в некоторых случаях и состав в разных зонах самого включения, что позволило идентифицировать включения на более высоком уровне.

Метод наноидентирования позволяет определить свойства НВ. Данный метод предполагает пошаговое внедрение микроскопического индентора, который представляет собой алмазную пирамидку, на участке поверхности образца, на котором присутствует «вскрытое» НВ. Результаты исследований получены с помощью прибора NanoTest-600 (производитель Micro Materials Ltd., Великобритания). Площадь участка на поверхности образца составила 90×90 мкм, шаг индентирования составил 5 мкм, нагрузка в каждой точке составила 100 иН, в результате испытания были получены данные о распределении значения твердости и модуля упругости на участке эксперимента, а значит, были получены сравнительные характеристики этих величин как у НВ, так и у основного металла.

Для рентгеноспектрального анализа были подготовлены образцы из двух основных зон сварного соединения: корневого шва 1 (рис. 1) и заполняющих слоев 2 (рис. 1).

### **2. Результаты исследований**

Исследования, проведенные с помощью рентгеноспектрального анализа, позволили прежде всего установить, что в корне сварного шва и в запол-

няющих слоев преобладают комплексные включения сложного химического состава на основе оксида кремния  $\text{SiO}_2$ , сульфатов ( $\text{SO}_4$ ), хлоридов (Cl) и фторидов (F). Кроме того, подтверждается химическая неоднородность некоторых включений и четко прослеживаются тенденции, определяющие связь химического состава включений с составами стали и сварочных материалов.

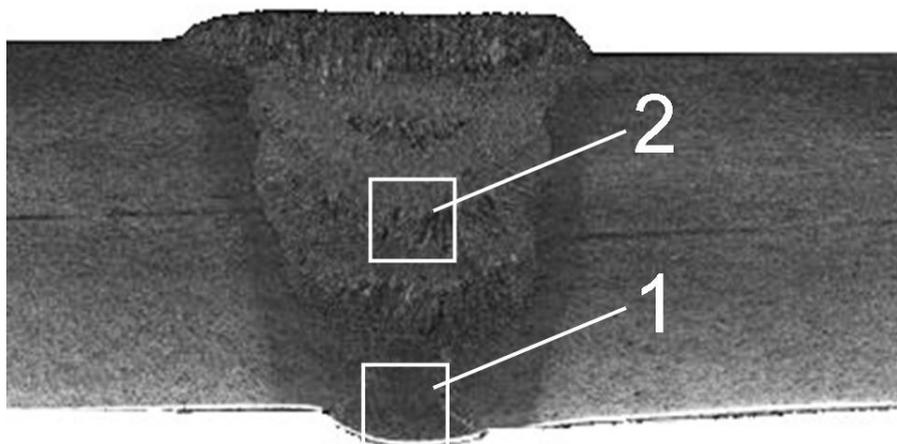


Рис. 1. Схема выборки образцов для исследования сварного соединения методом рентгеноспектрального анализа

В корневом шве были обнаружены три основных типа включений, каждый из которых имеет свой химический состав (табл. 1). В заполняющих слоях шва выявлено два основных типа (табл. 2).

Таблица 1  
Химический состав зерен минеральных фаз в корне шва (мас. %)

Тип включения	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SO}_3$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{MgO}$	$\text{TiO}_2$	$\text{Cr}_2\text{O}_3$	$\text{MnO}$	$\text{CaO}$	$\text{FeO}^+$	$\text{ZnO}$	$\text{NiO}$
1	64,80	0,00	0,00	0,00	30,49	0,00	0,14	0,00	0,00	4,22	0,00	0,35
2	53,60	0,60	0,00	0,00	30,15	0,00	0,11	0,11	0,00	14,95	0,00	0,43
3	4,54	5,30	29,24	7,25	3,15	0,72	0,00	0,00	26,23	17,26	3,82	0,00

Примечание.  $\text{FeO}^*$  – суммарное содержание оксидов железа.

Таблица 2  
Химический состав зерен заполняющего слоя шва (мас. %)

Тип включения	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	F	$\text{MgO}$	$\text{TiO}_2$	$\text{Cr}_2\text{O}_3$	$\text{MnO}$	$\text{CaO}$	$\text{FeO}^*$
1	11,69	–	3,07	1,21	–	–	9,30	2,16	3,41
2	–	0,48	–	0,09	0,00	0,03	0,35	0,72	30,29

Примечание.  $\text{FeO}^*$  – суммарное содержание оксидов железа.

Методом кристаллохимических расчетов были установлены формулы включений различного типа. В корне выявлены следующие включения: первое соответствует по стехиометрии сепиолиту (минерал из класса силикатов).

Его кристаллохимическая формула:  $(\text{Mg}_{2.792} \text{Fe}_{0.218} \text{Ni}_{0.015983} \text{Cr}_{0.002})_{3.025} [\text{Si}_3, \text{O}_{11}]$ . Второе включение по стехиометрии относится к бронзиту (магнезиально-железистая разновидность минералов класса силикатов). Его кристаллохимическая формула:  $(\text{Mg}_{1.616} \text{Fe}_{0.449} \text{Ni}_{0.012} \text{Mn}_{0.004})_{2.081} [(\text{Si}_{1.929} \text{Al}_{0.025} \text{Cr}_{0.002})_{1.956} \text{O}_6]$  (рис. 2). Третье включение является полиминеральным агрегатом, в составе которого можно выделить преобладающую в процентном отношении сульфатную составляющую (возможные минеральные фазы: ангидрит- $\text{CaSO}_4$ , мелантерит- $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , астраханит- $\text{Na}_2\text{Mg}[\text{SO}_4] \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ), хлоридную (галит- $\text{NaCl}$ ) и силикатную (кальциевый, железистый и магнезиальный алюмосиликат). Кристаллохимическую формулу данного сложного соединения вычислить невозможно, поэтому ограничились лишь перечислением наиболее вероятных минеральных форм, примерно отвечающих полученному химическому составу зерна. Первое – родонит с примесью фтора. Его кристаллохимическая формула:  $(\text{Ca}_{0.717} \text{Mg}_{2.792}) (\text{Mn}_{3.100} \text{Fe}_{1.137})_{4.237} [\text{Al}_{1.043} \text{Si}_{3.897}]_{4.940} \text{O}_6$  (рис. 3). Второе оказалось искусственным соединением оксида железа с примесью Mg, Ca, Mn, Ni, Cr, Al. Кристаллохимическая формула:  $(\text{Mg}_{0.011}, \text{Ca}_{0.09}, \text{Mn}_{0.044}, \text{Ni}_{0.005} \text{Fe}_{3.786}, \text{Al}_{0.025} \text{Cr}_{0.002})_{1.956} [\text{O}_6]$ .

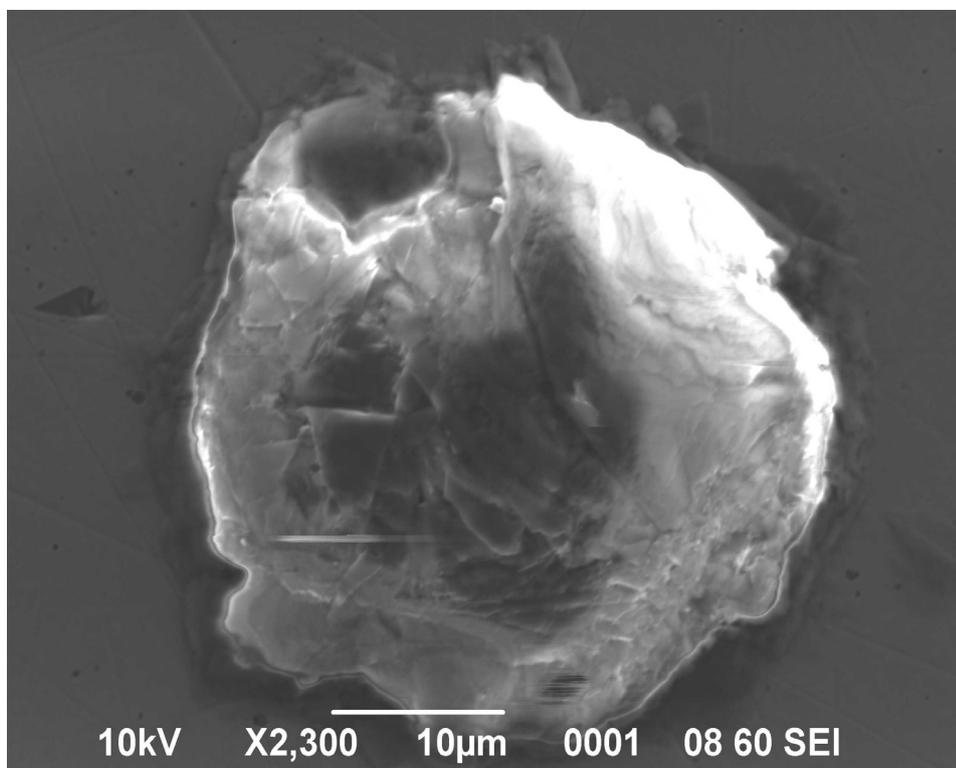


Рис. 2. Комплексное включение сложного химического состава  $(\text{Mg}_{1.616} \text{Fe}_{0.449} \text{Ni}_{0.012} \text{Mn}_{0.004} \text{Cr}_{0.002})_{2.081} [(\text{Si}_{1.929} \text{Al}_{0.025})_{1.956} \text{O}_6]$  в корне шва

Изменение концентрации химических элементов в неметаллических включениях в разных областях сварного соединения говорит об образовании включений не только путем перехода их из основного или электродного металла, но и в результате химических реакций, протекающих при свар-

ке. НВ в металле шва имеют часто сложный состав и структуру, потому как продукты реакций (протекающих в сварочной ванне), выделяясь из раствора, взаимодействуют между собой – образуют растворы, химические соединения [8].

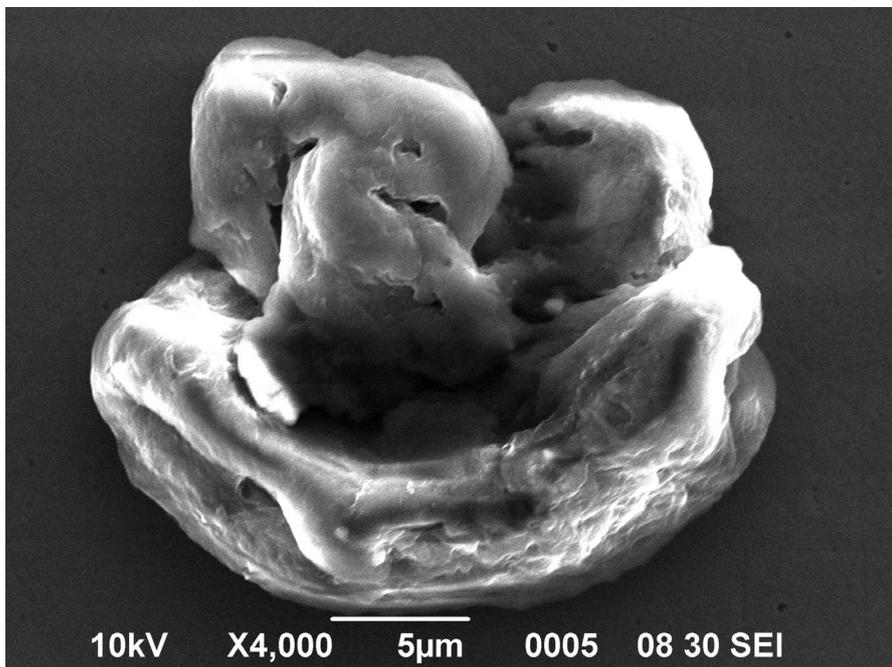


Рис. 3. Комплексное включение сложного химического состава  $(\text{Ca}_{0.717}\text{Mg}_{2.792})(\text{Mn}_{3.100}\text{Fe}_{1.137})_{4.237}[\text{Al}_{1.043}\text{Si}_{3.897}]_{4.940}\text{O}_6$  в заполняющем слое шва

Единым для всех включений является то что, каждое отдельное неметаллическое включение затвердевает как самостоятельная изолированная «отливка» из синтетических минеральных сплавов, а окружающий основной металл вокруг представляет собой металлическую матрицу для этих процессов. Можно сказать, что процесс формирования внутренней структуры включений и процесс затвердевания металла протекают параллельно и по различным принципам [9].

Исследование механических свойств НВ в матрице стали, проведенное по методу наноиндентирования, также позволило выяснить некоторые особенности их поведения. Первичные результаты имели вид диаграммы «сила – перемещение», с помощью графической визуализации и автоматизированного математического расчета эти результаты были переведены в топографические схемы распределения значений твердости и модуля упругости на поверхности исследуемого участка (рис. 4).

Анализ результатов, полученных в ходе наноэксперимента, позволил установить, что твердость неметаллических включений составляет 2,64–3 ГПа, а приведенный модуль упругости – 525–580 ГПа, что примерно на 20 % выше аналогичных показателей стальной матрицы.

Топографическая картина прежде всего подчеркивает, насколько велико количество неметаллических включений в металле, это естественно под-

тверждает, что их влияние на свойства как самих сталей, так и их сварных соединений весьма значительно. Эти данные были использованы при моделировании поведения неметаллических включений в металле под действием нагрузки.

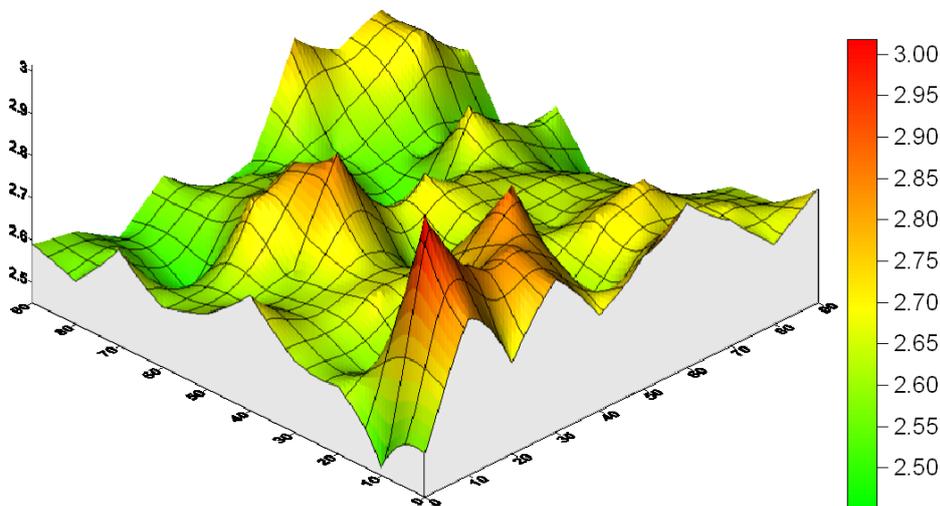


Рис. 4. Топография распределения свойств по площади участка эксперимента, твердость ( $H$ , ГПа)

При моделировании в качестве примера конструкции было выбрано сварное соединение трубопровода. При действии заданной нагрузки на стенку трубопровода в сварном шве в неметаллических включениях, которые представляют собой скопление, размер и свойства которого были определены в ходе описанных исследований, величина напряжения увеличивается в среднем от 18 до 35 %.

При этом отмечено значительное увеличение напряжения в неметаллических включениях, характерное расположение которых наблюдается ближе к корню шва (при одинаковой площади включений по сечению шва) от 35 до 38 %. В данном случае важное значение имеет размер шва. Изменение конфигурации трубы в сварном шве приводит к образованию дополнительных изгибных волн и величина напряжений увеличивается. Величина усиления корня шва значительно меньше облицовочной, в связи с этим ближе к корню шва происходит значительная концентрация напряжений и увеличение его значения.

Кроме того, при увеличении площади включений в 2 раза величина напряжений возрастает на 70 %.

### Заключение

Таким образом, представлены новейшие методы исследования неметаллических включений, продемонстрированы их возможности на конкретных примерах. Доказано, что неметаллические включения имеют природу минеральных соединений, что уточняет дальнейший процесс моделирования влияния различных включений на прочность металлоконструкций.

**Список литературы**

1. **Смирнов, Н. А.** Современные методы анализа и контроля продуктов производства / Н. А. Смирнов. – 2-е изд., дополн. и перераб. – М. : Metallurgiya, 1985. – 256 с.
2. **Семенова, Е. С.** Проблемы оценки качества металла, методы и объем контроля трубопроводной арматуры опасных производственных объектов / Е. С. Семенова // Техническое регулирование. Actual Conferens. – 2010. – V. 2 (65). – С. 22–25.
3. **Малкин, А. И.** Процессы зарождения и роста коррозионных трещин на стали магистральных трубопроводов. Ч. II. Кинетические закономерности и влияние условий эксплуатации на КРН трубных сталей в водных средах / А. И. Малкин, А. И. Маршаков, В. Э. Игнатенко // Коррозия: материалы, защита. – 2010. – № 2. – С. 1–13.
4. **Подгаецкий, В. В.** Неметаллические включения в сварных швах / В. В. Подгаецкий. – М. ; К. : МАШГИЗ, 1962. – 84 с.
5. **Колосов, М. И.** Качество слитка спокойной стали / М. И. Колосов, А. И. Строганов, Ю. Д. Смирнов, Б. П. Охримович. – М. : Metallurgiya, 1973. – 408 с.
6. **Басиев, К. Д.** Механо-коррозионные процессы в грунтах и стресс-коррозия в магистральных газопроводах / К. Д. Басиев, А. А. Бигулаев, М. Ю. Кодзаев // Вестник Владикавказского научного центра. – 2005. – № 1. – С. 34.
7. **Сокол, И. Я.** Структура и коррозия металлов и сплавов: Атлас : справ. изд. / И. Я. Сокол, Е. А. Ульянин, Э. Г. Фельдгандлер. – М. : Metallurgiya, 1989. – 400 с.
8. **Флемингс, М.** Процессы затвердевания / М. Флемингс. – М. : Мир, 1977. – 420 с.
9. **Beskow, K.** Chemical characteristics of inclusions formed at various stages during the ladle treatment of steel / K. Beskow, J. Jia, C. H. P. Lupis, and Du Sichen // Ironmaking and Steelmaking. – 2002. – V. 29, № 6. – P. 427–435.

**References**

1. Smirnov, N. A. *Sovremennyye metody analiza i kontrolya produktov proizvodstva* [Modern methods of analysis and control of production outputs]. Moscow: Metallurgiya, 1985, 256 p.
2. Semenova E. S. *Tekhnicheskoe regulirovanie. Actual Conferens* [Technical regulation. Actual conference]. 2010, vol. 2 (65), pp. 22–25.
3. Malkin A. I., Marshakov A. I., Ignatenko V. E. *Korroziya: materialy, zashchita* [Corrosion: materials, protection]. 2010, no. 2, pp. 1–13.
4. Podgaetskiy V. V. *Nemetallicheskie vklyucheniya v svarnykh shvakh* [Non-metallic inclusions in welded joints]. Moscow ; Kiev: MASHGIZ, 1962, 84 p.
5. Kolosov M. I., Stroganov A. I., Smirnov Yu. D., Okhromovich V. R. *Kachestvo slitka spokoynoy stali* [Killed steel bar quality]. Moscow: Metallurgiya, 1973, 408 p.
6. Basiev K. D., Bigulaev A. A., Kodzaev M. Yu. *Vestnik Vladikavzskogo nauchnogo tcentra* [Bulletin of Vladikavkaz scientific center]. 2005, no. 1, p. 34.
7. Sokol I. Ya., Ulyanin E. A., Fel'dgandler E. G. *Struktura i korroziya metallov i splavov: Atlas: sprav. izd.* [Structure and corrosion of metals and alloys: reference book]. Moscow: Metallurgiya, 1989, 400 p.
8. Flemings M. *Protssesy zatverdevaniya* [Processes of solidification]. Moscow: Mir, 1977, 420 p.
9. Beskow K. Jia J., Lupis C. H. P., Du Sichen. *Ironmaking and Steelmaking*. 2002, vol. 29, no. 6, pp. 427–435.

***Игнатов Михаил Николаевич***

доктор технических наук, профессор,  
кафедра сварочного производства  
и технологии конструкционных  
материалов, Пермский национальный  
исследовательский политехнический  
университет (г. Пермь,  
пр. Комсомольский, 29)

E-mail: svarka@pstu.ru

***Ignatov Mikhail Nikolaevich***

Doctor of engineering sciences, professor,  
sub-department of welding fabrication  
and structural material technology, Perm  
National Research Polytechnic University  
(Perm, 29 Komsomolsky avenue)

***Игнатова Анна Михайловна***

кандидат технических наук, старший  
научный сотрудник, Пермский  
национальный исследовательский  
политехнический университет  
(г. Пермь, пр. Комсомольский, 29)

E-mail: anutapages@gmail.ru

***Ignatova Anna Mikhaylovna***

Candidate of engineering sciences, senior  
staff scientist, Perm National Research  
Polytechnic University (Perm,  
29 Komsomolsky avenue)

***Канина Александра Евгеньевна***

аспирант, Пермский национальный  
исследовательский политехнический  
университет (г. Пермь,  
пр. Комсомольский, 29)

E-mail: rusalka-88@mail.ru

***Kanina Aleksandra Evgenyevna***

Postgraduate student, Perm National  
Research Polytechnic University (Perm,  
29 Komsomolsky avenue)

---

УДК 669.640.191

**Игнатов, М. Н.**

**Идентификация и изучение свойств неметаллических включений  
в сварных соединениях / М. Н. Игнатов, А. М. Игнатова, А. Е. Канина //**  
Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические  
науки. – 2013. – № 2 (26). – С. 140–148.

### **Внимание 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: предмет, тема и цель работы, метод и методология проведения работы, результаты и область их применения, выводы, **на русском и английском языках**.

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 подрисовочными 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. В списке указываются:

- 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, выпуск, страницы;
- для материалов конференций – фамилия и инициалы автора, название статьи, название конференции, время и место проведения конференции, город, издательство, год, страницы.

Эти же требования к оформлению списка литературы распространяются на иностранные источники.

В конце статьи допускается указание наименования программы, в рамках которой выполнена работа, или наименование фонда поддержки.

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).

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается. Рукопись, полученная редакцией, не возвращается. Редакция оставляет за собой право проводить редакционную 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.**

### ***Уважаемые читатели!***

Для гарантированного и своевременного получения журнала «**Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки**» рекомендуем вам оформить подписку.

Журнал выходит 4 раза в год по тематике:

- ***информатика***
- ***вычислительная техника***
- ***управление***
- ***электроника***
- ***измерительная техника***
- ***радиотехника***
- ***машиностроение***
- ***машиноведение***

Стоимость одного номера журнала – 500 руб. 00 коп.

Для оформления подписки через редакцию необходимо заполнить и отправить заявку в редакцию журнала: факс (841-2) 56-34-96, тел.: 36-82-06, 56-47-33; E-mail: [VolgaVuz@mail.ru](mailto:VolgaVuz@mail.ru)

Подписку на второе полугодие 2013 г. можно также оформить по каталогу агентства «РОСПЕЧАТЬ» «Газеты. Журналы» тематический раздел «Известия высших учебных заведений». Подписной индекс – 36966

---

### **ЗАЯВКА**

Прошу оформить подписку на журнал «Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки» на 2013 г.

№ 1 – \_\_\_\_\_ шт., № 2 – \_\_\_\_\_ шт., № 3 – \_\_\_\_\_ шт., № 4 – \_\_\_\_\_ шт.

Наименование организации (полное) \_\_\_\_\_

ИНН \_\_\_\_\_ КПП \_\_\_\_\_

Почтовый индекс \_\_\_\_\_

Республика, край, область \_\_\_\_\_

Город (населенный пункт) \_\_\_\_\_

Улица \_\_\_\_\_ Дом \_\_\_\_\_

Корпус \_\_\_\_\_ Офис \_\_\_\_\_

ФИО ответственного \_\_\_\_\_

Должность \_\_\_\_\_

Тел. \_\_\_\_\_ Факс \_\_\_\_\_ E-mail \_\_\_\_\_

Руководитель предприятия \_\_\_\_\_

(подпись)

(ФИО)

Дата «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2013 г.